

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE

Union - Discipline – Travail

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**Institut National Polytechnique
Félix HOUPHOUËT-BOIGNY**



THÈSE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY

Mention : SCIENCES AGRONOMIQUES ET GÉNIE RURAL

Spécialité : *Gestion des ressources naturelles et de l'environnement*

Sujet :

**APPORT DE LA TELEDETECTION ET DES SIG POUR LE SUIVI SPATIO-
TEMPOREL DE L'OCCUPATION DU SOL ET LA CARTOGRAPHIE DE LA
SENSIBILITE A L'EROSION HYDRIQUE DANS LA REGION
MONTAGNEUSE DU TONKPI (OUEST DE LA COTE D'IVOIRE)**

Présentée et soutenue publiquement le 26 juin 2020 par

TIESSE BI ATTE CYRILLE

JURY

M ASSIDJO Nogbou Emmanuel	Professeur Titulaire	INP-HB	Président
M ASSI-KAUDJHIS Joseph P.	Professeur Titulaire	UAO	Rapporteur
M DIBI N'Da Hyppolite	Maître de Conférences	UFHB	Rapporteur
M WANDAN Eboua Narcisse	Maître de Conférences	INP-HB	Directeur de thèse
M VEI Kpan Noel	Maître de Conférences	UAO	Examineur

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES SIGLES	v
LISTE DES PLANCHES	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1. Problématique	3
1.2. Objectifs de l'étude.....	4
1.3. Etapas de la rédaction du mémoire	4
Partie I : SIG ET TELEDETECTION : APPLICATION À L'ÉVALUATION DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS.....	6
Chapitre 1 : Application des SIG et de la télédétection au suivi de la dynamique de l'occupation des sols.....	7
1.1 Concepts de dynamique d'occupation des sols	7
1.1.1. Définitions et importances de l'occupation du sol	7
1.1.2. Dynamique de l'occupation du sol.....	8
1.1.3. Facteurs contribuant à la dynamique forestière en milieu montagnard.....	10
1.2 Système d'Information Géographique (SIG)	12
1.2.1. Contribution des systèmes d'information géographique (SIG) à l'étude de la dynamique forestière	12
1.2.2. Paramètres descriptifs du milieu dans un SIG pour le suivi de l'occupation du sol	14
1.3 Télédétection et occupation du sol	15
1.3.1. Présentation générale des satellites	15
1.3.2. Généralités sur les images satellitaires.....	16
1.3.3. Rôle des images satellitaires dans le suivi de la dynamique de l'occupation du sol	18

1.4 Classification d'images satellitaires	21
1.4.1. Télédétection, classification et analyse d'images	23
1.4.2. Prétraitement	25
1.4.3. Amélioration d'images	25
1.4.4. Validation des cartes produites par classification supervisée	27
Chapitre 2 : Contexte géographique de la Région du Tonkpi	31
2.1 Situation géographique de la région	31
2.2 Caractéristiques physiques et climatiques	31
2.2.1. Le relief	31
2.2.2. Le réseau hydrographique	32
2.2.3. Le sol	33
2.2.4. La végétation	34
2.2.5. Le climat	34
2.2.6. Formation géologique	36
2.2.7. Géomorphologie de la région des montagnes	37
2.3. Caractéristiques humaines et agro-économiques	38
2.3.1. La démographie	38
2.3.2. Les activités économiques	39
Chapitre 3 : Matériel et méthodes pour l'évaluation de la dynamique de l'occupation du sol dans la région du Tonkpi	41
3.1. Données pour l'évaluation de la dynamique d'occupation des sols	41
3.2. Méthodes d'évaluation de la dynamique d'occupation des sols dans la région du Tonkpi	42
3.2.1. Prétraitement des images	42
3.2.2. Traitement numérique des images	43
3.2.3. Visites et observations de terrain	43
3.2.4. Classification dirigée	44
3.2.5. Cartographie des classes d'altitudes	45
Chapitre 4 : Résultats et discussions de l'évaluation de la dynamique d'occupation des sols dans la région du Tonkpi	47
4.1. Résultats de l'évaluation de la dynamique d'occupation des sols	47

4.1.1.	Identification des différentes classes d'occupation du sol.....	47
4.1.2.	Cartographie des différentes classes d'occupation du sol	50
4.1.3.	Qualité de la classification supervisée des cartes d'occupation du sol.....	57
4.1.4.	Dynamique spatiale de l'occupation du sol entre 1990 et 2015	60
4.1.5.	Dynamique spatiale de l'occupation du sol en fonction des altitudes	63
4.1.6.	Dynamique spatio-temporelle au sein d'une classe d'occupation du sol en fonction de l'altitude	70
4.2.	Discussions.....	72
4.2.1.	Traitement numérique	72
4.2.2.	Dynamique d'occupation du sol dans la Région du Tonkpi	72
CONCLUSION PARTIELLE.....		74
Partie II : ZONES À RISQUE D'ÉROSION HYDRIQUE DANS LA RÉGION DU TONKPI		76
Chapitre 5 : Généralités sur l'évaluation des risques d'érosion des sols et des techniques utilisées		77
5.1.	Définitions et facteurs de l'érosion	77
5.1.1.	Définitions de l'érosion.....	77
5.1.2.	Facteurs de l'érosion en milieu montagnard	78
5.1.3.	Travaux de recherche sur l'érosion hydrique en Côte d'Ivoire.....	79
5.2	Revue bibliographique des méthodes d'évaluation des risques d'érosion des sols et des techniques utilisées.....	81
5.2.1.	Les approches méthodologiques basées sur la modélisation	81
5.2.2.	Les approches qualitatives basées sur l'expertise	84
5.3	Méthodes d'évaluation de l'érosion	87
5.3.1.	Méthodes d'observations directes et mesures de terrain	87
5.3.2.	Utilisation de la télédétection et des SIG dans l'évaluation de l'érosion.....	92
5.3.3.	Méthodes basées sur la modélisation	94
Chapitre 6 : Matériel et méthodes pour la modélisation de l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi.....		102
6.1.	Données et documents utilisés pour l'évaluation de l'érosion hydrique.....	102
6.2.	Méthodes d'évaluation des facteurs d'érosion	103

6.2.1. Indice de la qualité climatique (IQC).....	104
6.2.2. Indice de la qualité du sol (IQS).....	104
6.2.3. Indice de la qualité anthropique (IQA)	106
6.2.4. Indice de la qualité de la végétation (IQV)	107
6.2.5. Elaboration de la carte de sensibilité à l'érosion.....	108
Chapitre 7 : Résultats et discussion de l'évaluation de l'érosion hydrique.....	110
7.1. Résultats de l'évaluation de l'érosion hydrique	110
7.1.1. Résultats de l'indice de qualité climatique (IQC)	110
7.1.2. Résultats de l'indice de la qualité du sol (IQS).....	113
7.1.3. Résultats de l'indice de la qualité anthropique (IQA).....	119
7.1.4. Résultats de l'indice de qualité de la végétation (IQV).....	124
7.1.5. Cartographie de l'indice de sensibilité à l'érosion (ISE)	128
7.2. Discussions sur les résultats de l'évaluation de l'érosion hydrique	131
CONCLUSION PARTIELLE.....	134
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	136
BIBLIOGRAPHIE	140
ANNEXES	157
ARTICLE PUBLIE	171

DEDICACES

Je dédie la réalisation de ce travail au Seigneur Jésus-Christ, qui m'a donné l'intelligence et la sagesse pour l'achever.

Je le dédie également à toutes mes connaissances de la VIPROCI.

Enfin, je dédie ce travail à tous mes frères et sœurs, à mon épouse et à mes enfants.

REMERCIEMENTS

L'achèvement de la rédaction de cette Thèse, m'offre l'opportunité et l'immense joie de remercier toutes les personnes et toutes les structures qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à sa réalisation, notamment l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (OIBT) pour son appui financier.

Je voudrais avant tout dire merci à Dieu, le Tout Puissant, qui, a su me donner la force et le courage nécessaire pour continuer le travail et atteindre ce stade.

Mes remerciements vont à l'endroit du Professeur YAO Kouassi Benjamin, Directeur de l'école doctorale Polytechnique (EDP), du Docteur SORO Doudjo, Directeur des études de l'EDP et du Docteur WANDAN Eboua Narcisse, Directeur de cette Thèse pour avoir cru en moi en dépit des écueils. Leurs conseils avisés et leurs incessants encouragements ont été les leviers qui m'ont permis de me surpasser afin d'achever ces travaux.

J'adresse également mes sincères remerciements au Professeur Yao Casimir BROU, Directeur de l'Unité Mixte de Recherche et d'Innovation-Sciences Agronomiques et Génie, pour m'avoir accepté dans cette unité, ce qui m'a permis de finaliser aisément la rédaction de ce mémoire.

Je remercie aussi les membres des différents comités de thèse et le Docteur pour leurs observations pertinentes, leurs conseils et encouragements.

Je remercie le Professeur ASSI-KHAUDJIS Joseph et le Docteur DIBI N'DA Hyppolite pour leurs instructions de cette thèse qui ont été très déterminantes dans la qualité de ce mémoire. J'exprime également ma reconnaissance à l'égard des Docteurs VEI Kpan Noel et TRA BI Zamblé pour leurs critiques constructives et observations pertinentes en vue de l'amélioration de ce travail.

Au personnel administratif de l'Ecole Doctorale Polytechnique, je dis merci pour leur sympathie, leurs disponibilités et conseils.

J'adresse très vivement ma sympathie et ma reconnaissance à mon appui naturel : mon épouse et ma famille qui m'a énormément soutenu. Que le Seigneur continue de veiller sur elle et la bénisse pour toujours!

Je voudrais que, tous ceux que je n'ai pas pu citer ici trouvent l'expression de ma profonde gratitude.

RESUME

La Région du Tonkpi est située à l'Ouest de la Côte d'Ivoire et couvre une superficie de 12 284 km². Elle possède un relief très accidenté, caractérisé par des chaînes de montagnes dont la plupart des versants, déforestés sont totalement dénudés et mis en culture, ce qui a aggravé des problèmes d'érosion provoquant l'effleurement et le détachement des blocs rocheux. Cette situation engendre des dégâts matériels dans les cultures et constitue des risques de protection civile. Face à ces problèmes de déforestation et d'érosion hydrique, la présente étude a été initiée. Elle vise d'une part de cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la région du Tonkpi et d'autre part d'évaluer la sensibilité à l'érosion hydrique dans cette zone, dans la perspective de proposer des actions à entreprendre pour réduire le risque de l'érosion hydrique.

Pour atteindre ces objectifs, cette étude a utilisé des données satellitaires, cartographiques et statistiques. Les données satellitaires ont été constituées de quatre images Landsat de la scène 198-55 issues des capteurs TM (1990), TM (2000), ETM+(2011) et OLI-TIRS (2015), des images MODIS de 2001 à 2017, des images ASTER du modèle numérique de terrain et données pluviométriques de TRMM. Les données cartographiques contenaient quant à elles, les limites administratives, le réseau routier et hydrographique, la couche de l'habitat, et la carte pédologique de la région du Tonkpi. Enfin, les données démographiques, thermiques et pluviométriques de la zone d'étude ont été utilisées comme données statistiques. La cartographie de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015 s'est appuyée sur la classification dirigée par maximum de vraisemblance pour la détermination des classes de l'occupation du sol et la détermination des classes d'altitudes à partir du modèle numérique de terrain (MNT) du satellite ASTER a été utilisée. Elle a permis de mettre en évidence sept classes de l'occupation du sol à savoir : les forêts denses, les forêts dégradées, les savanes arborées, les cultures et jachères, les sols nus, les habitations et les cours d'eau, qui se répartissent sur trois classes d'altitudes, les basses (160-320 m), les moyennes (320-520m) et les hautes (520-1320). De 1990 à 2015, l'occupation du sol révèle une dynamique temporelle marquée par une déforestation correspondant à la perte des superficies des forêts denses. Cette perte a été compensée par un accroissement des surfaces occupées par les forêts dégradées, des savanes arborées, des cultures et jachères, des habitations et des sols nus. Par ailleurs, l'on note une dynamique spatiale marquée par un gradient décroissant des basses altitudes vers les hautes altitudes. L'évaluation qualitative de la sensibilité à l'érosion hydrique basée sur la modélisation par MEDALUS a montré trois niveaux de sensibilité à l'érosion, faible, moyenne et forte. Ainsi, plus de 78% de la région présente une sensibilité moyenne à forte où la quasi-moitié (43%) de la région du Tonkpi est fortement sensible à l'érosion hydrique. Cette zone est localisée dans le Sud de la région dans le département de Zouan-hounien, à proximité des grandes villes que Man, Biankouma et Danané. Cette carte de sensibilité à l'érosion hydrique constitue un outil d'aide à la décision permettant aux gestionnaires de la région de mieux orienter les travaux d'aménagement de reconstitution forestière et de lutte contre l'érosion.

Mots clés : Télédétection, SIG, cartographie, occupation du sol, érosion hydrique, modèle MEDALUS, déforestation, montagne, région du Tonkpi, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

The Tonkpi Region is located in the west of Cote d'Ivoire and covers an area of 12,284 km². It has a very rugged terrain, characterized by mountain ranges of which most of the deformed slopes are totally bare and put into cultivation, which has aggravated erosion problems causing the grazing and detachment of the boulders. This situation causes material damage to crops and constitutes risks of civil protection. Facing these problems of deforestation and water erosion, this study has been initiated. On the one hand, it intends to map the spatial-temporal dynamics of land use in the Tonkpi region and on the other to evaluate the sensitivity to water erosion in this area, with a view to proposing actions to reduce the risk of water erosion. To achieve these objectives, the study used satellite, cartographic and statistical data. The satellite data consisted of four Landsat scene 198-55 images from TM (1990), TM (2000), ETM+(2011) and OLI-TIRS (2015), MODIS images from 2001 to 2017, ASTER images from the digital terrain model and TRMM rainfall data. The cartographic data contained the administrative boundaries, the road and river network, the habitat layer, and the soil map of the Tonkpi region. Finally, demographic, thermal and rainfall data from the study area were used as statistical data. The mapping of spatial dynamics-time of land use in the Tonkpi region from 1990 to 2015 was based on the maximum likelihood-guided classification for the determination of land cover classes and the determination of altitude classes from the digital terrain model (TAM) of the ASTER satellite was used. It highlighted seven classes of land cover: dense forests, degraded forests, wooded savannahs, crops and fallow land, bare soils, dwellings and streams, which are spread over three elevation classes, lowland (160-320 m), averages (320-520m) and highs (520-1320m). From 1990 to 2015, land cover revealed a time dynamic marked by deforestation corresponding to the loss of rain forest area. This loss was offset by an increase in the area occupied by degraded forests, wooded savannahs, crops and fallow land, dwellings and bare soils. Furthermore, there is a spatial dynamic marked by a descending gradient from low altitudes to high altitudes. The qualitative assessment of susceptibility to water erosion based on MEDALUS modelling showed three levels of susceptibility to erosion, low, medium and high. Thus, more than 78% of the region has a medium to high sensitivity where almost half (43%) of the Tonkpi region is highly sensitive to water erosion. This area is located in the south of the region in the department of Zouan-hounien, close to major cities such as Man, Biankouma and Danané. This Water Erosion Sensitivity Map is a decision support tool that allows managers in the region to better guide forest restoration and erosion management work.

Keywords: Remote sensing, GIS, cartography, land use, water erosion, MEDALUS model, deforestation, mountain, Tonkpi region, Côte d'Ivoire.

LISTE DES SIGLES

ACP	: Analyse en Composante Principale
AMS	: Analyse de Mixture Spectrale
AMSL	: Analyse de Mixture Spectrale Linéaire
AMSL	: Analyse de Mixture Spectrale Linéaire
ASAP	: Programme d'Adaptation de l'Agriculture Paysanne
ASTER	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BACI	: Banque Atlantique de Côte d'Ivoire
CNRA	: Centre National de Recherche Agronomique
COOPEC	: Coopérative d'Épargne et de Crédit
CCNUCC	: Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
DFCI	: Défense des Forêts Contre les Incendies
ESRI	: Environmental Systems Research Institute
EUROSEM	: European Soil Erosion Model
EVI	: Enhance Vegetation Index
FAO	: Food and Agriculture Organization
FIDRA	: Fonds International pour le Développement de la Retraite Active
FIT	: Front InterTropical
GDEM	: Global Digital Elevation Model
GEOTIF	: Geostationary Earth Orbit Tagged Image File Format
GPS	: Global Positioning System
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique
IQA	: Indice de qualité Anthropiques
IQC	: Indice de la qualité climatique
IQS	: Indice de la qualité du sol
IQV	: Indice de qualité de la végétation
MEDALUS	: Mediterranean Desertification And Land Use
MEH-SAFER	: Modèle d'Érosion Hydrique en milieux Semi-arides de Forte Énergie de Relief

MESALES	: Modèle d'Évaluation Spatiale de l'Aléa Erosion des Sols
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
MODIS	: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	: Normalised Difference Vegetation Index
PESERA	: Pan-European Soil Erosion Risk Assessment
PRFM	: Projet de Reboisement de Flancs des Montagnes
QGIS	: Quantum Geographic Information System
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RUSLE	: Revised Universal Loss Soil Equation
SEMMED	: Soil Erosion Model for Mediterranean Areas
SGBCI	: Société Générale de Banques en Côte d'Ivoire
SIB	: Société Ivoirienne de Banque
SIG	: Systèmes d'Informations Géographiques
SMI	: Société des Mines d'Ity
SODEFOR	: Société de Développement des Forêts
TM	: Thematic Mapping
TRMM	: Tropical Rainfall Measuring Mission
URSS	: Union des Républiques Socialistes Soviétiques
USGS	: United States Geological Survey
USLE	: Universal Soil Loss Equation
UTM	: Universal Transverse Mercator
WEPP	: Water Erosion Prediction Project

LISTE DES PLANCHES

Planche 1 : Zone de jachère et parcelle de culture dans la ville de Man	48
Planche 2 : Cours d'eau et savane arborée à Biankouma (TIESSE <i>et al.</i> , 2017).....	49
Planche 3 : Terrain nu et habitat à Man (TIESSE <i>et al.</i> , 2017).....	49
Planche 4 : Erosion sous les reboisements d'un flanc de montagne et sur un espace enherbée en pente (TIESSE, 2017).....	128
Planche 5 : Terrains soumis à l'érosion à Man (TIESSE, 2017).....	129

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Mise en œuvre d'un SIG par superposition de couches, (DUCROT, 2005)	13
Figure 2 : Image d'un satellite observant la terre, (FAO, 1997)	16
Figure 3 : Résolution spatiale des images satellitaires LANDSAT et échelles de restitutions cartographiques (BENSAID, 2006)	18
Figure 4 : Carte de situation de la zone d'étude	31
Figure 5 : Modèle numérique de terrain (MNT) de la région de Tonkpi	32
Figure 6 : Réseau hydrographique de la région de Tonkpi (TIESSE <i>et al.</i> , 2017).....	33
Figure 7 : Diagramme croisé de la pluviométrie et de la température de Man	35
Figure 8 : Carte géologique de la Région du Tonkpi (TAGINI et BAGARRE, 1972).....	36
Figure 9 : Vue des chaînes de montagnes de la région du Tonkpi (TIESSE, 2017)	38
Figure 10 : Méthode de prétraitement du Modèle numérique de Terrain	45
Figure 11 : Schéma méthodologique pour la réalisation des cartes d'occupation du sol.....	46
Figure 12 : Forêts denses à Man (TIESSE, 2017).....	47
Figure 13 : Forêts dégradées dans la ville de Man (TIESSE, 2017)	48
Figure 14 : Carte d'occupation du sol de la région du Tonkpi en 1990.....	51
Figure 15 : Répartition des différents types d'occupation du sol en 1990 et 2000	52
Figure 16 : Carte d'occupation du sol de la région du Tonkpi en 2000.....	53
Figure 17 : Répartition des différents types d'occupation du sol en 2000 et 2011	54
Figure 18: Carte d'occupation du sol de la région du Tonkpi en 2011	55
Figure 19: Répartition des différents types d'occupation du sol en 2011 et 2015	56
Figure 20: Carte d'occupation du sol de la région du Tonkpi en 2015	57
Figure 21 : Evolution de l'occupation du sol dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015.....	62

Figure 22 : Carte des classes d'altitude de la région du Tonkpi	63
Figure 23 : Dynamique de l'occupation du sol en basses altitudes.....	64
Figure 24 : Dynamique des occupations du sol en basses altitudes de 1990 à 2015.....	65
Figure 25 : Dynamique de l'occupation du sol en moyennes altitudes.....	66
Figure 26 : Dynamique de l'occupation du sol en moyennes altitudes de 1990 à 2015	67
Figure 27 : Dynamique de l'occupation du sol en hautes altitudes.....	68
Figure 28 : Dynamique des occupations du sol en hautes altitudes de 1990 à 2015.....	69
Figure 29 : Mesure de l'érosion par rugosimètre (OLIVIER, 2010)	88
Figure 30 : Dispositif d'étude expérimentale de l'érosion (DE NONI <i>et al.</i> , 2001)	89
Figure 31 : Parcelles aménagées pour la simulation de pluie (DE NONI <i>et al.</i> , 2001).....	89
Figure 32 : Parcelle expérimentale installée au Maroc pour l'étude de l'érosion	90
Figure 33 : Irrigateur manuel à rampe (OLIVIER, 2010).....	91
Figure 34 : Schéma méthodologique des étapes suivies pour la réalisation de l'indice de sensibilité à l'érosion (ISE).....	109
Figure 35 : Carte de températures de surface Source : Landsat 8 (2015)	111
Figure 36 : Carte des précipitations moyennes annuelles de la région du Tonkpi.....	112
Figure 37 : Carte de l'indice de qualité climatique de la région du Tonkpi.....	113
Figure 38 : Carte des pentes (%) de la région du Tonkpi.....	114
Figure 39 : Carte pédologique de la région de Tonkpi.....	115
Figure 40 : Textures des sols de la région du Tonkpi Source : DABIN <i>et al.</i> (1960).....	117
Figure 41 : Carte de l'indice de la qualité du sol dans la région du Tonkpi	118
Figure 42 : Flanc de montagne érodé à Man (TIESSE, 2017)	119
Figure 43 : Carte de la densité de la population en 2014	120
Figure 44 : Densité de localité dans la région du Tonkpi.....	121

Figure 45 : Carte de densité de routes dans la région du Tonkpi.....	122
Figure 46 : Carte de l'indice de qualité anthropique (IQA).....	123
Figure 47 : Fosses et fouilles de concassage à Man (TIESSE, 2017).....	124
Figure 48 : Carte du coefficient de variation de la végétation	125
Figure 49 : Carte d'occupation du sol de la région du Tonkpi en 2015	126
Figure 50 : Carte de l'indice de qualité de la végétation	127
Figure 51 : Carte de sensibilité à l'érosion dans la Région du Tonkpi.....	128
Figure 52: Pourcentage des classes par indice de qualité.....	130

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques des canaux ETM+ et OLI.....	26
Tableau II : Caractéristiques des canaux TM.....	28
Tableau III : Superficies des spéculations agricoles en ha de 2014-2015 dans le Tonkpi.....	40
Tableau IV : Caractéristiques des images TM, ETM+ et OLI, TIRS de la zone d'étude	41
Tableau V : Classes d'occupation du sol	44
Tableau VI : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat TM de 1990.....	58
Tableau VII : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat ETM+ de 2000 .	58
Tableau VIII : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat TM de 2011	59
Tableau IX : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat de 2015.....	60
Tableau X : Synthèse de l'évaluation des classifications dirigées.....	60
Tableau XI : Evolution de l'occupation du sol en fonction du temps.....	61
Tableau XII : Superficies des classes d'altitude de la région du Tonkpi	63
Tableau XIII : Evolution d'une classe d'occupation du sol en fonction de l'altitude.....	70
Tableau XIV : Classes des pentes selon les normes de MEDALUS	105
Tableau XV : Superficies des aptitudes culturales des sols	105
Tableau XVI : Classification des facteurs de vulnérabilité des terrains à l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi.....	108
Tableau XVII : Statistique de la température de surface de la région du Tonkpi	110
Tableau XVIII : Statistique de la pluviométrie de la région du Tonkpi.....	112
Tableau XIX : Répartition de l'indice de qualité climatique dans la région du Tonkpi	113
Tableau XX : Superficies des classes des pentes selon les normes de MEDALUS	114
Tableau XXI : Superficies des aptitudes culturales des sols.....	116
Tableau XXII : Répartition de l'indice de qualité du sol dans la région du Tonkpi	118

Tableau XXIII : Superficies et normes de la densité de la population (DP)	119
Tableau XXIV : Superficies et normes de densité de localité.....	121
Tableau XXV: Superficies et normes de densité de route	122
Tableau XXVI: Répartition géographique de l'indice de qualité anthropique	123
Tableau XXVII : Caractéristiques des classes de variation de couverture végétale	124
Tableau XXVIII : l'indice de qualité de la végétation	127
Tableau XXIX : Indice de sensibilité à l'érosion (ISE)	129
Tableau XXX : Caractéristiques de l'occupation du sol en 1990 et 2000	157
Tableau XXXI: Caractéristiques de l'occupation du sol en 2000 et 2011	157
Tableau XXXII : Caractéristiques de l'occupation du sol en 2011 et 2015.....	157
Tableau XXXIII : Evolution de l'occupation du sol en fonction du temps en basses altitudes	158
Tableau XXXIV : Evolution de l'occupation du sol en moyennes altitudes	158
Tableau XXXV : Evolution de l'occupation du sol en hautes altitudes.....	158
Tableau XXXVI : Quelques points pour la vérification sur le terrain	159

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La déforestation constitue un des défis majeurs auxquels l'homme est confronté, aujourd'hui. Les statistiques de la FAO indiquent que les surfaces forestières sont passées de 4,077 milliards d'hectares en 1990 à 3,948 milliards d'hectares en 2015 (FAO, 2007 ; FAO, 2018) soit une baisse de 129 millions d'hectares.

Dans la plupart des pays africains, la consommation de bois énergie constitue l'une des principales causes de la déforestation. En effet, la gestion des forêts axée jusque là sur les grumes parce que source de revenu immédiat pour les Etats, n'a pas permis de se rendre compte de la grande quantité de bois exploitée à des fins énergétiques.

Au Cameroun par exemple, le bois de feu consommé se chiffre à environ 7 millions de mètres cubes par an (FAO, 2001) alors que le volume de bois d'œuvre exploité dépasse rarement 3 millions de mètres cubes par an depuis plusieurs années (MINEF, 2002).

La Côte d'Ivoire qui est un pays d'Afrique occidentale n'échappe pas à cette situation. En effet, en convertissant les estimations des besoins de charbon de bois en m³ de bois brut, la consommation correspondait à un prélèvement de près de 14 millions de m³ en 1995, Ce qui représentait 5 fois le volume de bois d'œuvre prélevé la même année (DJEZOU, 2009).

Par ailleurs, la biomasse ligneuse représente 73% de la consommation totale d'énergie domestique. Environ 87% des ménages utilisent du bois de chauffe ou du charbon de bois à raison de 2 kg de charbon de bois ou de 4,6 kg de bois de feu par jour. Le bois énergie représente par conséquent un prélèvement annuel de l'ordre de 9,7 millions de tonnes équivalent bois (DJEZOU, 2009).

Ce taux élevé de prélèvement sur le couvert végétal est dû à plusieurs facteurs dont le faible rendement à la fois du système de carbonisation (8 kg de bois pour 1 kg de charbon de bois) et des foyers traditionnels (plus de 40% de perte d'énergie). Cette forte dépendance à la biomasse est susceptible, si rien n'est fait, d'aboutir à ce qu'on appelle "tragedy of commons" (DJEZOU, 2009).

En plus de la consommation en bois énergie, le développement de l'agriculture et l'exploitation de bois d'œuvre de type minier constituent des principaux facteurs de la déforestation. En effet, bien connues pour leur biodiversité floristique (AKE, 1984 ;

N'GUESSAN, 2004 ; N'DA *et al.*, 2008), les forêts ivoiriennes sont passées d'environ 14 millions d'ha en 1963 à 3,4 millions d'hectares en 2015 (FAO, 2017).

Bien que la déforestation soit imputable à l'agriculture extensive, à l'exploitation abusive en bois d'œuvre et aux feux de brousse, force est de reconnaître que l'exploitation des ressources forestières pour des besoins de cuisson en représente de loin la deuxième cause (MERCIER, 1991). L'ensemble de ces phénomènes a conduit à un taux de déforestation annuel de la forêt ivoirienne de l'ordre de 5,2% qui demeure le plus élevé de l'Afrique Subsaharienne (N'GUETTIA, 1999).

En plus des causes sus-évoquées, la croissance démographique contribue également à la déforestation. En effet, l'estimation de la consommation de biomasse énergie pour l'an 2020 représente le triple de celle de l'année 1990 (DCGTx, 1990). De même, selon AUGOU (2003), la consommation nationale de ressources ligneuses connaît une augmentation proportionnelle à la croissance démographique qui est de l'ordre de 3% l'an.

Dans la région du Tonkpi, la déforestation est causée principalement par la surpopulation, l'agriculture extensive sur brulis et l'exploitation forestière (MOUTON, 1959).

Cette déforestation a contribué à dénuder la plupart des versants des montagnes, ce qui a aggravé les problèmes d'érosion (BAKAYOKO *et al.*, 2013 ; N'GUESSAN, 1989) provoquant l'effleurement et le détachement des blocs rocheux. Il en résulte des dégâts matériels dans les cultures qui font planer des risques de protection civile.

Par ailleurs, l'érosion entraîne la dégradation de la fertilité naturelle des sols et la diminution de leur productivité (RAPHIOU, 2013).

En outre, avec l'absence de l'administration forestière due à la guerre qu'a connue le pays en 2002 et la crise post-électorale, les activités d'exploitation forestière illégale et la pratique inadaptée de l'agriculture ont aussi entraîné une destruction de la couverture forestière sur les versants.

Au regard de la forte croissance démographique et la rareté des terres cultivables, la problématique de la reconstitution du couvert forestier, du maintien de la production agricole et de la lutte antiérosive se pose avec acuité. Face à ces défis, l'Etat de Côte d'Ivoire à travers le Ministère des Eaux et Forêts a procédé à la création du Projet de Reboisement de Flancs des Montagnes (PRFM), appuyé en cela par le Programme d'Adaptation de l'Agriculture

Paysanne. Les fonds alloués visent à réaliser le reboisement de 400 ha de lutte antiérosive pour améliorer l'adaptation et la résilience au changement climatique des systèmes de production, des producteurs et des écosystèmes dans la région du Tonkpi.

En considérant les ressources financières limitées pour reboiser les 400 ha dans la vaste région du Tonkpi couvrant une superficie 1.228.400 ha, les gestionnaires sont confrontés à la nécessité impérieuse d'opérer des choix rationnels de sites prioritaires sur lesquels mener des actions de lutte antiérosive.

1.1. Problématique

La problématique ciblée est celle de l'impact de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol sur la vulnérabilité à l'érosion hydrique dans la région montagneuse du Tonkpi.

Le questionnement général de cette recherche peut être explicité comme suit :

Comment la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol influence-t-elle la vulnérabilité à l'érosion hydrique dans la région montagneuse du Tonkpi?

Pour affiner cette problématique générale, elle a été déclinée en trois sous questions.

- Comment les formations forestières ont-elles évoluées dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015?
- Comment les formations forestières évoluent-t-elles en fonction de l'altitude ?
- Les facteurs environnementaux et anthropiques entraînent ils une sensibilité différente du sol à l'érosion hydrique ?

Dans l'ensemble, ce questionnement, qui résulte de la problématique générale de cette recherche, peut se réduire à trois hypothèses :

- les formations forestières ont subi une décroissance dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015 ;
- la dynamique des formations forestières dans la région du Tonkpi est décroissante en fonction de l'altitude;
- Il y a une différence de sensibilité à l'érosion hydrique du fait des facteurs environnementaux et anthropiques.

1.2. Objectifs de l'étude

La présente étude centrée sur la région du Tonkpi a pour objectif général d'analyser la dynamique de l'occupation du sol et de caractériser la sensibilité à l'érosion hydrique, préalables à l'aménagement agroforestier, en vue de donner aux décideurs des éléments indispensables à la mise en place d'une politique de gestion durable de la région du Tonkpi.

De manière spécifique, cette étude vise à :

- cartographier la dynamique des formations forestières dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015;
- cartographier l'évolution des formations forestières en fonction de l'altitude ;
- évaluer la sensibilité à l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi.

1.3. Etapes de la rédaction du mémoire

Le présent mémoire de thèse s'articule autour de deux parties : (1) l'application du SIG et de la télédétection à l'évaluation de la dynamique de l'occupation des sols dans le Tonkpi, et (2) la modélisation prospective pour l'identification des zones à risque d'érosion dans le Tonkpi.

La première partie comporte quatre chapitres : le chapitre 1 correspond à une revue de littérature sur les applications du SIG et la télédétection à l'évaluation de l'occupation des sols. Il introduit les concepts de dynamique d'occupation des sols, de SIG et de télédétection, et de l'évaluation de la dynamique de l'occupation des sols. Le second chapitre traite de la géographie de la région du Tonkpi: situation géographique de la région, caractéristiques physiques et climatiques, caractéristiques humaines et agro-économiques. Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation de la dynamique de l'occupation des sols dans le Tonkpi. Ce chapitre présente l'approche méthodologique utilisée pour l'évaluation. Et enfin, le quatrième chapitre qui traite des résultats obtenus et leurs analyses pour aboutir à une conclusion.

La seconde partie du document est consacrée à la modélisation prospective pour l'identification des zones à risque d'érosion dans le Tonkpi. Elle comporte trois chapitres. Le premier chapitre est une revue de littérature sur l'érosion et la modélisation de l'érosion hydrique des sols. Celui-ci comprend les définitions de l'érosion, les approches de

modélisation, la nécessité d'intégration de la modélisation, SIG et cartographie. Le deuxième chapitre traite des données et des méthodes utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion hydrique, de l'agrégation des critères pour l'évaluation des zones à risque potentiel de MEDALUS pour la modélisation des risques d'érosion. Ce chapitre contient le rappel des principes, la pondération des facteurs, l'agrégation des critères et élaboration de la carte décisionnelle. Et finalement le chapitre 3 traite des résultats de l'évaluation de la sensibilité à l'érosion hydrique à travers la modélisation par MEDALUS, la localisation des zones potentiellement érodables, et une conclusion.

Enfin, une conclusion générale qui fait la synthèse de la démarche méthodologique adoptée, des principaux résultats obtenus et des perspectives de recherche, met fin à l'étude.

**Partie I : SIG ET TELEDETECTION : APPLICATION À L'ÉVALUATION DE LA
DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS**

1.1 Concepts de dynamique d'occupation des sols

1.1.1. Définitions et importances de l'occupation du sol

L'occupation du sol est l'un des principaux paramètres à considérer pour décrire le milieu. Ce paramètre est généralement évalué à partir d'images à haute résolution spatiale (GIRARD, 1994).

Selon FAO (1997), l'occupation du sol est une description physique de l'espace. Elle est définie comme la couverture (bio-) physique de la surface des terres émergées, c'est-à-dire ce qui recouvre le sol.

On distingue ainsi plusieurs catégories biophysiques :

- la végétation (forêts, buissons, champs, pelouses) ;
- les sols nus (même s'il s'agit d'un manque de couverture végétale) ;
- les surfaces dures (roches, bâtiments) ;
- les plans d'eau.

Par conséquent, l'occupation des sols est « observée », c'est-à-dire scrutée par différentes « sources d'observation » situées à plus ou moins grande distance de la surface terrestre : l'œil humain, les photographies aériennes, les sondes satellites, etc.

Les données sur l'occupation des sols fournissent en général des informations quantitatives (classes d'occupation/utilisation, estimations de la superficie). Des précisions concernant les caractéristiques qualitatives (pratique agricole, valeur écologique, etc.) sont nécessaires pour bien décrire les processus en action. Ces données (les classes d'occupation) sont également des unités analytiques qui permettent d'établir un premier lien quantitatif entre les activités humaines, leurs répercussions sur l'environnement, et la dimension géographique (spatiale).

En outre, les changements d'occupation du sol constituent un problème environnemental pressant, agissant à la fois comme une cause et une conséquence du changement climatique.

Les rapports d'évaluation actuels et futurs du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) sont basés sur une compréhension incertaine de la dynamique de la surface terrestre et des processus connexes.

Les applications de la couverture terrestre et les dynamiques des sols dans les modèles du système terrestre liés au changement climatique et des modèles d'évaluation d'impact doivent être mieux reliés et coordonnés. L'importance de ces questions nécessite des systèmes de surveillance continue et des données fiables et à jour.

Les informations concernant l'évolution de l'occupation / utilisation des sols intégrant la dimension temporelle présentent un intérêt majeur pour les politiciens, qui évaluent les décisions touchant à la terre. Il en est de même pour la communauté scientifique – qui découvre les causes sous-jacentes et les conséquences. Ces informations prennent ainsi une dimension beaucoup plus intéressante à travers l'analyse, l'identification et la description du processus en cours (BENSAID, 2006).

Dans cette intention, l'occupation du sol dans les différentes régions a été cartographiée et caractérisée à plusieurs reprises et de nombreux pays ont mis en place une sorte de système de surveillance des terres (base de données spatiales et inventaires sur les forêts et l'agriculture).

De plus, il y a un certain nombre de produits cartographiques d'occupation du sol à l'échelle continentale et mondiale. Ces produits ont été élaborés grâce à la disponibilité des observations satellitaires continues depuis les années 1980.

Avec l'évolution des technologies, il est devenu de plus en plus possible d'obtenir des informations sur l'occupation du sol à partir d'une combinaison d'enquêtes sur le terrain et des données d'observation de la Terre à l'échelle mondiale, régionale et nationale. Des incohérences existent souvent entre les différents produits cartographiques de l'occupation des sols ou des systèmes de surveillance des changements, ce qui complique notre capacité de synthétiser les évaluations d'occupation des sols à l'échelle régionale et mondiale (LASSIEUR, 2006).

1.1.2. Dynamique de l'occupation du sol

La dynamique est « *un changement résultant d'un jeu de forces ...* », (BRUNET *et al.*, 1992). Dans ce contexte, la dynamique d'occupation du sol est un changement de l'occupation du sol entre deux dates sous l'impulsion d'un ou de plusieurs facteurs. La dynamique forestière est

par conséquent, le changement de l'occupation du sol des surfaces recouvertes de forêt entre deux dates sous l'impulsion d'un ou de plusieurs facteurs. La déforestation est une facette de la dynamique forestière.

La description des changements d'occupation du sol est basée sur l'utilisation des cartes et l'analyse des résultats statistiques afin d'apprécier les modifications observées dans la zone d'étude.

Selon la CCNUCC (Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques), la déforestation est le passage d'un état forêt à un état non forêt (PLAN BLEU et FAO, 2015).

Pour la FAO (2001), la déforestation se définit comme la disparition durable ou permanente du couvert forestier, ainsi que le passage de la forêt à une autre utilisation des terres. Elle comprend les zones de forêt converties en terres agricoles, pâturages, réservoirs d'eau et zones urbaines (FAO, 2010).

Le bilan de la FAO sur l'étendue des forêts du monde publié en 2001, a adopté pour l'ensemble des forêts de la planète, une définition commune. Elle considère comme forêt, toute portion de terre de surface supérieure à 0,5 ha, disposant d'une densité d'arbres de hauteur au moins égale à 5 m, avec un taux de recouvrement du sol supérieur ou égal à 10 % (FAO, 2001).

S'appuyant sur la définition de la forêt de la FAO, la couverture forestière mondiale est alors estimée à 3,4 milliards d'hectares et la déforestation tropicale annuelle est évaluée à 15,4 millions d'hectares pour la période 1980 – 1990. La réactualisation des statistiques pour 1995 indique une déforestation tropicale de 13,7 millions d'hectares par an entre 1990 et 1995 (MOISE, 2002).

Cependant, en Côte d'Ivoire, la définition de la forêt est plus approfondie. Selon le MINEF (2014), la forêt désigne toute terre constituant un milieu dynamique et hétérogène, à l'exclusion des formations végétales résultant d'activités agricoles, d'une superficie minimale de 0,1 hectare portant des arbres dont le houppier couvre au moins 30% de la surface et qui peuvent atteindre à maturité une hauteur minimale de 5 mètres.

Considérant cette définition de la forêt ivoirienne, des récentes études de la FAO révèlent que la couverture forestière a fortement régressé de 1986 à 2015, passant de 7 850 864 hectares en

1986 à 5 094 452 hectares en 2000 et à 3 401 146 hectares en 2015. Les taux annuels de déforestation sont respectivement de 3,04 % pour la période 1986-2000 et de 2,66% sur la période 2000-2015. La perte de couvert forestier est ainsi estimée à 2 756 412 hectares entre 1986 et 2000 et à 1 693 306 hectares entre 2000 et 2015 (FAO, 2017).

A l'image de la dynamique forestière du pays dans son ensemble, la forêt de la Région du Tonkpi est en régression. En effet, une étude diachronique de l'occupation du sol de 1990 à 2015 révèle une modification de l'espace naturel avec une déforestation de 51 819 ha soit une perte de (-35,6%) (TIESSE *et al.*, 2017).

1.1.3. Facteurs contribuant à la dynamique forestière en milieu montagnard

Plusieurs facteurs concourent à la déforestation dans une région donnée. Le changement du climat et ces nombreux corollaires de conséquence avec les facteurs anthropiques sont à la base de la disparition forestière.

Dans la région du Tonkpi, la déforestation dont fait l'objet le milieu, ne se dérobe à cette logique. Toutefois, dans la région du Tonkpi, c'est le facteur humain qui prédomine. En effet, les terres de la région souffrent d'une surexploitation due à l'accroissement de la population qui est disproportionnelle à la disponibilité des terres cultivables (CNRA, 2009). Ainsi, cela pose le problème de l'exploitation abusive et même massive de la forêt. Cette déforestation est la résultante de la combinaison de divers facteurs socioéconomiques, politiques et militaires défavorables à la conservation de la nature (TIESSE *et al.*, 2017).

Le mécanisme de la déforestation donc est un processus qui se met progressivement en place avec la présence des populations en quête de terres cultivables. Puis, avec l'expansion démographique, l'urbanisation s'y ajoute. Finalement, les limites des reliques forestières sont repoussées jusqu'à leur disparition totale.

Selon N'DA *et al.*, (2008) et MFOPOU *et al.*, (2009), trois bonnes raisons contribuent à la dynamique forestière : la déforestation, l'exploitation forestière et la pluie acide (pollution). Pour ces auteurs, la déforestation consiste en un abattage d'arbres, et une élimination d'au moins 90% de la couverture forestière d'une région. Elle résulte des actions de déboisement puis de défrichement liées à l'extension des terres agricoles.

Quant à l'exploitation forestière, elle consiste à utiliser le bois sous différentes formes au profit de l'homme pour combler ses besoins. En effet, l'exploitation des forêts est en partie utilisée par les hommes qui ont besoin de se chauffer, se nourrir mais aussi se loger. Et enfin, la pollution des voitures et des usines et en particulier les fumées et les gaz émis par les hommes rendent la pluie acide (FREYDIER, 1997).

Selon ces auteurs la pollution fait pleuvoir des pluies avec des pH égaux à ceux du citron (2,3) et détruit des forêts entières ou en partie, ce dernier facteur est moins apparent sous les tropiques (MFOPOU *et al.*, 2009).

Dans la région du Tonkpi, les causes de la déforestation sont de deux ordres. Premièrement, elle est liée à la croissance démographique. En effet, l'attrait du commerce a attiré une population immigrante venue des pays frontaliers conduisant à un accroissement des emblavures, réduction du cycle des jachères : jadis de 12 à 16 ans, hier de huit à 10 ans, aujourd'hui de quatre à six ans à proximité des routes. Deuxièmement, la déforestation est due à une mauvaise régénération du sol aboutissant à la savanisation, dont la jachère normale est de six (6) ans (MOUTON, 1959). Cette déforestation dans la région du Tonkpi a contribué à dénuder la plupart des versants des montagnes, ce qui a aggravé les problèmes d'érosion (BAKAYOKO *et al.*, 2013, N'GUESSAN, 1989) provoquant l'effleurement et le détachement des blocs rocheux. Cela engendre des dégâts matériels dans les cultures et constitue des risques de protection civile.

En outre, avec l'absence de l'administration forestière due à la guerre qu'a connue le pays en 2002 et la crise post-électorale, les activités d'exploitation forestière illégale et la pratique inadaptée de l'agriculture ont entraîné une destruction de la couverture forestière sur les versants des montagnes.

A l'aide des SIG, de multiples méthodes ont été développées à travers le monde pour décrire le milieu. Ces méthodes, souvent basées sur l'analyse des photographies aériennes et des images satellites, permettent de mieux comprendre et évaluer cette problématique environnementale. En fonction des risques encourus, des modes de suivi et de surveillance peuvent être mis en place afin d'assurer la protection des personnes, de l'environnement et des biens.

1.2 Système d'Information Géographique (SIG)

Le SIG est un outil qui permet de rassembler diverses données « relatives à la fois à la terre et à l'homme, à leurs interactions et leurs évolutions respectives ». Cet outil permet de faire le lien entre des thématiques différentes, à condition d'avoir un point commun d'ordre spatial (PAIN-ORCET *et al.*, 1998).

Le système d'information géographique est conçu pour répondre à des besoins précis « qui déterminent une modélisation finalisée du monde réel » Il permet de saisir, gérer, analyser des données de référence spatiale et d'en faire une présentation sur des cartes plus ou moins réalistes de l'environnement spatial, en se basant sur des objets géographiques, comme les polygones, les lignes et les points, auxquels sont associées des données qualitatives, telles que les caractéristiques naturelles (ENONZAN, 2010).

Le SIG facilite l'intégration de diverses données hétérogènes Il permet de stocker, visualiser, manipuler et afficher toute une gamme d'informations basées sur la géographie. L'information combine des données géométriques et thématiques, dont chaque thème est représenté par une couche, qui rassemble un ensemble d'objets homogènes (parcelles, routes, population), associant la représentation cartographique des objets spatiaux et la table d'informations statistiques. Cela permet d'établir des cartes de synthèse (ENONZAN, 2010).

Ce système permet également de croiser des couches contenant chacune des informations géographiques sur une région donnée. Ce croisement équivaut à superposer deux feuilles transparentes qui contiennent des informations différentes pour la même région.

Enfin, ce système n'est pas uniquement utile à la cartographie, il s'agit d'un outil capable de structurer l'information géographique, qui peut être repris par plusieurs chercheurs en fonction de leurs propres recherches (PAIN-ORCET *et al.*, 1998).

1.2.1. Contribution des systèmes d'information géographique (SIG) à l'étude de la dynamique forestière

L'apport des SIG est nécessaire pour la foresterie. Selon ESRI (2009), les services de foresterie se servent d'un SIG comme composant clé permettant de gérer les ressources de gros bois d'œuvre et de maintenir une gestion durable des forêts. Ces organismes tirent parti des fonctionnalités SIG pour des applications très diverses : estimation des pertes en sols, analyse du marché de gros bois d'œuvre, planification des itinéraires des récoltes et

visualisation du paysage rural. Selon ENONZAN (2010), les objectifs des SIG en foresterie se regroupent en deux catégories :

- extraction d'informations détaillées sur la forêt par télédétection aéroportée ou satellitaire (Occupation du sol, MNT) ;
- développement de méthodes d'intégration d'informations multi sources dans les systèmes d'aides à la prise de décision pour le développement durable des forêts (figure 1).

Sur le plan de la gestion forestière, le système d'information géographique constitue de nos jours des instruments de premier choix dans plusieurs domaines d'intervention suivants :

- l'étude d'impact des constructions ; Poste de vigile, maison forestière, point d'eau, banquettes, etc.
- la gestion des réseaux de communication qui s'est avérée d'une grande importance dans les interventions relevant de la lutte contre les incendies et l'exploitation du bois ;
- la gestion des équipements et des personnels ;
- constitution d'un fond du plan cadastral forestier national ;
- inventaire, gestion des ressources forestières et sylviculture ;
- suivi du processus de désertification ;
- suivi de l'état sanitaire des forêts ;
- DFCI (Défense des forêts contre les incendies).

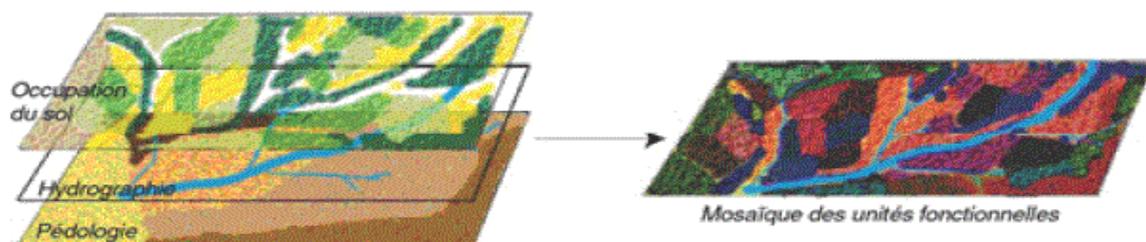


Figure 1 : Mise en œuvre d'un SIG par superposition de couches, (DUCROT, 2005)

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 (figure 1) 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 utilisé les SIG pour déterminer les risques de dégradations forestières. Les systèmes d'information géographique (SIG) sont de plus en plus utilisés pour l'étude des phénomènes de surface et constituent des outils essentiels dans les systèmes interactifs d'aide à la décision et opérationnels pour des opérations de gestion du risque d'éboulement et de chablis (WACHAL et HUDAK, 2000).

1.2.2. Paramètres descriptifs du milieu dans un SIG pour le suivi de l'occupation du sol

Pour décrire le milieu, il faut d'abord bien connaître les différents facteurs qui influencent les processus de la dynamique de l'occupation du sol. En fonction de ces facteurs, des paramètres descriptifs du milieu peuvent être établis. Il existe à cet effet plusieurs paramètres mais certains d'entre eux, eu égard à leur pertinence seront mis en évidence.

1.2.2.1. Modèle Numérique de Terrain

La prolifération des données géographiques associées à l'essor de l'informatique ont contribué à la généralisation des Modèles Numériques de Terrain (MNT) dans des thématiques différentes. « Un Modèle Numérique de Terrain (Digital Terrain Model) est une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique ». Il peut « être composé d'entités vectorielles ponctuelles (points cotés), linéaires (courbes de niveau), surfaciques (facettes) ou représenté en mode raster (cellules) » (www.cdig-var.org). Autrement dit, un MNT est une représentation imagée de l'aspect topographique d'une zone, en fonction des différentes classes d'altitudes.

1.2.2.2. Dérivés des modèles numériques de terrain

Les modèles numériques de terrain (MNT) figurent parmi les outils les plus répandus pour décrire un territoire. Quoiqu'ils soient très pertinents pour étudier l'occupation du sol, ils doivent être utilisés avec précaution. Avant leur utilisation, l'on doit s'assurer de la qualité de la modélisation. Grâce à ces modèles, il est possible de déterminer l'angle de la courbure de la pente, ainsi que son intensité. Cette courbure est calculée à l'aide d'un algorithme (JAIN *et al.*, 2005).

1.2.2.3. Carte des altitudes

La carte des altitudes est une dérivée du MNT. Elle permet de mieux appréhender la dynamique des occupations de sols en fonction du relief, dans une zone fortement accidentée avec de nombreuses chaînes de montagne. En effet, l'altitude troisième coordonnée de la

position d'un lieu, n'est pas représentée directement sur la carte à 2 dimensions car une projection cartographique ne traduit pas l'altitude.

La représentation de l'altitude sur la carte nécessite l'utilisation de signes conventionnels spécifiques (DELVAUX et NYS, 2002). Les altitudes de la surface terrestre permettent de déterminer ses formes de reliefs.

1.3 Télédétection et occupation du sol

1.3.1. Présentation générale des satellites

Un satellite artificiel est un objet fabriqué par l'être humain, envoyé dans l'espace à l'aide d'un lanceur et gravitant autour d'une planète ou d'un satellite naturel comme la Lune. La vitesse imprimée par la fusée au satellite lui permet de se maintenir pratiquement indéfiniment dans l'espace en décrivant une orbite autour du corps céleste. Celle-ci, définie en fonction de la mission du satellite, peut prendre différentes formes : héliosynchrone, géostationnaire, elliptique, circulaire et se situer à des altitudes plus ou moins élevées, classifiées en orbite basse, moyenne ou haute (PAIN-ORCET *et al.*, 1998).

Le premier satellite artificiel Spoutnik I est lancé par l'URSS en 1957. Depuis cette époque, plus de 5500 satellites artificiels ont été placés en orbite. Les satellites jouent désormais un rôle important à la fois sur les plans économiques (télécommunications, positionnement, prévision météorologique), militaire (renseignement) et scientifique (observation astronomique, microgravité, observation de la Terre, océanographie, altimétrie). Ils sont, en particulier, devenus des instruments incontournables pour notre compréhension de l'univers physique, la modélisation des changements climatiques et le fonctionnement de la société de l'information (ENOUZAN, 2010).

Le satellite est suivi par un centre de contrôle au sol, qui envoie des instructions et recueille les données collectées grâce à un réseau de stations terrestres (Figure 2). Pour remplir sa mission, le satellite doit se maintenir sur une orbite de référence en orientant ses instruments de manière précise : des interventions sont nécessaires à intervalles réguliers de temps pour corriger les perturbations naturelles de l'orbite générées, dans le cas d'un satellite terrestre, par les irrégularités du champ de gravité, l'influence du Soleil et de la Lune, ainsi que la traînée créée par l'atmosphère qui subsiste en orbite basse (PAIN-ORCET *et al.*, 1998).

Les progrès techniques permettent aujourd'hui de mettre en orbite des satellites capables de remplir des missions toujours plus sophistiquées (satellites scientifiques), avec une grande autonomie. La durée de vie d'un satellite, variable selon le type de mission, peut atteindre 15 ans (LASSIEUR, 2006).

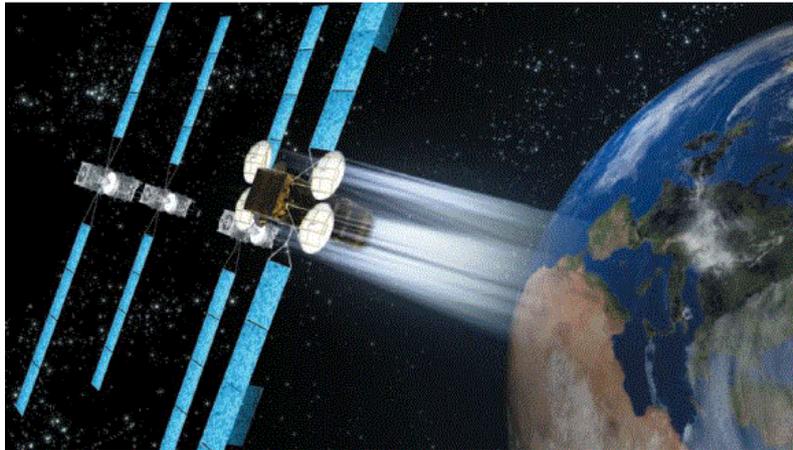


Figure 2 : Image d'un satellite observant la terre, (FAO, 1997)

Les avancées de l'électronique permettent également de concevoir des microsatellites capables d'effectuer des missions élaborées. La résolution atteint actuellement moins d'un mètre pour certaines gammes de fréquence. Celle-ci dépend de la technologie employée mais aussi de l'altitude du satellite : une bonne résolution exige une orbite basse en général héliosynchrone utilisée par exemple par les satellites d'observation de la Terre de la famille SPOT (LASSIEUR, 2006).

1.3.2. Généralités sur les images satellitaires

La télédétection exige dans son application la maîtrise de l'interaction entre le rayonnement électromagnétique incident et les objets. La portion, réfléchi de ce rayonnement et modifiée par l'atmosphère, constitue l'entrée de base des systèmes de télédétection opérant dans les bandes spectrales allant du visible à l'infrarouge (BENSAID, 2006).

Toutefois, il y a plusieurs raisons qui militent pour que l'image de télédétection soit une composante intégrale d'un SIG en particulier. Les images de télédétection sont toujours analysées via une interprétation concernant le positionnement des objets et leur nature. Le processus d'interprétation, qu'il soit visuel ou automatique, transforme les données contenues

dans l'image en éléments d'informations attachées à une localisation géographique, d'où la possibilité d'intégrer ces éléments dans un SIG.

Les données de la télédétection peuvent donc être intégrées dans un SIG dans un processus de gestion des ressources en les combinant avec des données pluri-thématiques et multi-sources. C'est dans cette intégration des données que le potentiel de développement des applications de télédétection est le plus important. La première étape d'un projet utilisant des données de télédétection est de choisir le capteur qui convient le mieux à l'étude.

Ce choix doit répondre à plusieurs conditions (LASSIEUR, 2006) :

- dans le cas d'une analyse multi-temporelle, la période de « revisite », la disponibilité des données d'archives et la continuité du programme doivent être considérées.
- L'emprise (le «swath») de chaque scène individuelle doit également correspondre à l'échelle de la zone à étudier. En effet, il est plus facile d'analyser une scène unique qu'une mosaïque de scènes.
- La résolution et les propriétés spectrales doivent permettre d'identifier le phénomène. Tous ces paramètres doivent être combinés de façon à obtenir le meilleur compromis. De plus, le coût des images joue un rôle important dans la décision finale. La plupart des capteurs disponibles aujourd'hui ont la capacité d'acquérir des images dans différents domaines spectraux.

Afin de bien percevoir la végétation d'un territoire, le recouvrement végétal doit être supérieur à 30 % de la surface du pixel (GIRARD, 1994). Dans le cas contraire, les caractéristiques spectrales du substrat prédomineront (GIRARD et GIRARD, 1999; GIRARD et GIRARD, 2010). Ce pourcentage peut être un seuil indicateur pour évaluer l'érosion. Si le taux de recouvrement est plus grand que 30 %, la végétation joue un rôle protecteur. Tandis que s'il est plus petit, le sol est soumis aux processus d'érosion (BOU KHEIR *et al.*, 2001).

Les indices les plus communément utilisés pour définir la biomasse et l'état de la végétation est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le EVI (Enhanced Vegetation Index).

Concernant la valeur du NDVI, plus la valeur est élevée, plus la végétation est dense. Par contre, lorsque la valeur est faible, la végétation est peu dense. Quant à l'indice EVI, lorsque la valeur est faible cela signifie que la biomasse est faible. Lorsque la valeur est élevée, la végétation est dense.

Le mode panchromatique à une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,7 μm . Ceci correspond au spectre de la lumière visible. Les images panchromatiques, dites «noires et blanches», ont habituellement une meilleure résolution que celles multi spectrales dites «couleurs». Néanmoins, il a été démontré (LASSIEUR, 2006) que la fusion de la bande panchromatique avec les bandes couleurs peut améliorer de manière significative la précision des résultats. Concernant les images satellitaires, leur choix dépend d'une part du type de satellite et d'autre part de la dimension spatiale de la zone d'étude.

Le choix des images satellitaires est basé généralement sur leur disponibilité, la qualité, ainsi que sur la bonne résolution spectrale et spatiale qu'elles offrent. Le milieu agricole d'une zone dans son ensemble peut se concevoir comme un paysage composé d'une mosaïque d'écosystèmes dont les limites correspondent, à première vue, aux grandes unités géographiques: massifs montagneux, dépression, etc.

A l'échelle de ces unités géomorphologiques, les images à haute résolution spatiale TM et OLI, TIRS de LANDSAT trouvent une place privilégiée comme outil d'observation. Avec ce type d'images le niveau perceptible des objets cartographiques est compris du 1/1000000 au 1/50000 (figure 3).

Il importe de rappeler que la plus grande difficulté, porte sur le choix des dates de prises de vue qui doit se faire en fonction des stades végétatifs et des principales cultures. Car, les conditions de terrain varient beaucoup au cours d'une année.

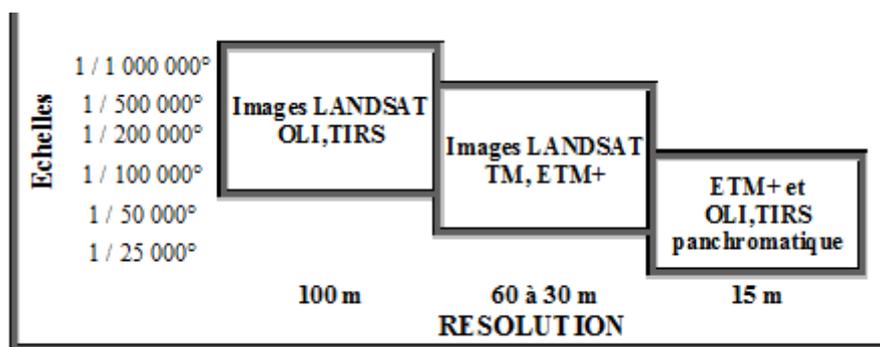


Figure 3 : Résolution spatiale des images satellitaires LANDSAT et échelles de restitutions cartographiques (BENSAID, 2006)

1.3.3. Rôle des images satellitaires dans le suivi de la dynamique de l'occupation du sol

L'imagerie satellitaire a fortement contribué au suivi de la dynamique de l'occupation du sol dans divers pays depuis son avènement. En effet, plusieurs études ont montré l'importance des outils spatiaux pour mesurer les changements de l'occupation du sol.

BEHERA *et al.* (2012) ont analysé et modélisé la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de Choudwar (Rivière Mahanadi, Inde). Ils ont obtenu les résultats selon lesquels les changements d'occupation et d'utilisation des terres pouvaient être modelés à l'aide des automates cellulaires qui ont l'avantage de prendre en compte la composante spatiale. Ils ont démontré que ce modèle est fortement dépendant des variables spatiales prises en considération. Plus un grand nombre de variables sont prises en compte, plus la précision du modèle est grande.

MYINT et WANG (2006) ont abouti à la conclusion selon laquelle la combinaison des chaînes markoviennes et des automates cellulaires permettaient de prédire les changements de l'occupation du sol à Norman (Oklahoma, Etats-Unis d'Amérique) en 2000. Ils ont utilisé une approche de détection de changement post-classification pour identifier les changements d'occupation du sol à Norman entre 1978 et 1989 en utilisant des images Landsat Multispectral Scanner (MSS) et Thematic Mapper (TM).

Ces études ont également précisé que les chaînes markoviennes couplées à l'évaluation multicritère (EMC) peuvent être utilisées pour prédire les changements futurs en se basant sur les taux de variation passés. La méthode est basée sur la probabilité qu'une cellule change d'état durant une période donnée. Ces probabilités sont générées à partir des changements passés et ensuite appliquées en les associant aux cartes d'aptitude issues de l'EMC pour prédire les changements futurs.

Au niveau continental, LAMBIN et EHRLICH (1997) ont employé les données satellitaires Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) sur 10 ans pour évaluer et analyser le changement de l'occupation des sols sur le continent africain entre 1982 et 1991. L'étude a montré que ce processus a affecté plus ou moins 4 % des régions sub-sahariennes au cours de la période d'étude.

Au niveau mondial, MAS (1998) et MOISE (2002) ont utilisé les images satellitaires multitudes de Landsat et Spot, dans le suivi et l'analyse de la déforestation des forêts tropicales respectivement au Mexique, au Brésil et en Guyane. Ils ont réussi à réaliser le suivi et la modélisation de la déforestation à l'aide d'un SIG et du traitement de ces images satellitaires.

En outre, MAESTRIPIERI (2012) a utilisé les imageries satellitaires à moyenne résolution MODIS dans l'analyse diachronique et la modélisation prospective de la dynamique spatio-temporelle des plantations forestières industrielles dans le sud chilien. Il a montré que les SIG permettaient d'appréhender et d'anticiper la dynamique des plantations forestières à plusieurs échelles spatiales et temporelles afin d'identifier les enjeux futurs d'occupation du sol. PAEGELOW *et al.* (2004) et PAEGELOW et CAMACHO-OLMEDO (2005) ont étudié, respectivement les possibilités et les limites de la modélisation de l'occupation du sol à travers l'imagerie satellitaire à Garrotxes (France) et à Alta Alpujarra Granadina (Espagne).

La FAO (1996) a utilisé les images Landsat pour le suivi des changements des forêts tropicales. Ces dernières images ont permis à ENONZAN (2010) de mettre en place une méthode de suivi de l'occupation des terres et la gestion durable des forêts classées de Dogo-Ketou du Bénin. Ces études montrent que la diminution, voire la disparition des forêts tropicales trouvent leur origine dans les feux de forêt, l'exploitation abusive et anarchique des ressources forestières. PAIN-ORCET *et al.* (1998) ont utilisé les images satellites dans la gestion et l'aménagement des forêts tropicales d'Afrique Centrale. Cette étude obtient en conclusion une régression des forêts au profit des cultures.

En Côte d'Ivoire, N'GUESSAN et CONDE (1989) et N'GUESSAN *et al.* (2006) ont travaillé sur la région du « V baoulé », la forêt de Badenou et la forêt du Haut Sassandra d'après des images Landsat TM et SPOT Haute Résolution Visible (HRV). Deux méthodes de classification (supervisée et non supervisée) ont été utilisées dans ces études. Il en ressort que chaque année, entre 2 000 et 3 000 ha de forêts denses se dégradent.

En outre, CHATELAIN (1996), OSZWALD (2005), KONE *et al.* (2006) et OSZWALD *et al.* (2007) ont utilisé ces images de télédétection pour le suivi diachronique de la dynamique des formations végétales forestières et agroforestières ivoiriennes. Ces études obtiennent en résultats que la déforestation et la dégradation des forêts ivoiriennes sont causées par l'expansion de l'agriculture sous-tendue par une forte croissance démographique. De plus, le nombre de campements agricoles de 1986 à 2000 a fortement augmenté provoquant la diffusion des parcelles agroforestières sur l'ensemble des terroirs villageois.

Les études sur le suivi des états de surface tropicaux se sont énormément diversifiées ces dernières années avec le développement de nouveaux capteurs et l'établissement de nouvelles méthodes. L'évolution annuelle de la biomasse est étudiée afin de démontrer l'évolution phénologique de la végétation (TUCKERC, 1979 ; JUSTICE *et al.*, 1985), mais aussi pour effectuer une estimation des surfaces forestières (N'GUESSAN *et al.*, 2006). Ces études se basent sur l'utilisation du NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) (ROUSE *et al.*, 1974). Toutefois, cet indice de végétation comporte une limite très importante pour l'étude du milieu tropical puisqu'il sature dans les valeurs élevées (MERTENS *et al.*, 2001).

Les images à haute résolution spatiale servent également à établir une cartographie des milieux forestiers et de leur évolution (reconquête forestière et déforestation) sur certaines zones (CHATELAIN, 1996). En effet, l'image satellite à haute ou très haute résolution spatiale est actuellement la plus efficace pour discriminer les états de surface de manière répétitive dans le temps. CHATELAIN (1996) utilise des images Landsat TM diachroniques afin d'estimer l'évolution des couverts forestiers au sein des forêts classées de Yapo et de Divo.

A partir d'un travail de terrain utilisant une méthode de relevés botaniques linéaires et son intégration au sein des images satellites, il parvient à estimer le degré de déforestation des espaces forestiers, mais aussi à cartographier les espaces dégradés à partir du changement d'hétérogénéité de la canopée. Cet indice d'hétérogénéité fournit des informations très utiles pour décrire les différents stades de dégradation des formations forestières. D'autres travaux cherchent à montrer les relations entre les changements socio-économiques et la déforestation (MERTENS *et al.*, 2000 ; KOUADIO *et al.*, 2000; MERTENS *et al.*, 2001). Enfin, l'utilisation de nouveaux outils, comme les images radars ou les images issues de satellites de suivis atmosphériques (Meteosat) pour l'étude des milieux tropicaux peut se révéler intéressante pour les nouvelles perspectives qui sont offertes.

1.4 Classification d'images satellitaires

Ce chapitre est consacré aux méthodes de traitements d'images satellitaires et à la production d'une image finale de référence des types d'occupation du sol d'une zone bien définie.

Les cartes sont des outils nécessaires pour le gestionnaire de l'environnement. Elles offrent non seulement les délimitations précises des peuplements forestiers, mais aussi les éléments topographiques relatifs à son environnement (routes, pistes, rivières, village, point d'eau), ou

les informations juridiques et administratives (limites de communes, limites des régions) dont il a besoin.

Pour élaborer la carte d'occupation du sol d'une zone donnée, il est possible de faire recours à la classification et autres analyses d'images.

On distingue deux types de cartes : la carte de végétation qui tente de discriminer les types de végétation en l'absence d'activité humaine et la carte réelle qui vise à caractériser la végétation présente dans la zone (SONG *et al.*, 2001). Les cartes de végétation présentent différentes caractéristiques, certaines étant floristiques, d'autres plus structurales, comme par exemple l'hétérogénéité et la densité de la couverture végétale. Les caractéristiques sont présentées à certaines échelles dans les cartes de végétation et dépendent en général des besoins et des intérêts des utilisateurs de ces cartes (SONG *et al.*, 2001).

Les données satellitaires sont utilisées pour construire des cartes pour la gestion forestière. Ces cartes diffèrent des cartes traditionnelles par leur capacité à mesurer un ensemble de caractéristiques, telles que la surface totale et la surface terrière des forêts, la hauteur dominante du peuplement, le volume de bois, la croissance du peuplement, la productivité, la densité de végétation. De nombreuses publications et mémoires de recherche existent à ce sujet (WACHAL et HUDAK, 2000 ; N'DA *et al.*, 2008). Ces mesures permettent de compléter ou de remplacer l'information observée sur le terrain comme la composition en espèces et la structure des peuplements (MERTENS *et al.*, 2000).

La télédétection s'associe à différentes méthodes de reconnaissance et de classification qui permettent de cartographier la couverture forestière. Citons par exemple l'Analyse de Mixture Spectrale (AMS) et Analyse de Mixture Spectrale Linéaire (AMSL) (SONG *et al.*, 2001), la classification contextuelle (CALOZ *et al.*, 1993), l'algorithme ISODATA (WILSON et LORANG, 2000). L'une des méthodes les plus utilisées est la classification supervisée par maximum de vraisemblances (N'DA *et al.*, 2008).

L'image est une représentation spatiale des informations reçues avec une résolution définie à un instant donné. Elle exerce un rôle majeur dans les développements de la cartographie (CALOZ *et al.*, 1993). La carte est le résultat d'une classification dont l'objectif est de présenter les objets en exprimant leur distribution spatiale (GIRARD et GIRARD, 1999).

On peut distinguer deux grands types de traitements d'images : l'interprétation visuelle et la classification automatique. Les premières cartes de végétation, faites à l'aide de la télédétection, ont été basées sur l'interprétation visuelle des photographies aériennes (GIRARD, 1994). Le scénario de cartographie implique la distinction et délimitation des secteurs homogènes ou des peuplements de végétation. Les propriétés typiques de végétation considérées sont les espèces dominantes, la densité et la taille de la végétation. Certaines de ces propriétés sont mesurées par des méthodes photogrammétriques (GIRARD, 1994).

1.4.1. Télédétection, classification et analyse d'images

Pour passer d'un document complexe (image) à un document simple (carte), il est nécessaire de réaliser une classification d'images. Cette méthode est utilisée pour identifier et classifier numériquement les pixels d'une image. Cette opération est basée sur les caractéristiques statistiques de la valeur de l'intensité du pixel. Selon CALOZ *et al.*, (1993), la classification est une opération qui regroupe, au mieux de leurs ressemblances spectrales, les divers objets du sol. Il existe une grande variété d'approches pour réaliser une classification automatique, comme par exemple la classification supervisée et la classification non supervisée.

Les images multispectrales se composent de pixels à deux dimensions. La valeur de chaque pixel correspond à la moyenne de réflectance de surface (surface de l'objet) où l'axe horizontal (X) représente l'image spatiale pour chaque bande, et l'axe vertical (Y) représente la signature spectrale pour chaque objet.

Lors de l'utilisation d'une méthode de classification supervisée, l'analyste identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui représentent de différents types de surface (Classe d'information) (CCT, 2008). Lorsqu'on parle de classes, il faut faire la distinction entre des classes d'information et des classes spectrales. Les classes d'information sont des catégories d'intérêts que l'analyste tente d'identifier dans les images. Les classes spectrales sont des groupes de pixels qui ont les mêmes caractéristiques (ou presque) qui ont trait à leurs valeurs d'intensité dans les différentes bandes spectrales des données (CCT, 2008). Chaque pixel de l'image sera affecté à la classe thématique correspondante selon son comportement spectral. La classification supervisée est donc conseillée dans le cas où on possède des informations préalables de la zone à cartographier.

Le principe de la classification supervisée est basé sur l'identification des échantillons homogènes de l'image. Ces échantillons représentent une ou plusieurs zones occupées par une catégorie thématique connue, ce qui forme des zones d'entraînements. La procédure de classification supervisée permet une évaluation a posteriori par une matrice de confusion (pourcentage des pixels d'une zone d'entraînement distribuée dans le groupe thématique correspondant (CCT, 2008).

Les étapes de la classification supervisée selon CALOZ *et al.*, (1993), sont :

- la définition de la légende, c'est-à-dire choisir les classes souhaitées selon la problématique de recherche, avant de commencer la classification supervisée ;
- la sélection des échantillons représentatifs pour chaque classe thématique. L'opérateur divise par la suite ces échantillons en deux groupes : un groupe pour l'établissement des signatures spectrales (zones d'entraînement), et un autre servant à la vérification (zones de test) ;
- l'établissement des signatures spectrales en calculant les paramètres statistiques (moyenne, maximum, minimum, variance, etc.) à partir des zones d'entraînement ;
- le choix de l'algorithme de classification et des règles de décision appropriés à l'objectif (par exemple maximum de vraisemblance) ;
- l'implémentation de la classification pour l'ensemble de l'image ;
- l'évaluation de la classification en la comparant à des informations de référence (cartes et relevés de terrains). A ce niveau, il faut évaluer les résultats et l'indice de séparabilité par des graphes (histogrammes et courbes des signatures), calculer la matrice de confusion et l'indice de divergence (distance euclidienne entre les centres de classes).

La classification supervisée nécessite l'intervention de l'expert qui doit définir les classes qu'il juge importantes et caractérise le milieu à étudier. L'occupation du sol dans un milieu varie d'une année à l'autre du fait de divers changements dus à des causes (incendies, coupes, urbanisation...). Il est indispensable de se rendre directement sur le terrain pour des missions

de vérification des échantillons d'apprentissage sélectionnés. Des polygones d'entraînements sont définis sur l'image pour calculer les statistiques des bandes spectrales.

Deux échantillonnages indépendants sont nécessaires : Le premier est utilisé pour les calculs nécessaires de la méthode de classification (les échantillons sont pris au centre des classes afin d'éviter les pixels mixtes). Le deuxième sert pour la validation de la classification (les échantillons sont plus larges et doivent être différents de ceux qui servent à l'estimation des paramètres). Les techniques d'échantillonnages reposent, en général, sur l'utilisation des cartes topographiques, des photos aériennes, du système de positionnement global (GPS) et des logiciels de traitements d'images (ENVI) qui permettent de localiser et de créer les fichiers des échantillons (ROIs ou Regions Of Interest).

Le résultat de la classification peut subir des traitements visant à simplifier le résultat obtenu, comme par exemple une généralisation spatiale par filtrage de la classification visant à éliminer des pixels isolés (Median [3x3] pour ENVI), ou une généralisation thématique par fusion de certaines classes en des classes plus générales.

Les cartes élaborées à partir des images satellitaires subissent un traitement numérique d'image. Il existe diverses méthodes de traitement des images pouvant se regrouper en plusieurs catégories (GIRARD et GIRARD, 1999).

1.4.2. Prétraitement

Il permet de préparer les images pour l'analyse principale et l'extraction de l'information. Les opérations de prétraitement se divisent en une correction géométrique et une correction radiométrique. La correction géométrique ou l'orthorectification permet la correction des distorsions géométriques de l'image dues aux variations de la géométrie Terre-Capteur, et transformer les données en vraies coordonnées géographiques. La correction radiométrique permet quant à elle de réduire les bruits d'images dus au capteur ou à l'atmosphère (Nuages, poussière atmosphérique, vent de sable, etc.).

1.4.3. Amélioration d'images

C'est une opération arithmétique (addition, soustraction, multiplication et division) qui permet de combiner et transformer les différentes bandes spectrales en nouvelles bandes appelées « néo-canaux » qui montrent plus clairement certains éléments de l'image. Plusieurs méthodes

sont appliquées tels que le rapport spectral et l'analyse en composantes principales qui sont utilisées pour mieux représenter l'information en imagerie multispectrale.

L'une des premières investigations de l'image satellitaire se fait par l'affichage simultané de trois canaux. A chacun d'eux est affectée une couleur fondamentale (Rouge, Vert, Bleu) basée sur l'analyse visuelle. Une image satellitaire est plus souvent constituée de plusieurs couches. Chaque couche correspond à un intervalle de longueur d'onde bien précis. Pour chaque pixel de l'image, deux informations sont disponibles et ne doivent en aucun cas être confondues : l'information couleur qui ne sert que pour l'affichage et l'information radiométrique (signature spectrale) qui correspond à une mesure physique (CCT, 2008). L'analyse visuelle des images satellitaires est une étape d'aide pour l'interprétation, dont les critères sont définis par le contraste, la teinte, les formes, etc. (CCT, 2008).

Les bandes spectrales de l'instrument OLI (Operational Land Imager) et ETM+

Ce radiomètre multispectral acquiert des images dans neuf bandes spectrales (tableau I) allant du visible au moyen infrarouge. Sept de ces bandes spectrales étaient déjà présentes sur l'instrument ETM+ de Landsat-7, Deux canaux supplémentaires ont été ajoutés, destinés principalement à la correction atmosphérique (canal bleu à 440 nm) et à la détection des nuages (1380 nm)

Tableau I : Caractéristiques des canaux ETM+ et OLI

Bande spectrale	Longueur d'onde	Résolution
Bande 1 - Aérosols	0,433 - 0,453 μm	30 m
Bande 2 - Bleu	0,450 - 0,515 μm	30 m
Bande 3 - Vert	0,525 - 0,600 μm	30 m
Bande 4 - Rouge	0,630 - 0,680 μm	30 m
Bande 5 - Infrarouge proche	0,845 - 0,885 μm	30 m
Bande 6 - Infrarouge moyen 1	1,560 - 1,660 μm	30 m
Bande 7 - Infrarouge moyen 2	2,100 - 2,300 μm	30 m
Bande 8 - Panchromatique	0,500 - 0,680 μm	15 m
Bande 9 - Cirrus	1,360 - 1,390 μm	30 m

L'analyse de la signature spectrale de différentes classes d'occupation du sol est une étape importante pour le choix des canaux TM des scènes LANDSAT (tableau II).

L'affichage en fausses couleurs consiste à attribuer des couleurs fictives aux bandes spectrales. L'image résultante est dite composition colorée de couleur rouge, vert et bleu (RGB). La couleur rouge peut être attribuée à la bande spectrale proche infrarouge, la couleur verte à la bande rouge et la couleur bleue à la bande verte.

Il est important de signaler que ces remarques sont données à titre indicatif. Différents facteurs en particulier l'état d'humidité du sol et le tapis herbacé en forêt peuvent être à l'origine d'une forte modification de la réflectance du pixel.

1.4.4. Validation des cartes produites par classification supervisée

Il est important de savoir que la qualité des cartes thématiques dérivées des données de télédétection peut être évaluée et exprimée de façon significative. Ceci est important non seulement en fournissant un guide pour la qualité de la carte et son adéquation à un usage particulier, mais aussi de comprendre l'erreur et ses conséquences probables (CCT, 2008).

Dans la cartographie thématique des données par télédétection, l'exactitude est un terme utilisé généralement pour exprimer le degré de correction de la carte de classification. L'évaluation de l'exactitude est maintenant acceptée comme une composante fondamentale des enquêtes de la cartographie forestière par télédétection (FAO, 2017 ; ENONZAN, 2010). Une erreur de classification est, par conséquent, un certain décalage entre la situation représentée sur la carte thématique et la réalité.

Les méthodes conventionnelles d'évaluation de la précision thématique d'une carte sont la matrice d'erreur et l'indice Kappa (N'DA *et al.*, 2008). Cette méthode s'appuie sur la stratégie aléatoire d'échantillonnage. La matrice d'erreur est formulée pour cataloguer des anomalies entre la carte classifiée et la référence (CCT, 2008). La matrice d'erreur donne une évaluation de la précision globale de la cartographie et des résultats de classification pour chacune des classes thématiques.

Tableau II : Caractéristiques des canaux TM

Gamme de bandes (μm)	Localisation spatiale	Résolution (m)	Applications principales
B1 : 0,45-0,52	Bleu	30x30	Pénétration des plans d'eau, cartographie des eaux territoriales, différencier le sol de la végétation
B2 : 0,52-0,60	Vert	30x30	Distinction de la végétation, évaluation de la vigueur et identification des différents types de cultures
B3 : 0,63-0,69	Rouge	30x30	Bande d'absorption chlorophyllienne pour la discrimination des types de végétations
B4 : 0,76-0,90	Proche IR	30x30	Détermination des types de végétation et surveillance de la vigueur et de la biomasse, définition des limites des plans d'eau (cartographie littorale)
B5 : 1,55-1,75	Moyen IR	30x30	Indicateurs de végétation et d'humidité du sol utilisés pour la différenciation de la neige et des usages, un bon contraste entre les types de végétations
B6 : 10,4-12,5	IR therm.	120x120	Analyse des contraintes de végétation, distinction de l'humidité du sol et cartographie thermique
B7 : 2,08-2,35	Moyen IR	30x30	Identification des types de roches altérées par les phénomènes hydrothermique ainsi que les dépôts minérales, cartographie hydrothermale et mesure de l'humidité du sol et de la végétation

Source : (SHORT, 2000 ; BENSALID, 2006 ; CCT, 2008)

1.4.4.1. Matrice de confusion

L'évaluation de la qualité de la classification est une des étapes principales de la cartographie de l'occupation du sol. Pour mesurer la qualité de la classification, la matrice de confusion peut être établie. La matrice de confusion est un tableau affichant les statistiques de la précision de classification d'une image, notamment le degré de classification erronée parmi

les diverses classes (CCT, 2008). Elle est calculée avec les valeurs exprimées en pixels et en pourcentage.

La matrice de confusion est aussi connue sous les termes de : matrice d'erreur, tableau de contingence. Elle permet de calculer une gamme de mesures décrivant la précision de la carte classifiée par rapport à la carte de référence. Pour générer la matrice de confusion, on extrait l'information thématique à partir d'un échantillon de pixels couvrant la même superficie sur les deux cartes. On obtient les données d'étalonnage à partir de la carte de référence et les données de validation de la carte classifiée (CCT, 2008).

Les valeurs de la diagonale de la matrice représentent le nombre de pixels correctement classifiés. De plus, la somme des cellules de la diagonale de la matrice représente le nombre total de pixels correctement classifiés. La proportion du nombre total de pixels correctement classifiés par rapport au nombre total de pixels de la matrice donne la « précision globale » de la classification. L'homogénéité des signatures des parcelles d'entraînements aide à obtenir la meilleure précision.

Pour chaque signature de la matrice, la proportion de pixels correctement classifiés par rapport au nombre total de pixels de la signature spectrale donne une mesure de la précision de classification pour la classe représentée par sa signature spectrale. Cette proportion, exprimée en pourcentage, est aussi connue sous le terme « précision de production » (Producer's Accuracy), car elle fournit une mesure de la qualité de l'analyse lors de la production de la carte classifiée. La précision de production des classes sera différente parce que certaines classes possèdent une réponse spectrale distincte et par le fait même montre une meilleure classification.

Une mesure semblable de la précision peut être également effectuée pour chaque classe thématique en comparant la proportion de pixels correctement classifiés de cette classe au nombre total de pixels de la classe, le résultat est exprimé en pourcentage. La précision de la classe est également connue sous le terme de « précision de l'utilisateur » (User's Accuracy) puisqu'elle fournit à l'utilisateur une mesure de la probabilité d'une classification adéquate des pixels durant le processus de classification de la carte.

Le total des valeurs dans les cellules non diagonales de n'importe quelle signature spectrale représente le nombre de pixels qui ont été incorrectement attribués à d'autres classes. Cette

valeur s'appelle « erreur d'omission » (Error's of Omision), elle peut être calculée pour chaque classe en divisant ce total par la somme des totaux des signatures.

De façon similaire, le total des valeurs des cellules non diagonales de n'importe quelle classe représente le nombre de pixels qui ont été incorrectement assignés dans la classe thématique. Cette valeur s'appelle « erreur de commission » (Error's of Commision), représente une mesure plus complète de la précision de la classification, Cette mesure compare le nombre de pixels de chaque cellule de la matrice avec une distribution aléatoire de pixels.

La production de la matrice de confusion est une étape clé du processus de classification. Elle a permis de déterminer la précision des cartes classifiées par l'algorithme du maximum de vraisemblance.

1.4.4.2. Indice de qualité Kappa

L'indice Kappa évalue dans la matrice de confusion l'accord entre les résultats obtenus et la vérité sur le terrain. Il s'étend de 0 à 1 et il se divise en cinq catégories : accord très faible de 0 à 0,20, accord faible de 0,21 à 0,40, accord modéré de 0,41 à 0,60, accord substantiel de 0,61 à 0,80 accord presque parfait de 0,81 à 1 (CALOZ *et al.*, 1993).

L'indice Kappa (équation 3) est exprimé en termes de précision globale observée (équation 4) et de précision prévue (équation 5) (CCT, 2008).

$$K = \frac{a - b}{1 - b} \quad (3) \quad a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{Nc} x_{ii} \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{Nc} (x_{+i} \cdot x_{i+}) \quad (5)$$

N_c = Nombre de classes

N = Nombre total d'observations

x_{ii} = Nombre d'observations dans la colonne i

Ligne i (diagonale de la matrice)

x_{+i} = Total des observations dans la colonne i , (Total à droite dans la matrice)

x_{i+} = Total des observations dans la ligne i , (Total en bas de la matrice)

2.1 Situation géographique de la région

La région du Tonkpi est une région de la Côte d'Ivoire, située à l'extrême ouest dans le District des montagnes. Elle est située entre les latitudes $8^{\circ}4'$ et $6^{\circ}34'$ Nord, et les longitudes $5^{\circ}24'$ et $7^{\circ}3'$ Ouest (Figure 4). La région du Tonkpi s'étend sur une superficie de 12 284 Km² et regroupe les départements de Biankouma, Danané, Man, Sipilou et Zouan-Hounien.

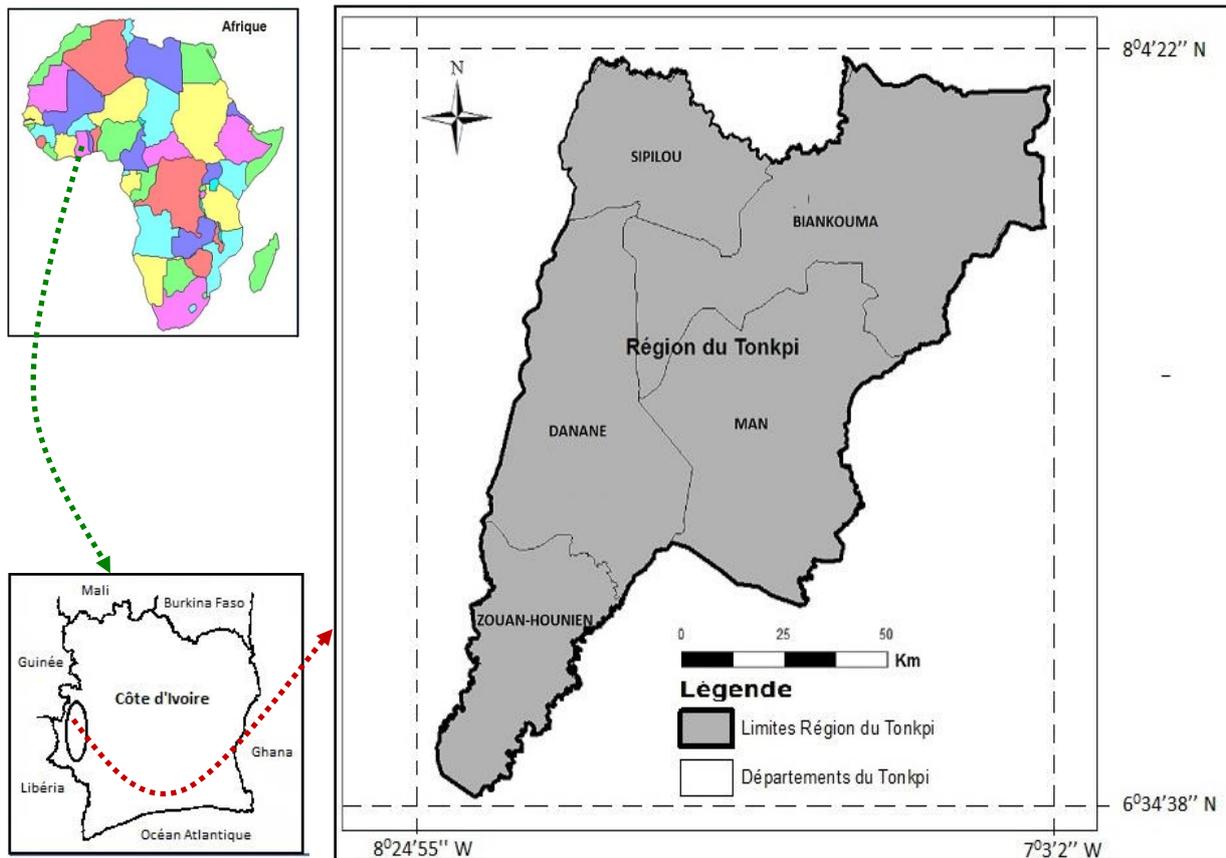


Figure 4 : Carte de situation de la zone d'étude

2.2 Caractéristiques physiques et climatiques

2.2.1. Le relief

Le MNT conçu à partir des images satellitaires ASTER GDEM montre que la topographie de la Région du Tonkpi est marquée par une série de bas plateaux comme l'ont montré BAKAYOKO *et al.*, (2013). Ces plateaux s'enchaînent par endroits avec des zones très accidentées aux contours variant entre des pentes moyennes et des altitudes dépassant parfois

les 1 000 m (Figure 5). Les sommets les plus élevés sont : le Mont Tonkpi (1189 m), le Mont Mia (1077m), et le Mont Glas (1175 m). La plupart des versants des montagnes, abrupts et fracturés ainsi que les vallées encaissées, sont exposés à un risque élevé d'érosion (CNRA, 2009).

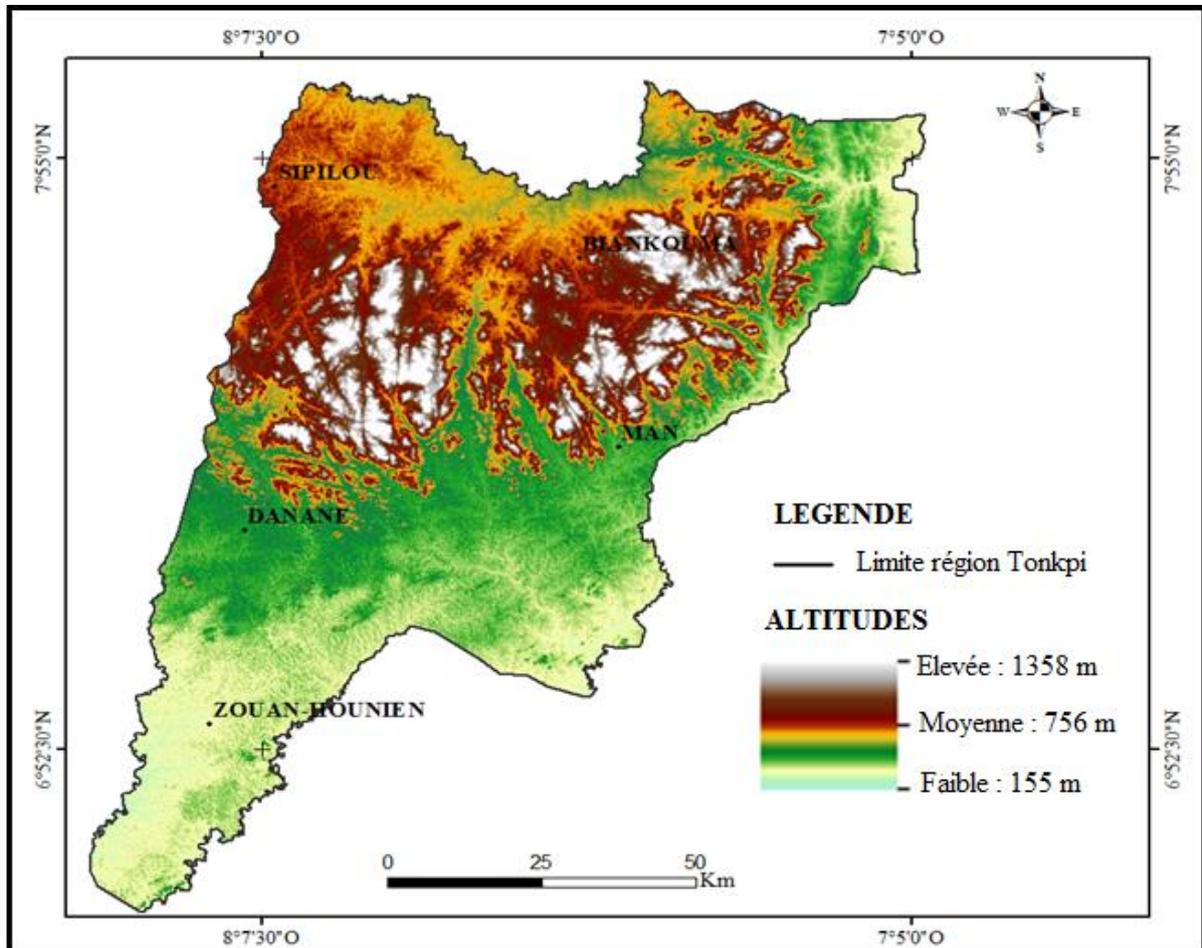


Figure 5 : Modèle numérique de terrain (MNT) de la région de Tonkpi (TIESSE *et al.*, 2017)

2.2.2. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique (figure 6) conçu, dans cette étude, à partir des images satellitaires ASTER GDEM, est dominé par les affluents du fleuve Cavally et le N'Zo au Sud. Ceux-ci sont constitués de principaux bassins versants et les cours d'eau dont l'écoulement est intermittent. Ayant tous deux un écoulement de direction Nord-Sud. Les principaux cours d'eau secondaires sont : *le Blai, le Gouan, le Méné, le Tien, le Dou, le Dreu, le Loua.*

Le régime hydrologique de la région est du type de montagne (AVENARD *et al.*, 1971). Le régime des cours d'eau reflète le régime des précipitations. Ce régime se traduit par une crue de Mai à Juin, suivie d'une décrue de Juillet à Août, d'une crue de Septembre en Octobre suivie d'un tarissement rapide en Novembre et décembre, puis une longue période de basses eaux de Janvier à Mai. Le tarissement des différents cours d'eau est court avec une durée moyenne de deux mois. La décrue est rapide. Elle tourne au tour d'une dizaine de jours.

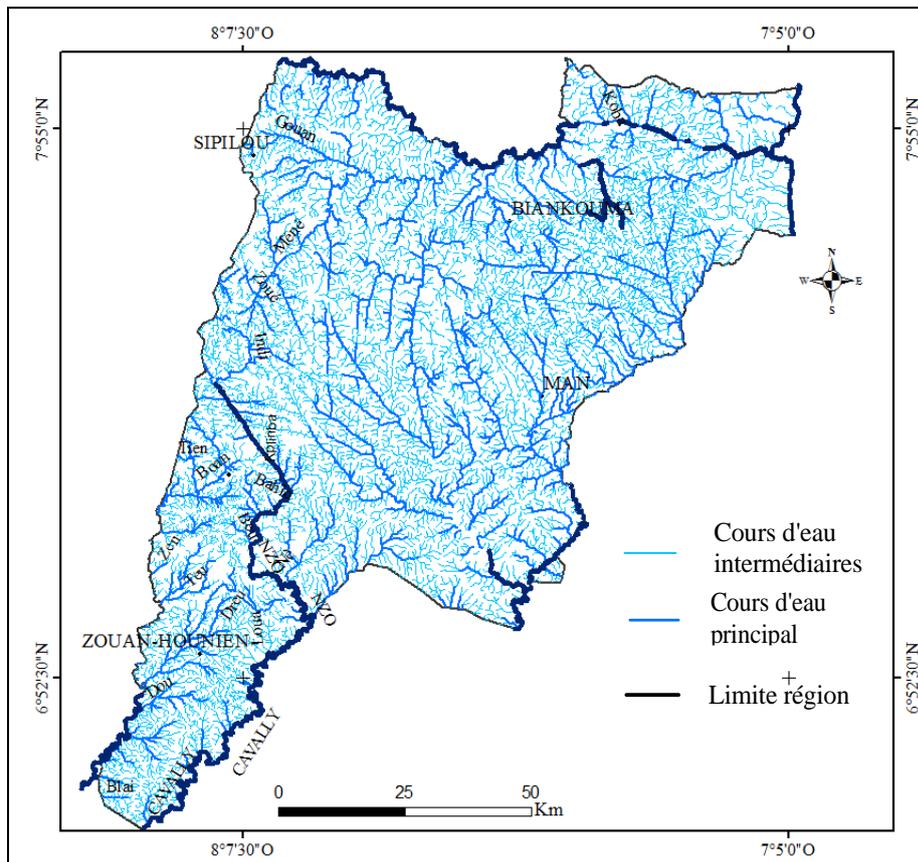


Figure 6 : Réseau hydrographique de la région de Tonkpi (TIESSE *et al.*, 2017)

2.2.3. Le sol

Les sols de la région de Tonkpi sont des sols de type ferrallitique à fertilité chimique moyenne. Ces sols sont largement dominants (CNRA, 2009 ; GUILLAUMET et ADJANOHOUN, 1971).

On observe aussi des sols développés sur des roches basiques (potentiellement riches), des sols hydromorphes dans les bas-fonds et des sols minéraux sur les montagnes. Sur des pentes moyennes à abruptes, les sols ont généralement un couvert végétal faible à nul. Toutefois, la

pédologie de cette région qui souffre des attaques de l'érosion hydrique, montre des sols ferrallitiques fortement ou moyennement désaturés. On distingue selon BOYOSSORO et al. (2007) :

- les sols remaniés sur granitoïdes dont la texture est généralement sablo-argileuse et qui sont très présents au nord et au sud-est de Man ;
- les sols remaniés sur migmatites de nature argileuse, et très épais, se développant sous les forêts denses mésophiles ;
- les sols hydromorphes argilo-limonitiques qui occupent les plaines alluviales des principaux cours d'eau.

2.2.4. La végétation

La Région du Tonkpi fait partie intégrante du domaine forestier de la Côte d'Ivoire. En effet, bénéficiant d'un climat adoucissant et pluvieux, ce côté occidental du pays est couvert par une forêt sempervirente (GUILLAUMET et ADJANOHOUN, 1971). Cependant, à l'image du pays tout entier, cette forêt est de plus en plus détruite au profit des cultures pérennes et l'urbanisation.

D'une couverture végétale constituée à 80% de forêt humide, une partie de cette forêt est transformée en jachères à *Chromolaena odorata* tandis qu'une autre partie est exploitée sous forme de plantations agro-industrielles de café, de cacao ou d'hévéa (CONSEIL REGIONAL, 2013). Cette dynamique forestière suit une logique graduelle au niveau des classes d'altitudes (TIESSE *et al.*, 2017).

Dans ce travail, il est démontré par une étude diachronique de l'occupation du sol une modification de l'espace naturel avec une importante réduction des forêts denses (-35,6%) et des cultures et jachères (-42,14%) et une augmentation des forêts dégradées (15,13%) et des terrains nus et habitations (10,46%). Cette évolution paysagère est actuellement l'objet de plusieurs études académiques.

2.2.5. Le climat

La zone d'étude fait la transition entre le climat subéquatorial au Sud et soudanien au Nord. Le climat qui y règne dérive de l'interférence entre ces deux types de climats. Suivant les

années, elle subit un régime à deux ou quatre saisons et les prévisions concernant le climat annuel sont particulièrement difficiles.

En fait, le temps dans cette zone comme dans le reste du pays et même dans toute l’Afrique de l’Ouest sont déterminés par les déplacements du FIT (front intertropical). Une étude de BOYOSSORO *et al.*, (2007) sur le dernier siècle, par analyse des indices de Nicholson calculés à partir des relevés de la station de Man met en évidence les périodes suivantes:

- une période humide de 1925 à 1946 ;
- une période normale de 1947 à 1968 ;
- une longue période sèche de 1969 à 1993 et
- une petite période humide de 1994 à 2000.

La figure 7 résume l’essentiel des données climatiques mensuelles sur une année. Ils témoignent d’une constance annuelle de la température et une pluviométrie plus abondante de Juin à Octobre.

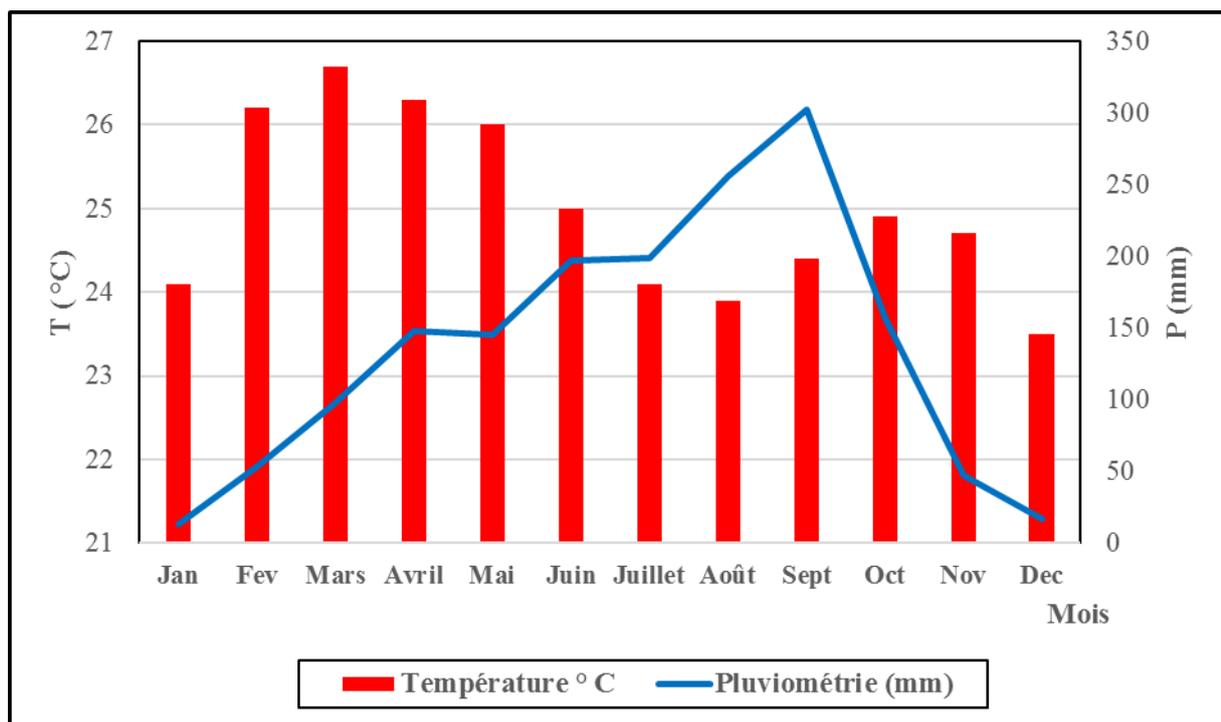


Figure 7 : Diagramme croisé de la pluviométrie et de la température de Man (TIESSE *et al.*, 2017)

2.2.6. Formation géologique

L'environnement géologique est exclusivement constitué par des granites et granito-gneiss, à hypersthène présentant des faciès variés, provenant à la fois des restes d'un socle ancien et d'importantes venues granitiques (AVENARD, 1977). Cette marge orientale qu'on retrouve après la faille du Sassandra est constituée de reliques de formations archéennes au sein des chaînes éburnéennes plus jeunes.

Le substrat géologique de la région du Tonkpi comprend 9 types de roches (figure 8). Ces 9 types de roches peuvent être rangés en 2 groupes en fonction du type de complexe dont elles sont issues. Nous avons : les roches du complexe plutonique abronien, le birrimiens et les roches du complexe granitoïde baouléen.

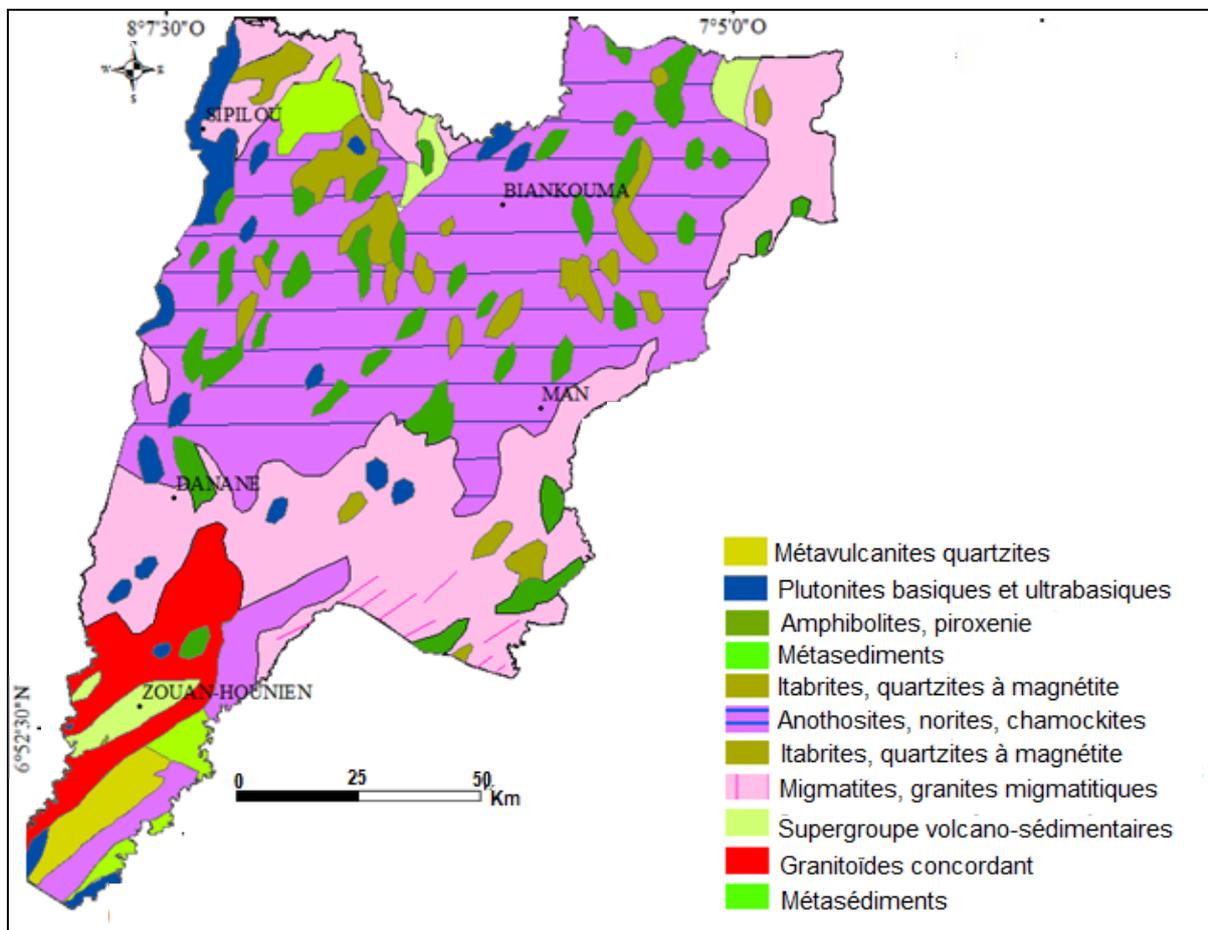


Figure 8 : Carte géologique de la Région du Tonkpi (TAGINI et BAGARRE, 1972)

Le groupe des roches du complexe birrimien occupent une grande partie de la région avec une superficie 10 056,22 Km² soit 89,23 %. On les retrouve sur toute l'étendue de la zone. Elles sont constituées de 6 types de roches.

On a les amphibolites, piroxénite, itabrites, quartzites à migmatite, les métasédiments, supergroupes volcano-sédimentaires, Anorthosites, norites, charnockites. Par ailleurs, le groupe des roches du complexe plutonique abronien se trouvent au Nord-Ouest et Sud de la région. Elles occupent une proportion de 6, 59 % soit une superficie de 742,69 Km². Elles sont composées des métavulcanites quartzites et des roches plutoniques basiques et ultrabasiques.

2.2.7. Géomorphologie de la région des montagnes

La géomorphologie de l'Ouest de la Côte d'Ivoire se démarque aisément. En effet, cette région qui correspond à ce que les géographes appellent « l'ouest » de la Côte d'Ivoire, comporte les reliefs les plus vigoureux de ce pays (AVENARD *et al.*, 1971) :

- d'une part, le massif du Nimba et sa bordure, qui marquent la frontière entre le Libéria, la Guinée et la Côte d'Ivoire.
- d'autre part, le grand ensemble du massif de Man dont certains sommets s'élèvent au-dessus de 1000 m et qui forme un arc de cercle de près de 120 km.

La Région du Tonkpi détient le record du relief le plus accidenté du pays. En effet, un tiers du territoire est composé de montagnes (CNRA, 2009). Ces élévations forment des chaînes de montagnes. Ainsi, BOYOSSORO *et al.* (2007), précisent que la morphologie de surface présente un véritable contraste entre le compartiment du nord et celui du sud. Le compartiment du Nord présente un relief accidenté avec des montagnes (variant de 700 à 1000 m d'altitude), alors que celui du Sud reste monotone avec des altitudes variant de 200 à 300 m et parfois des collines. Les zones de haute altitude sont essentiellement caractérisées par des pentes supérieures à 15 % et occupent plus de 10 % du territoire. Les zones de basse altitude ont des pentes qui varient entre 0 % et 5 % et représentent plus de 80 % de la région.

Enfin, les basses altitudes (situées entre 160 m et 320 m d'altitude) sont localisées en majorité au Sud de la région et dans des zones disséminées à l'Est de la région.

Elle couvre 27,7% de la superficie totale de la région. Pendant que les zones de moyennes d'altitudes (320 m - 520 m) se concentrent essentiellement au Centre et au Nord de la zone d'étude. Elles couvrent 34,6% de la superficie de la région du Tonkpi. Et enfin, la classe des hautes altitudes (520 m-1320 m) qui occupent la majorité de la région (37,7%) se rencontre dans toute la partie Nord de la région du Tonkpi.

La Région du Tonkpi est l'une des régions les plus favorisées par la nature. En effet, de par son nom « les 18 montagnes », elle regorge de nombreux atouts touristiques au travers de son paysage. Véritable art naturel à admirer, le relief de la région se prête à une ondulation alternée et cadencée par ces montagnes (figure 9) et dépressions de différences pouvant atteindre les 1000 m avec des écologies diversifiées (montagnes, plaines, plateaux, bas-fonds) présentant des aptitudes culturelles variées.



Figure 9 : Vue des chaines de montagnes de la région du Tonkpi (TIESSE, 2017)

2.3. Caractéristiques humaines et agro-économiques

2.3.1. La démographie

L'importance de l'impact de la croissance démographique sur les dynamiques forestières et la structuration générale du développement rural conduit à s'intéresser en particulier aux données de population comme un des principaux facteurs de différenciation et de dynamiques territoriales. Ainsi, en Côte d'Ivoire comme partout en Afrique subsaharienne, la croissance démographique est accusée de tous les maux (déforestation, dégradation des sols, érosion, perte de biodiversité, changements climatiques), (NOUFE, 2011).

Selon le recensement de la population effectuée en 2014, la population de la région compte 1 047 769 habitants (RGPH, 2014), tandis que celui de l'an 1988 était estimé à 238157 habitants. Les bas plateaux ont les plus fortes densités de population rurale dans la région, avec de nombreuses localités ayant plus de 200 habitants au km². Les Dan ou Yacouba sont le groupe ethnique autochtone dominant du territoire qui abrite également plusieurs populations ivoiriennes non autochtones ainsi que des étrangers d'origine africaine en particulier des Guinéens, des Maliens et des Burkinabés. Les non africains constituent une population marginale.

La langue autochtone dominante dans la région du Tonkpi est le Dan également connu sous les noms de Da, Gio, Gio-Dan, Ya, Yacouba, Yakuba. La langue Dan se ramifie en deux dialectes, le Blowo (Dan de l'Ouest) et le Gweetaawu (Dan de l'Est), ainsi qu'en au moins 38 sous-dialectes.

2.3.2. Les activités économiques

2.3.2.1. Agriculture

Dans la région de Tonkpi comme dans la plupart des régions du pays, l'économie locale est basée sur l'agriculture avec une production végétale et animale relativement diversifiée. La région réalise diverses cultures (tableau III) d'exportation en particulier le café, le cacao, l'hévéa, le palmier à huile et le cola mais également de nombreuses cultures vivrières dont le riz, le manioc, le plantain, l'igname et le maïs. Il s'y pratique également des cultures maraîchères telles que la tomate, le piment et l'aubergine. Une activité d'élevage y existe et concerne les bovins, caprins, et ovins; de même qu'une activité de pisciculture s'y est développée à la faveur du projet BAD-Ouest (CNRA, 2009).

En dehors de l'aspect topographique et morphologique, la Région dispose de sols ayant des potentialités agricoles nombreuses et variées. Ce qui donne à cette zone des terres fertiles propices pour une production végétale très diversifiée. Cette richesse floristique permet logiquement la présence d'une faune riche. C'est également un espace qui permet l'élevage (bovin, caprin, ovin, etc.) et la pisciculture.

En plus, il y règne un climat doux des montagnes généré par une pluviométrie favorable (1300 à 2400 mm par an) et un réseau hydrographique dense dominé par le fleuve Cavally.

Le potentiel agricole demeure important avec des écologies diversifiées comprenant des zones montagneuses, des plaines, des plateaux et des bas-fonds offrant ensemble des possibilités culturelles variées.

Tableau III : Superficies des spéculations agricoles en ha de 2014-2015 dans le Tonkpi

Spéculations agricoles		Man	Biankouma/ Sipilou	Danané	Zouan- Hounien	Total Région Tonkpi
Cultures de Rente	Café	4 297	37 513	5 735	8 044	55 589
	Cacao	4 318	3 018	11 821	7 221,5	26 378,5
	Hévéa	163	3 018	1 642	1 483	6 306
	Palmier	75	196	144	909	1 324
	Cola	-	-	37,5	26,5	64
Cultures vivrières	Riz	-	7 122	8 334	2 533	17 989
	Manioc	-	17 847	6 091	2 506	26 444
	Banane Plantain	-	208	32	-	240
	Mais	-	-	2 985	317	3 302
	Igname	-	348	139	56	543
Cultures Marai- chères	Tomate	-	18	-	-	18
	Piment	-	05	27,5	16	32,5
	Aubergine	-	08	-	22	08

Source : Direction Régionale du Tonkpi ANADER (2014-2015)

2.3.2.2. L'industrie et le commerce

La région du Tonkpi dispose d'énormes potentialités en ressources minières dont celles de la Société des Mines d'Ity (SMI). Cette société exploite un site minier d'une superficie de 25 km².

On note une véritable industrie touristique dans la région. On a les cascades naturelles, les ponts de lianes, les chaînes de montagne, les singes de la forêt sacrée de Gbêpleu, les grottes de Biankouma, la réserve du Mont Nimba, le parc du Mont Sangbé, les danses traditionnelles Dan, les masques et les fêtes coutumières telles que la fête des ignames chez les Touras.

Concernant le commerce, la région abrite diverses institutions financières dont la BACI, la SIB, le FIDRA et la SGBCI. De même, diverses institutions de micro finance y sont installées et en particulier la COOPEC.

Chapitre 3 : Matériel et méthodes pour l'évaluation de la dynamique de l'occupation du sol dans la région du Tonkpi

3.1. Données pour l'évaluation de la dynamique d'occupation des sols

Les données utilisées pour évaluer la dynamique de l'occupation des sols sont constituées de données satellitaires, statistiques et cartographiques.

Concernant les données satellitaires, nous avons eu recours à quatre images issues des capteurs TM, ETM+ et OLI-TIRS de LANDSAT. Les images Landsat sont issues de la scène 198-55 prises le 28 décembre 1990 par le capteur TM de Landsat 4, le 7 février 2000 par le capteur TM de Landsat 5, le 12 janvier 2011 par le capteur ETM+ de Landsat 7 et le 7 janvier 2015 par le capteur OLI-TIRS de Landsat 8. La zone d'étude est comprise dans la scène 198-55. La période d'acquisition de ces images a été choisie entre Décembre et Février qui correspond à une période sèche. Ceci a permis une bonne distinction du couvert végétal d'avec les autres types d'occupations du sol.

Le tableau IV illustre les caractéristiques des scènes de la zone d'étude (date de prise de vue, centre de scène, angle azimutal, etc.).

Tableau IV : Caractéristiques des images TM, ETM+ et OLI, TIRS de la zone d'étude

Caractéristiques	Capteurs			
	TM	TM	ETM+	OLI, TIRS
Format images	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF
Satellites	LANDSAT 4	LANDSAT 5	LANDSAT 7	LANDSAT 8
Scène de l'image	198/55	198/55	198/55	198/55
Date de prise de vue	28/12/1990	12/01/2011	07/02/2000	07/01/2015
Heure de prise de vue	10h 11m 01s	10h 35m 54s	10h 38m 56s	10h 46m 15s
Dimension de la scène (km)	185 x 185	185 × 185	185 × 185	185 × 185
Élévation (degrés)	44,09	48,48	51,64	50,09
Angle azimutal (degrés)	132,69	134,77	126,36	138,49
Projection	UTM fuseau 29N	UTM fuseau 29N	UTM fuseau 29N	UTM fuseau 29N
Source	USGS	USGS	USGS	USGS

En outre, quatre autres images satellitaires Aster GDEM (Global Digital Elevation Model) ont été utilisées pour couvrir la zone d'étude. Ces images ont été exploitées pour élaborer la carte des altitudes. La cartographie a été effectuée en utilisant le logiciel ArcGis 10.0.

Les données statistiques sont constituées des données climatologiques (températures, pluviométries), et démographiques obtenues auprès de l'antenne de l'Institut National de la Statistique (INS) de Man.

Les données cartographiques sont composées de couches géoréférencées des limites administratives de la Côte d'Ivoire, de la région du Tonkpi, de son réseau routier, hydrographique, végétation et de l'habitat. Elles concernent aussi les coordonnées géographiques des points levés au GPS pour géoréférencer les échantillons relevés sur terrain et la vérification des résultats obtenus par classification des images satellites.

3.2. Méthodes d'évaluation de la dynamique d'occupation des sols dans la région du Tonkpi

La méthode adoptée pour évaluer la dynamique d'occupation des sols a combiné les techniques de traitements d'images satellitaires, les visites et observations de terrain.

Dans le cadre de la cartographie des différentes classes d'occupation du sol de la région du Tonkpi, la classification automatique a été retenue. Les cartes sont élaborées à partir des images satellitaires par traitement numérique.

3.2.1. Prétraitement des images

Le prétraitement d'image a débuté par la correction radiométrique pour réduire les effets perturbateurs de l'atmosphère, qui est particulièrement chargée de nuage de poussière en période de l'harmattan (SONG *et al.*, 2001). Pour finaliser le prétraitement, la fenêtre d'étude centrée sur la région du Tonkpi a été découpée, puis un masque a été appliqué pour extraire l'image de la région du Tonkpi.

3.2.2. Traitement numérique des images

Le traitement numérique proprement dit a commencé par une amélioration d'images en appliquant la composition colorée.

A cette étape, il a été procédé à la production de classes d'occupation du sol non dirigées devant servir de base aux missions de visites de terrain. Les compositions colorées avec les bandes brutes (TM 5-4-3 ETM+ 5-4-3 et OLI 6-5-4) et les néocanaux de l'analyse en composantes principales (ACP1-2-3) réalisées ont permis d'effectuer la discrimination des différents types d'occupation du sol. Il en a été de même pour la sélection des sites à visiter puis, l'orientation sur le terrain, le choix des parcelles d'entraînement pour la classification dirigée, et le choix des parcelles de contrôle pour l'élaboration de la matrice de confusion.

La composition colorée couvrant la totalité de la zone d'étude a été obtenue à partir d'une mosaïque de trois compositions colorées issues de la superposition des canaux de LANDSAT TM (TM3, TM4 et TM5) [des deux scènes TM 198/55 (1990) et 198/55 (2011)], les canaux du capteur ETM+ de LANDSAT (ETM3, ETM4 et ETM5) [de la scène 198/55 (2000)] et ceux du capteur OLI de LANDSAT (OLI4, OLI5 et OLI6) [de la scène 198/55 (2015)].

Toutes les images ont subi une correction atmosphérique, un traitement d'amélioration de contraste afin de parvenir à une composition colorée mettant en évidence la plus grande partie de l'occupation des espaces qui composent l'écosystème de la région.

3.2.3. Visites et observations de terrain

A partir des cartes issues de la composition colorée, une centaine de parcelles ont été identifiées et sélectionnées pour être comparées aux observations de terrain. Ces parcelles provenant de toutes les classes d'occupation du sol sont caractérisées par leur homogénéité et leur taille suffisamment grande pour être reconnues sur le terrain.

Deux sorties sur le terrain ont été effectuées sur deux périodes différentes en janvier 2016 et février 2016. L'objectif de la première sortie est de repérer les échantillons représentatifs des classes d'occupation du sol considérées qui sont sélectionnés sur les images de la composition colorée. Le tableau XXXVI en annexe donne la répartition des points par classe d'occupation du sol. L'intérêt de la deuxième sortie est de valider la carte obtenue par la classification

supervisée à partir des observations de la vérité-terrain (tableau XXXVII). La légende de la classification et les caractéristiques des parcelles d'entraînements sont décrites dans le tableau V ci-après.

Tableau V : Classes d'occupation du sol

Classe	Description
Forêts denses	les forêts naturelles et les plantations forestières
Forêts dégradées	Les forêts dégradées par l'exploitation forestière et l'agriculture
Sols nus	Les espaces où la couverture végétale est absente, aussi les terres labourées
Cultures et Jachères	les surfaces cultivées ayant un couvert végétal peu dense au moment de prise de vue des images satellitaires et les sols laissés au repos
Savanes arborées	Formation végétale dominée par des plantes herbacées parsemée d'arbres
Cours d'eau	Les lacs, les rivières et les fleuves
Habitats	les zones urbanisées et les habitations

Au cours des observations sur le terrain, pour chaque type d'occupation du sol, les types probables d'occupations de sol sur les compositions colorées ont été confirmés. Les informations recueillies sur le terrain, ont également permis de finaliser les traitements numériques.

3.2.4. Classification dirigée

La classification dirigée des images Landsat par la méthode de classification par maximum de vraisemblance a permis de produire des cartes d'occupation du sol de la région du Tonkpi. La validation de la carte de végétation 2015 de la région du Tonkpi a été faite par l'analyse de la matrice de confusion, qui a été élaborée à partir de 200 autres parcelles dites parcelles de contrôle (tableau XXXVII). Il s'agit de parcelles visitées sur le terrain et n'ayant pas servi d'entraînement. Ce traitement a été finalisé par une visite de terrain post classification. Après avoir établi la légende des parcelles d'entraînements, la classification supervisée peut commencer en appliquant l'algorithme du maximum de vraisemblance.

Cette méthode est reprise à l'identique pour la production de carte d'occupation de sol de la région du Tonkpi des années 1990, 2000, et 2011, en utilisant comme réalité de terrain les couches cartographiques de la région du Tonkpi et les données de terrain de 2015.

En effet, les différents types d'occupation des sols identifiés dans la région du Tonkpi en 2015 sont les mêmes que celles qui existaient en 1990, 2000, et 2011. Seule l'occupation spatiale de ces classes ou unités cartographiques marque une différence entre les différentes dates.

Ainsi, les parcelles d'entraînement et de contrôle sélectionnées sur la composition colorée, respectivement pour la classification dirigée et l'élaboration de la matrice de confusion, sont validées par les couches cartographiques d'occupation du sol de la région du Tonkpi des données collectées sur le terrain en 2016. Les cartes d'occupation des sols des années 1990, 2000, 2011 et 2015 de la région du Tonkpi, ont permis une analyse qualitative et quantitative de la dynamique des occupations des sols.

La matrice de confusion et la précision générale ont été évaluées pour tester la validité de la carte à partir des relevés de terrain.

3.2.5. Cartographie des classes d'altitudes

Cette carte, dérivée du MNT, a été réalisée sous Envi (4.7). Pour mieux appréhender la dynamique des occupations de sols en fonction du relief, dans la région du Tonkpi fortement accidenté avec de nombreuses chaînes de montagnes, nous avons intégré l'altitude à notre analyse. L'élaboration de cette carte a commencé par un prétraitement du MNT.

3.2.5.1. Prétraitement du MNT

La zone d'étude est à cheval entre plusieurs scènes d'images ASTER. L'extension Spatial Analyst a permis d'enlever le masque sur les images ASTER. Ensuite, les différentes scènes ont pu être mosaïquées afin d'obtenir une seule couche du MNT. La démarche suivie pour le prétraitement du MNT est synthétisée dans la figure 10.

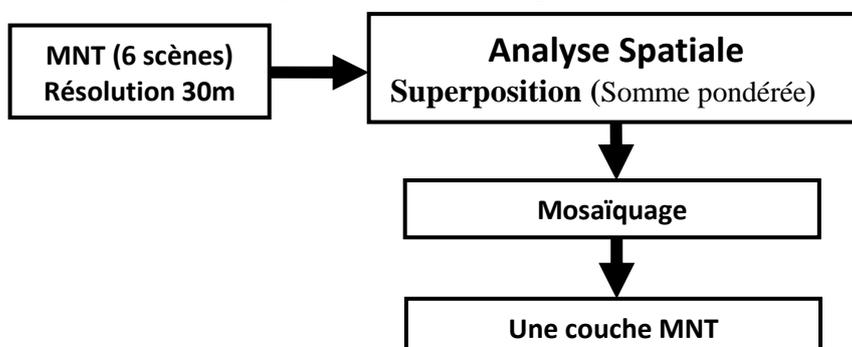


Figure 10 : Méthode de prétraitement du Modèle numérique de Terrain

3.2.5.2. Elaboration de la carte des altitudes

La carte des altitudes de la région du Tonkpi a été produite à partir du traitement du modèle numérique de terrain (MNT) de l'image ASTER et la détermination des classes à partir des travaux de BOYOSSORO *et al.* (2007), puis vectorisée pour calculer la superficie de chaque classe.

Ainsi, il a été possible de distinguer trois différentes classes d'altitude : les basses altitudes comprises entre 160 m et 320 m d'altitude ; les moyennes altitudes comprises entre 320 m et 520 m d'altitude ; et les hautes altitudes comprises entre 520 m et 1320 m d'altitude.

L'approche méthodologique préconisée pour la réalisation des cartes d'occupation du sol est illustrée dans la figure 11.

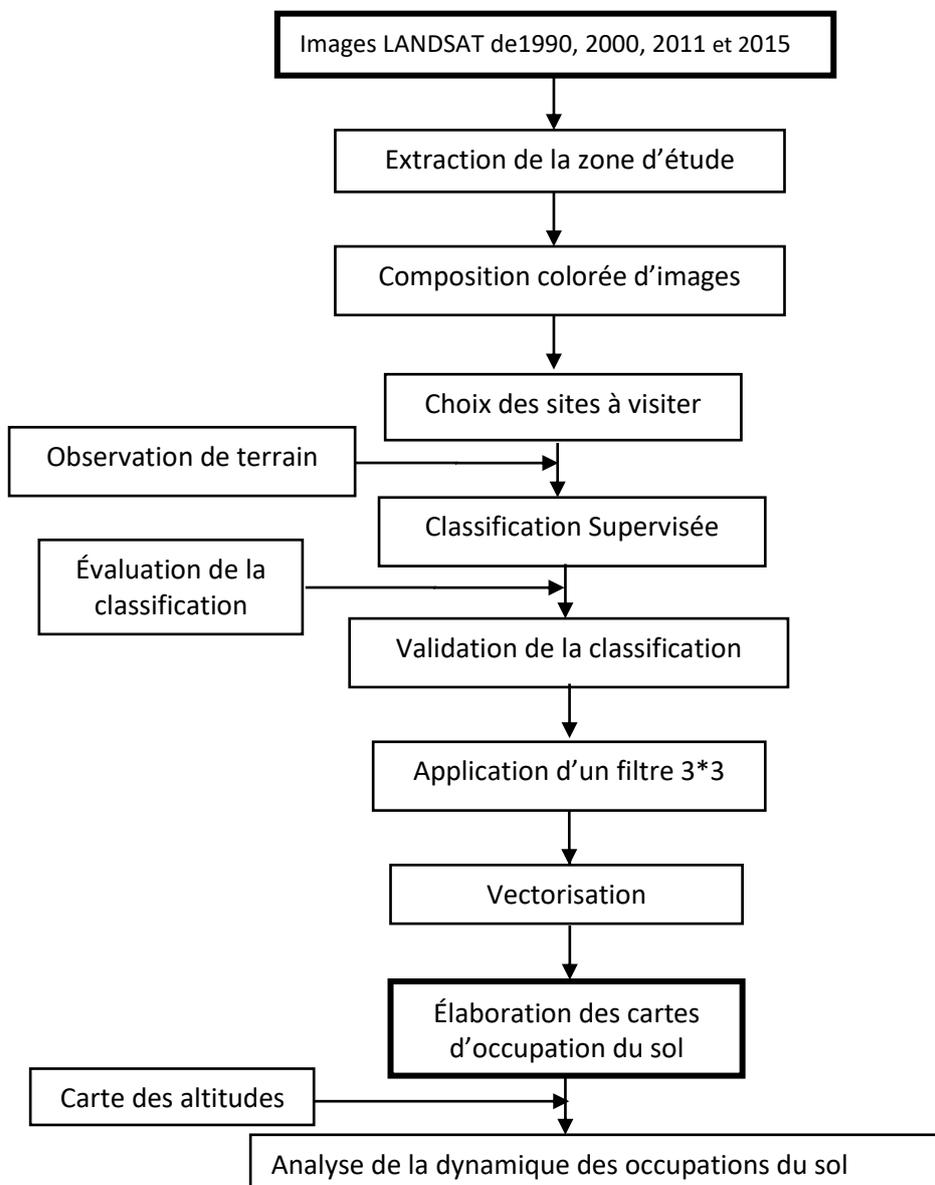


Figure 11 : Schéma méthodologique pour la réalisation des cartes d'occupation du sol

4.1. Résultats de l'évaluation de la dynamique d'occupation des sols

4.1.1. Identification des différentes classes d'occupation du sol

Les résultats de la classification d'images a permis de mettre en évidence cinq types d'occupations du sol, à savoir les forêts denses, les forets dégradées, les cultures et jachères, les cours d'eau et bas-fonds et les terrains nus et habitations.

4.1.1.1. *Les forêts denses*

Elles sont composées de forêts naturelles et de plantations forestières qui sont soit des forêts denses à canopée fermée, soit des forêts denses ouvertes ou des forêts galeries se présentant sous forme de cordons de végétaux de types forestiers (figure 12). Ces forêts denses se rencontrent sur les montagnes et dans les zones de basses altitudes.



Figure 12 : Forêts denses à Man (TIESSE, 2017)

4.1.1.2. *Les forêts dégradées*

Ce sont des formations forestières qui découlent de la dégradation des forêts denses (figure 13). Cette dégradation est provoquée soit par l'exploitation forestière, soit par l'implantation de l'agriculture.

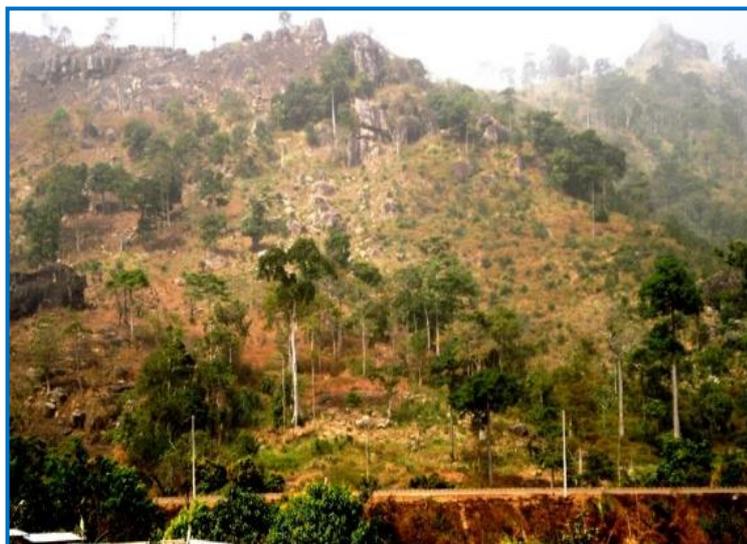


Figure 13 : Forêts dégradées dans la ville de Man (TIESSE, 2017)

4.1.1.3. Les Jachères et cultures

Les zones de jachères observées sont pour la plupart des terres non cultivées pour permettre à celles-ci de se reconstituer. Les jachères (Planche 1) sont constituées de graminées notamment *Panicum maximum* (Poaceae), *Brachiari aruzizensis* (Poaceae) et de *Chromolaena odorata*(Asteraceae). On les retrouve un peu partout dans la région.



Planche 1: Zone de jachère (à gauche) et parcelle de culture (à droite) dans la ville de Man (TIESSE, 2017)

On rencontre les cultures pérennes telles que le cacaoyer (*Theobroma cacao*, Sterculiaceae), le caféier (*Coffea* spp. Rubiaceae) et le palmier à huile (*Elaeis guineensis*, Arecaceae) et des cultures vivrières : le manioc (*Manihot esculenta*, Euphorbiaceae), le maïs

(figure 14) (*Zeamays*, Poaceae), le riz (*Oryza sativa*, Gramineae) et la banane plantain (*Musa acuminata*, Musaceae). On retrouve la plupart de ces cultures sur les flancs des montagnes.

4.1.1.4. *Les Cours d'eau et savane arborée*

Les cours d'eau sont constitués des fleuves Cavally et Sassandra et leurs affluents, les rivières et autres points d'eau stagnants (Planche 2). L'on note également la présence de savane arborée au Nord de Biankouma.



Planche 2 : Cours d'eau et savane arborée à Biankouma (TIESSE *et al.*, 2017)

4.1.1.5. *Les Sols nus et l'habitat*

Les sols nus (Planche 3) sont essentiellement constitués des zones urbanisées, de routes non bitumées et de terrains nus. L'habitat est constitué en partie par des maisons bâties sur les flancs de montagnes.



Planche 3 : Terrain nu et habitat à Man (TIESSE *et al.*, 2017)

4.1.2. Cartographie des différentes classes d'occupation du sol

Cette partie des résultats présente d'une part l'état de l'occupation du sol de chaque année de 1990 à 2015 et d'autre part l'analyse comparée des différentes années prises deux à deux, de 1990 à 2000, de 2000 à 2011 et de 2011 à 2015.

4.1.2.1. Etat de l'occupation du sol en 1990

L'occupation du sol en 1990 est dominée par les cultures et les jachères (figure 14). Les classes se répartissent comme suit :

- les forêts denses occupent une superficie de 163390,26 hectares, soit 14,59% de la superficie totale de la région du Tonkpi ;
- les forêts dégradées couvrent une superficie de 199 514,03 hectares soit environ 17,82% de la surface totale ;
- les cultures et les jachères couvrent la plus grande partie de la région et s'étalent sur une superficie de 620204,98 hectares, soit 55,40% de la région d'étude ;
- les sols nus s'étalent sur une superficie de 15 409,26 hectares, soit 1,38% de la région d'étude ;
- les savanes arborées occupent une superficie de 95 021,75 hectares, soit 8,49% de la superficie totale de la région du Tonkpi ;
- les cours d'eau occupent près de 1 615,88 hectares de terrain soit environ 0,14% de la région d'étude ;
- les habitats couvrent une superficie de 24 368,23 hectares soit environ 2,18% de la surface totale.

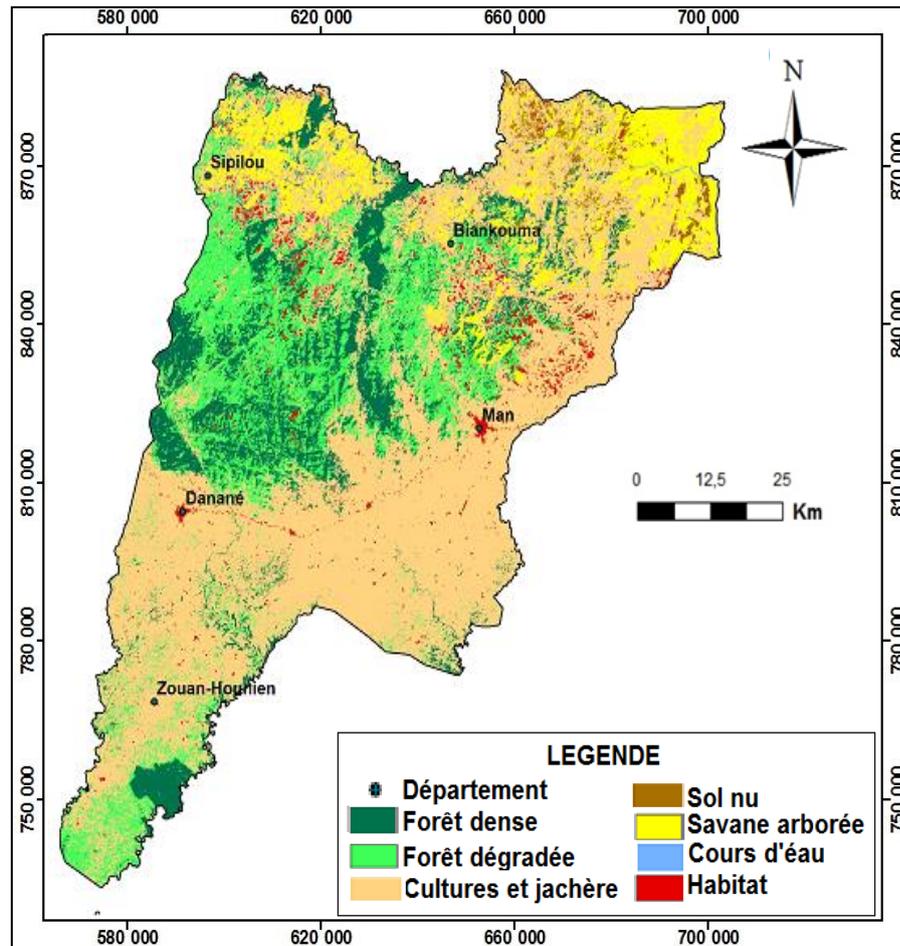


Figure 14 : Carte d'occupation du sol de la région du Tonkpi en 1990

4.1.2.2. Etat de l'occupation du sol en 2000

L'état de l'occupation du sol en 2000 (figure 16) montre une distribution relativement identique de celle de 1990, c'est-à-dire une dominance de la classe «cultures et jachères» avec des variations de superficies. La répartition des classes se présente comme suit :

- les forêts denses couvrent une superficie de 134 524,65 hectares de superficie estimée à 12,02% de la superficie totale ;
- les forêts dégradées s'étendent sur 193 107,82 hectares soit 17,25% de la totalité ;
- les cultures et les jachères dominent la répartition avec 623 988,94 hectares, soit 55,74% de la région d'étude ;
- les sols nus s'étalent sur une superficie de 23 202,83 hectares et représentent 2,07% de la région du Tonkpi ;

- les savanes arborées occupent une superficie de 115 255,67 hectares, soit 10,30% de la superficie totale de la région du Tonkpi ;
- les cours d'eau occupent près de 1 615,88 hectares de terrain soit environ 0,14% de la région d'étude ;
- les habitats couvrent une superficie de 27 828,61 hectares soit environ 2,49% de la surface totale.

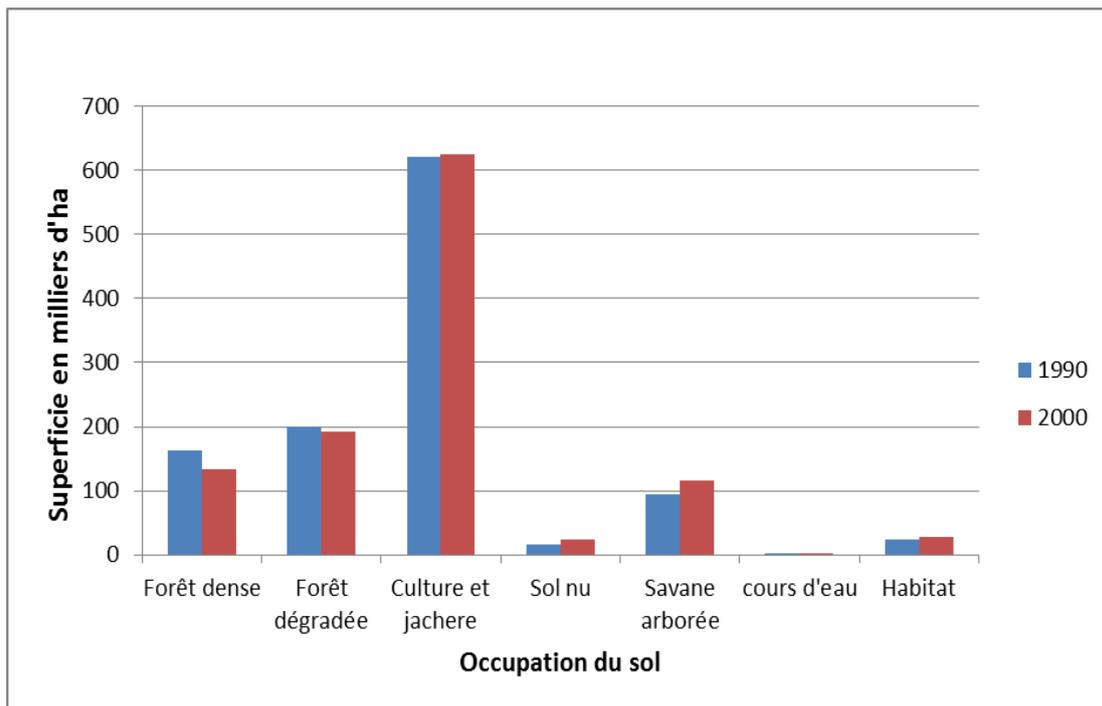


Figure 15 : Répartition des différents types d'occupation du sol en 1990 et 2000

L'analyse comparée de l'occupation du sol de 1990 à 2000 (figure 15) met en évidence la dominance des classes «cultures et jachères» et «Forêts dégradées » par rapport aux autres classes d'occupation du sol. Sur cette période, les forêts denses et les forêts dégradées ont subi une régression avec des pertes respectives de près de 29 000 ha et 6500 ha. La vitesse de disparition des forêts denses est le quadruple de celle des forêts dégradées.

Les autres classes d'occupation du sol, telles que les cultures et les jachères, les sols nus, les savanes arborées et les habitats ont par contre connu une augmentation.

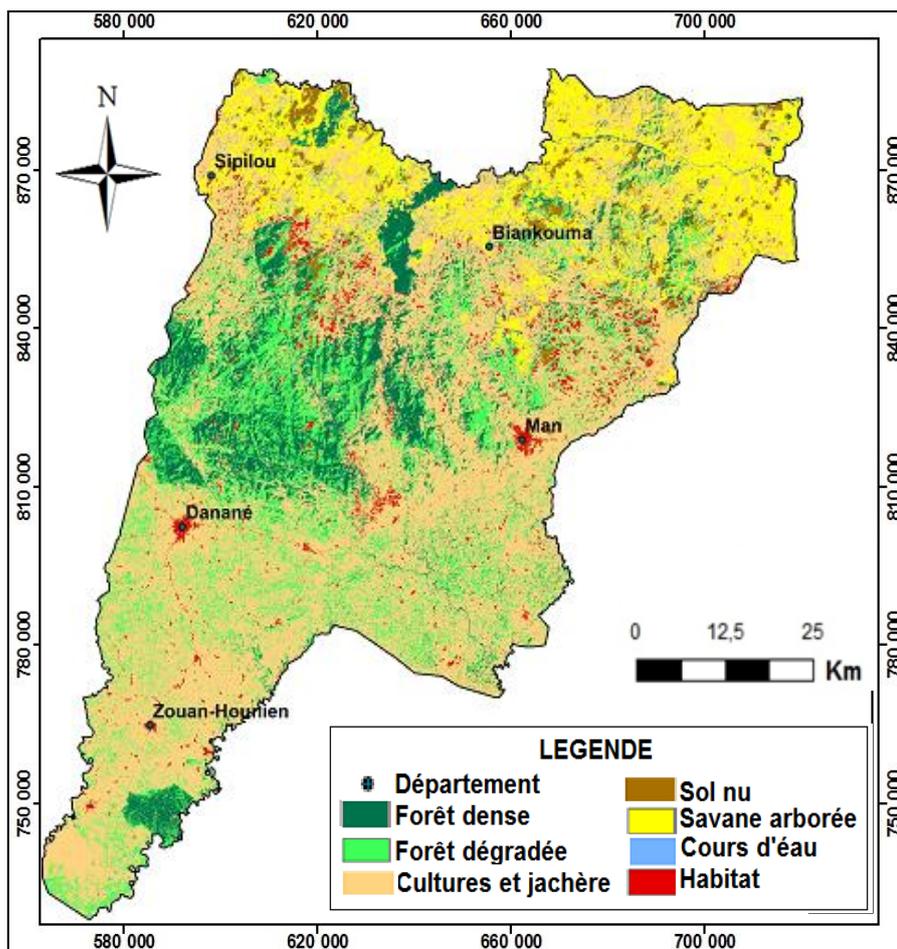


Figure 16 : Carte d'occupation du sol de la région du Tonkpi en 2000

4.1.2.3. Etat de l'occupation du sol en 2011

L'occupation du sol en 2011 est dominée par les cultures et les jachères (figure 18). Les classes se répartissent comme suit :

- les forêts denses occupent une superficie de 105 313,36 hectares, soit 9,41% de la superficie totale de la région du Tonkpi ;
- les forêts dégradées couvrent une superficie de 211 229,48 hectares soit environ 18,87% de la surface totale ;
- les cultures et les jachères couvrent la plus grande partie de la région et s'étalent sur une superficie de 630 725,34 hectares, soit 56,34% de la région d'étude ;
- les sols nus s'étalent sur une superficie de 19 659,00 hectares, soit 1,76% de la région d'étude ;

- les savanes arborées occupent une superficie de 122 842,74 hectares, soit 10,97% de la superficie totale de la région du Tonkpi ;
- les cours d'eau occupent près de 1 615,96 hectares de terrain soit environ 0,14% de la région d'étude ;
- les habitats couvrent une superficie de 28 138,52 hectares soit environ 2,51% de la surface totale.

L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol de 2000 à 2011 (figure 17) met en évidence la dominance des classes «culture et jachère» et «forêt dégradée » par rapport aux autres classes d'occupation du sol. Dans cette période, les forêts denses et les sols nus ont connu une diminution avec des pertes respectives de près de 29 000 ha et 3500 ha. La surface occupée par les cours d'eau est restée quasi-constante.

Les autres classes d'occupation du sol, telles que les cultures et les jachères, les forêts dégradées, les savanes arborées et les habitats ont par contre subi une hausse. Les accroissements de surface sont diverses, ils sont respectivement de 18 000 ha, 7 500 ha et 300 ha.

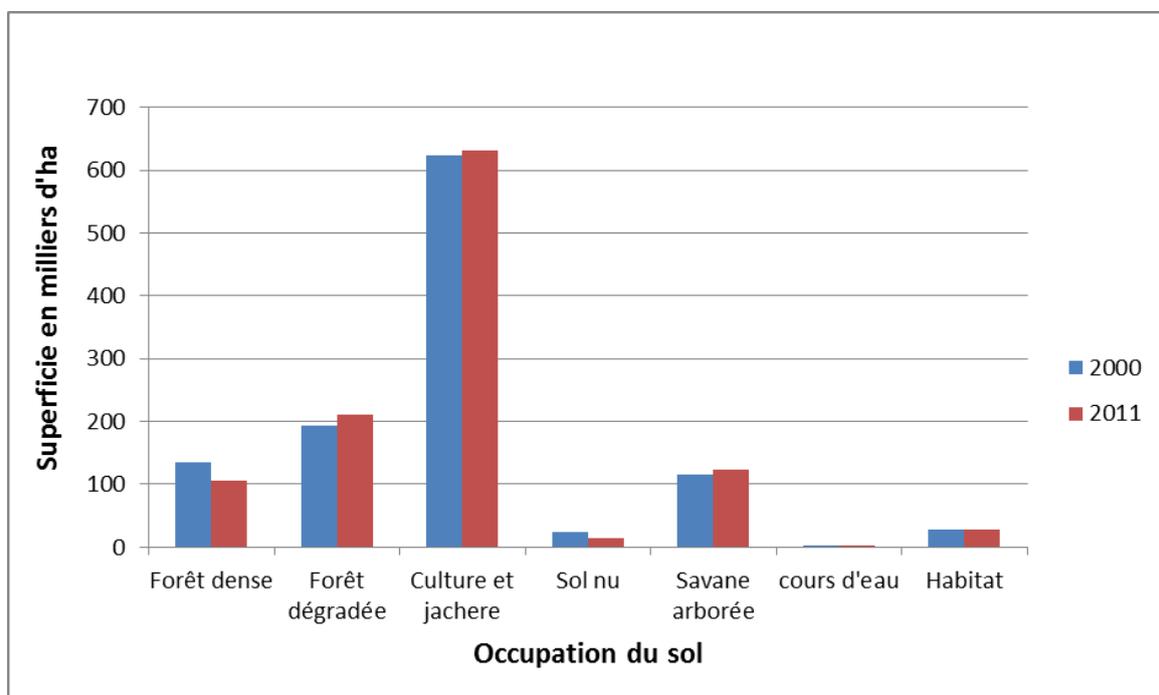


Figure 17 : Répartition des différents types d'occupation du sol en 2000 et 2011

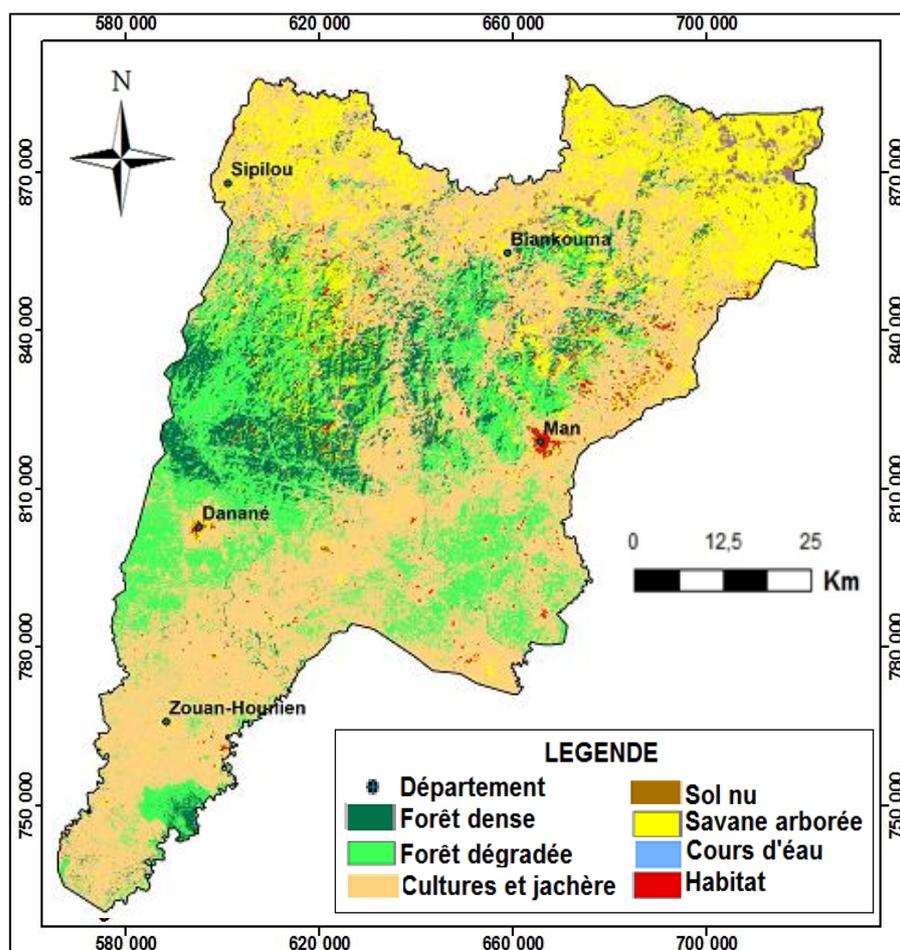


Figure 18: Carte d'occupation du sol de la région du Tonkpi en 2011

4.1.2.4. Etat de l'occupation du sol en 2015

L'état de l'occupation du sol en 2015 (figure 20) montre une distribution relativement identique de celle de 2000, c'est-à-dire une dominance de la classe «cultures et jachères» avec des variations de superficies. La répartition des classes se présente comme suit :

- les forêts denses couvrent une superficie de 87 210,27 hectares de superficie estimée à 7,79% de la superficie totale ;
- les forêts dégradées s'étendent sur 205 145,67 hectares soit 18,32% de la totalité ;
- les cultures et les jachères dominent la répartition avec 649 991,37 hectares, soit 58,06% de la région d'étude ;
- les sols nus s'étalent sur une superficie de 23 896,06 hectares et représentent 2,13% de la région du Tonkpi ;

- les savanes arborées occupent une superficie de 123 115,57 hectares, soit 11,00% de la superficie totale de la région du Tonkpi ;
- les cours d'eau occupent près de 1 615,98 hectares de terrain soit environ 0,14% de la région d'étude ;
- les habitats couvrent une superficie de 28 549,47 hectares soit environ 2,55% de la surface totale.

L'analyse de la variation de l'occupation du sol de 2011 à 2015 (figure 19) met en évidence la dominance des classes «culture et jachère» et «forêt dégradée » par rapport aux autres classes d'occupation du sol. Au cours de cette période, les surfaces occupées par les forêts denses et les forêts dégradées ont connu une baisse avec des réductions respectives de près de 18 000 ha et 6 000 ha. La surface occupée par les cours d'eau est restée quasi-constante.

Les autres classes d'occupation du sol, telles que les cultures et les jachères, les sols nus, les savanes arborées et les habitats ont en revanche augmenté. Les hausses de superficie sont diverses, elles sont respectivement de 19 000 ha, 4 200 ha, 200 ha et 400 ha.

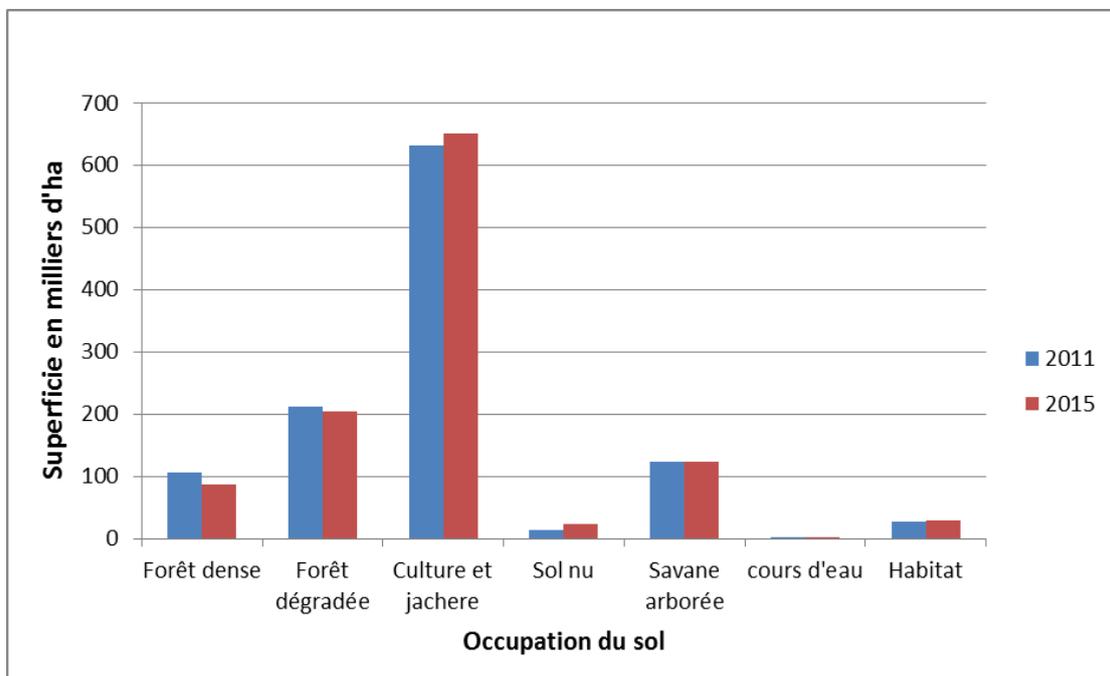


Figure 19: Répartition des différents types d'occupation du sol en 2011 et 2015

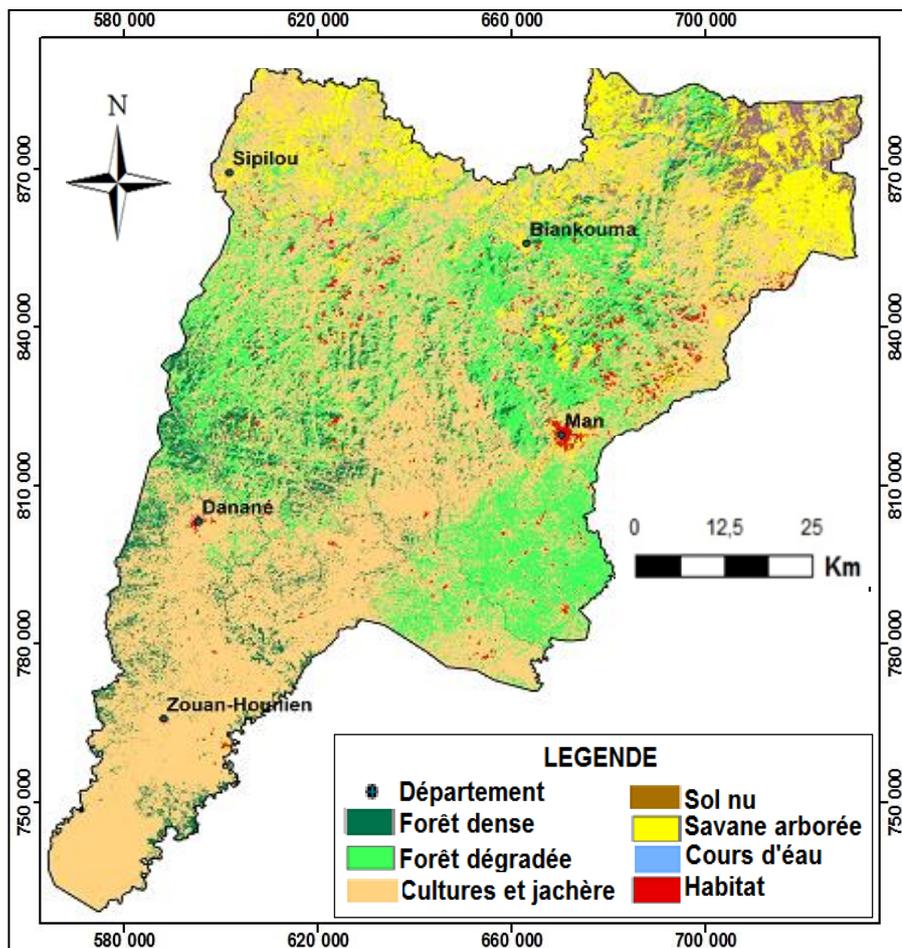


Figure 20: Carte d'occupation du sol de la région du Tonkpi en 2015

4.1.3. Qualité de la classification supervisée des cartes d'occupation du sol

Les différentes classifications ont été évaluées par la matrice de confusion à travers le calcul de la précision globale de classification et du coefficient de Kappa. Les tableaux VI, VII, VIII et IX indiquent que les précisions globales de classifications sont comprises entre 86,34% et 94,98%. Ces tableaux affichent dans la diagonale le pourcentage de pixels bien classés et hors diagonale le pourcentage de pixels mal classés.

L'évaluation de la précision de la classification de l'image de 1990 est donnée par la matrice de confusion (Tableau VI).

Une analyse plus fine du tableau VII montre que la classe forêts dégradées présente des confusions avec la classe cultures et jachères. On observe également une confusion entre les forêts denses et les cours d'eau. En d'autres termes :

- 17,28% des forêts dégradées ont été confondues aux cultures et jachères;
- 19,22% des forêts dégradées ont été confondus aux forêts denses.

Quant à l'image de 2011, le tableau VIII, nous renseigne sur sa matrice de confusion. La précision globale est 86,34%.

Tableau VIII : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat TM de 2011

Signatures Spectrales	Classes thématiques						
	Forêts denses	Forêts dégradées	Cultures et Jachère	Sol nu	Savane arborée	Cours d'eau	Habitat
Forêts denses	95,9	9,22	0,37	0	0	0	0
Forêts dégradées	4,1	90,78	10,43	0	0	0	0
Cultures et Jachère	0	0	74,84	0	0	0	1,68
Sol nu	0	0	0	97,13	3,93	15,96	0
Savane arborée	0	0	14,36	2,87	96,07	3,24	30,32
Cours d'eau	0	0	0	0	0	80,8	0
Habitat	0	0	0	0	0	0	68
Total Classe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Précision Globale = 86,34%			Coefficient de Kappa = 0,8351				

L'analyse de ce tableau montre que des confusions se sont produites d'une part entre les cultures et jachères et forêts dégradées (10,43%), entre les sols nus et les cours d'eau (15,96%). Une confusion importante s'est produite entre les savanes arborées et les habitats.

Pour l'image de 2015, la matrice de confusion consignée dans le tableau VIII, a permis d'évaluer la précision de sa classification dirigée qui est de 93,46%.

L'analyse de ce tableau montre que des confusions se sont produites d'une part entre les forêts dégradées et les cultures et jachères (16,3%), entre les habitats et les cultures et jachères

(4,61%). Une confusion importante s'est produite entre les habitats et les savanes arborées (11,22%).

Tableau IX : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat de 2015

Signatures Spectrales	Classes thématiques						
	Forêts denses	Forêts dégradées	Cultures et Jachère	Sol nu	Savane arborée	Cours d'eau	Habitat
Forêts denses	94,17	2,77	0	0	0	0	0
Forêts dégradées	1,19	80,92	1,69	0	0	0	0
Cultures et Jachère	4,64	16,3	98,31	0	0	0	4,61
Sol nu	0	0	0	92,3	0	0,45	0
Savane arborée	0	0	0	7,7	100	0,15	11,22
Cours d'eau	0	0	0	0	0	99,4	0
Habitat	0	0	0	0	0	0	84,16
Total Classe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Précision Globale = 93,46% Coefficient de Kappa = 0,9214

Le tableau X fait la synthèse de l'évaluation des différentes classifications dirigées.

Tableau X : Synthèse de l'évaluation des classifications dirigées

	1990	2000	2011	2015
Précision globale (%)	94,98%	91,64%	86,34%	93,46%
Coefficient de Kappa	0,9388	0,9003	0,8351	0,9214

Les matrices de confusions des classifications dirigées indiquent que les coefficients de kappa des classifications sont compris entre 0,83 et 0,93 (Tableau X). Ces valeurs de coefficients de kappa étant situées dans l'intervalle de 0,81 à 1, elles sont dites excellentes et traduisent un accord presque parfait entre les résultats de la classification et la réalité du terrain (LANDIS et KOCH, 1977). La variation de la précision globale s'explique par les différentes erreurs de confusion entre les classes dans la classification des images satellitaires de chaque année.

4.1.4. Dynamique spatiale de l'occupation du sol entre 1990 et 2015

L'étude diachronique de l'occupation du sol de 1990 à 2015 révèle une modification de l'espace naturel avec un accroissement (4,80%) des cultures et jachères, avec une hausse de 29 786 ha et une extension des sols nus et des savanes arborées, estimée à une augmentation respective de 8 486 ha et 28 093 ha (tableau XIII).

Au cours de cette même période, les surfaces occupées par les habitats ont également connu une augmentation avec un accroissement de près de 4 100 ha.

Par contre, les surfaces des forêts denses ont subi une diminution au profit des cultures et jachères, des savanes arborées, des sols nus, des forêts dégradées et des habitats. Cette disparition des forêts denses s'évalue à 76 180 ha, avec perte annuelle moyenne de 3 047 ha. Les surfaces occupées par les cours d'eau n'ont pas subi de changement notable (Tableau XI).

Tableau XI : Evolution de l'occupation du sol en fonction du temps

Classes d'occupation du sol	Superficies des classes (ha)				% de variation (1990-2015)	Variation de superficie (1990-2015)
	1990	2000	2011	2015		
Forêt dense	163 390,26	134 524,65	105 313,36	87 210,27	-46,62%	-76179,99
Forêt dégradée	199 514,03	193 107,82	211 229,48	205145,67	2,82%	5 631,64
Culture et jachère	620 204,98	623 988,94	630 725,34	649991,37	4,80%	29 786,39
Sol nu	15 409,26	23 202,83	19 659,00	23 896,06	55,08%	8 486,80
Savane arborée	95 021,75	115 255,67	122 842,74	123115,57	29,57%	28 093,83
cours d'eau	1 615,88	1 615,88	1 615,96	1 615,98	0,01%	0,10
Habitat	24 368,23	27 828,61	28 138,52	28 549,47	17,16%	4 181,24

La figure 21 permet de mettre en évidence la distribution spatiale des différentes classes d'occupations des sols de 1990 à 2015, sur toute la région du Tonkpi.

En 1990, les forêts denses étaient bien visibles, avec des massifs forestiers denses au Nord-Ouest de la région du Tonkpi, dans les départements de Danané, au Sud de Sipilou et Zouan-Hounien et à l'ouest de Biankouma. Cependant, à partir de 2000, les massifs forestiers vont progressivement disparaître pour n'être réduits qu'à des îlots forestiers disséminés et être remplacés par des forêts dégradées. Les surfaces occupées par les savanes arborées, situées au Nord de Sipilou ont subi une extension pour se propager dans la partie Nord de la région du Tonkpi.

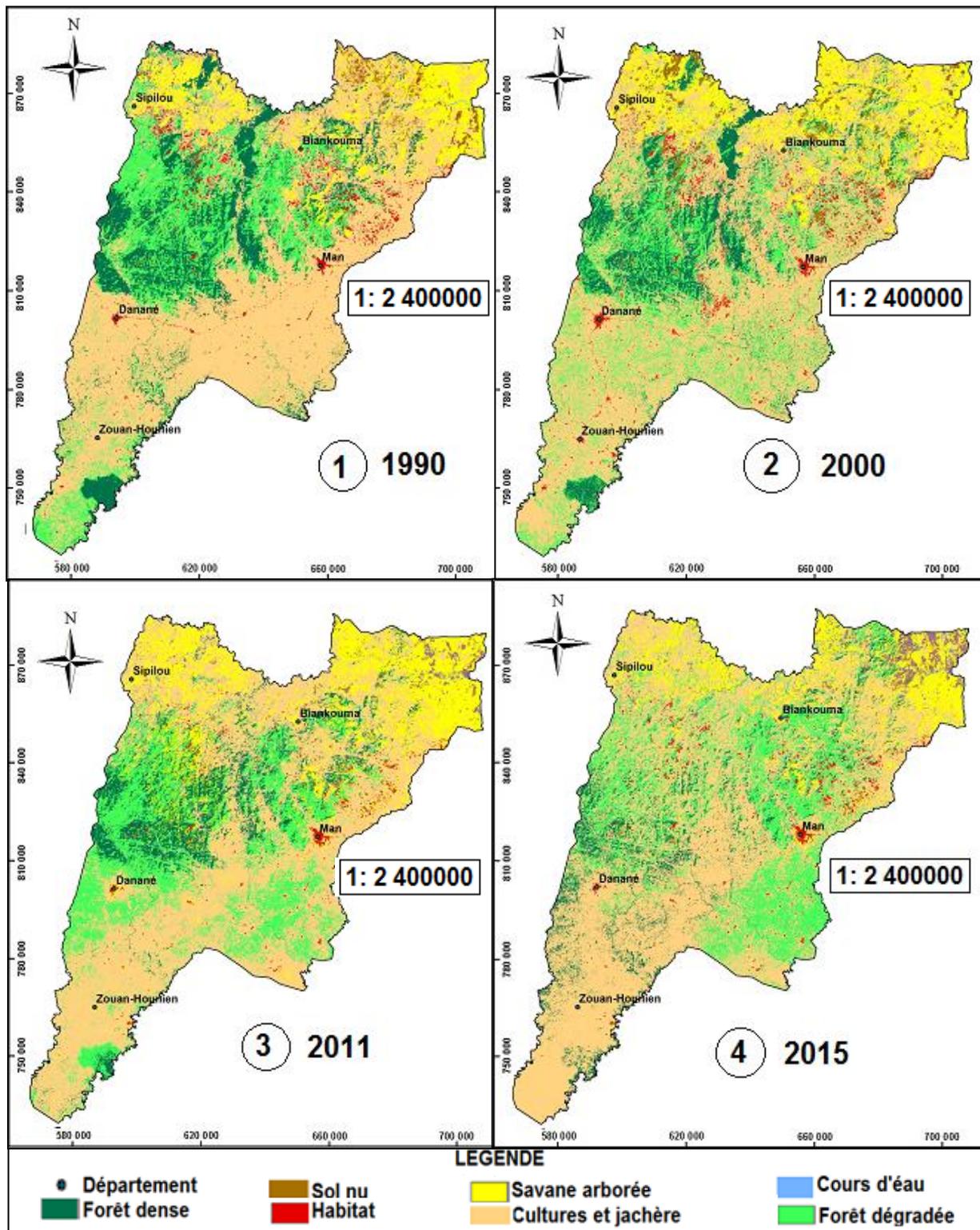


Figure 21 : Evolution de l'occupation du sol dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015, 1 : 1990, 2 : 2000, 3 : 2011, 4 : 2015

4.1.5. Dynamique spatiale de l'occupation du sol en fonction des altitudes

Dans la région du Tonkpi, les basses altitudes (situées entre 160 m et 320 m d'altitude par rapport au niveau de référence de la mer) sont localisées en majorité au Sud et dans des zones disséminées à l'Est, comme le montre la figure 23. Elle couvre une superficie de 3 101 km², soit 27,7% de la superficie totale de la région (tableau XII).

Les zones de moyennes d'altitudes (320 m - 520 m) se concentrent essentiellement au Centre et au Nord de la zone d'étude. Elles couvrent 3 873 km² et représentent 34,6% de la superficie de la région du Tonkpi.

Enfin, la classe des hautes altitudes (520 m - 1320 m) qui occupent la majorité de la région (37,7%) avec 4 221 km² se rencontrent dans toute la partie Nord de la région du Tonkpi.

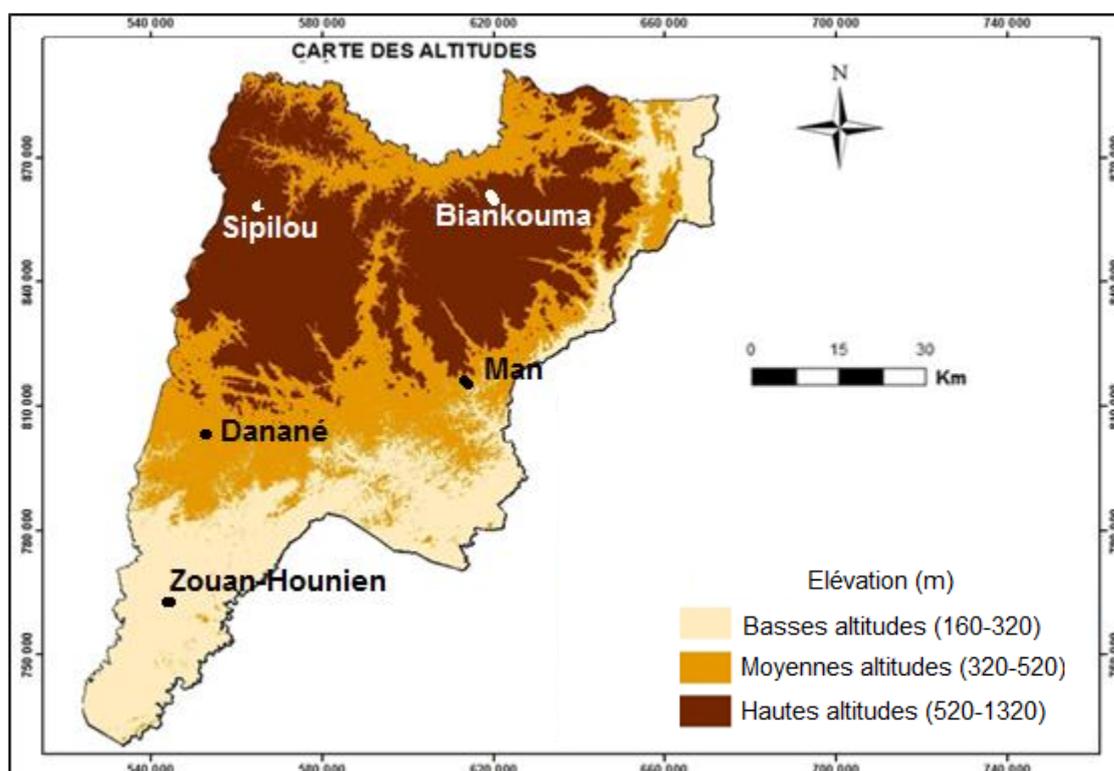


Figure 22 : Carte des classes d'altitude de la région du Tonkpi (BOYOSSORO *et al.* 2007)

Tableau XII : Superficies des classes d'altitude de la région du Tonkpi

Classe des altitudes	Altitudes (m)	Superficies (Km ²)	Pourcentage (%)
Basses altitudes (BA)	160 - 320	3 101	27,7
Moyennes altitudes (MA)	320 - 520	3 873	34,6
Hautes altitudes (HA)	520 - 1 320	4 221	37,7
Totaux		11 195	100

4.1.5.1. Evolution de l'occupation du sol en basses altitudes

Le graphique de l'évolution de l'occupation du sol en basses altitudes (figure 23) met en évidence une augmentation très importante des cultures et jachères de 1990 à 2015. En effet, leur superficie a subi une hausse en passant de près de 226 932 ha à environ 269 157 ha. Ces zones sont essentiellement localisées au Sud et Sud-Est de la région d'étude, dans les départements de Zouan-Hounien et Man (Figure 24). Les savanes arborées situées particulièrement au Nord-Est de la région, dans le département de Biankouma. Elles ont subi un accroissement de leurs superficies sur la même période, en passant de près de 26 890 29 ha à 39 252 ha (tableau XIII).

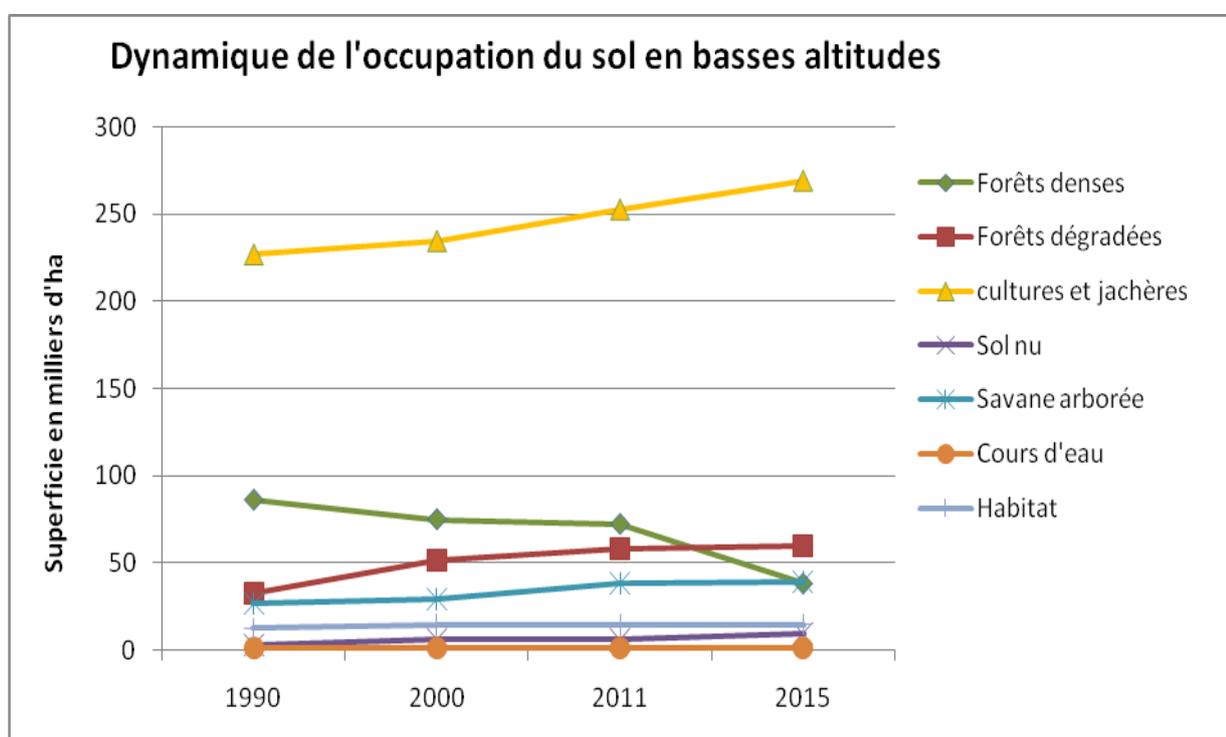


Figure 23 : Dynamique de l'occupation du sol en basses altitudes

La courbe de l'évolution des forêts denses présente une allure générale baissière (figure 23). En effet, d'une superficie 86 543 ha en 1990, les forêts denses sont passées à 38 210 ha en 2015, soit une diminution de 55,32% (tableau XIII).

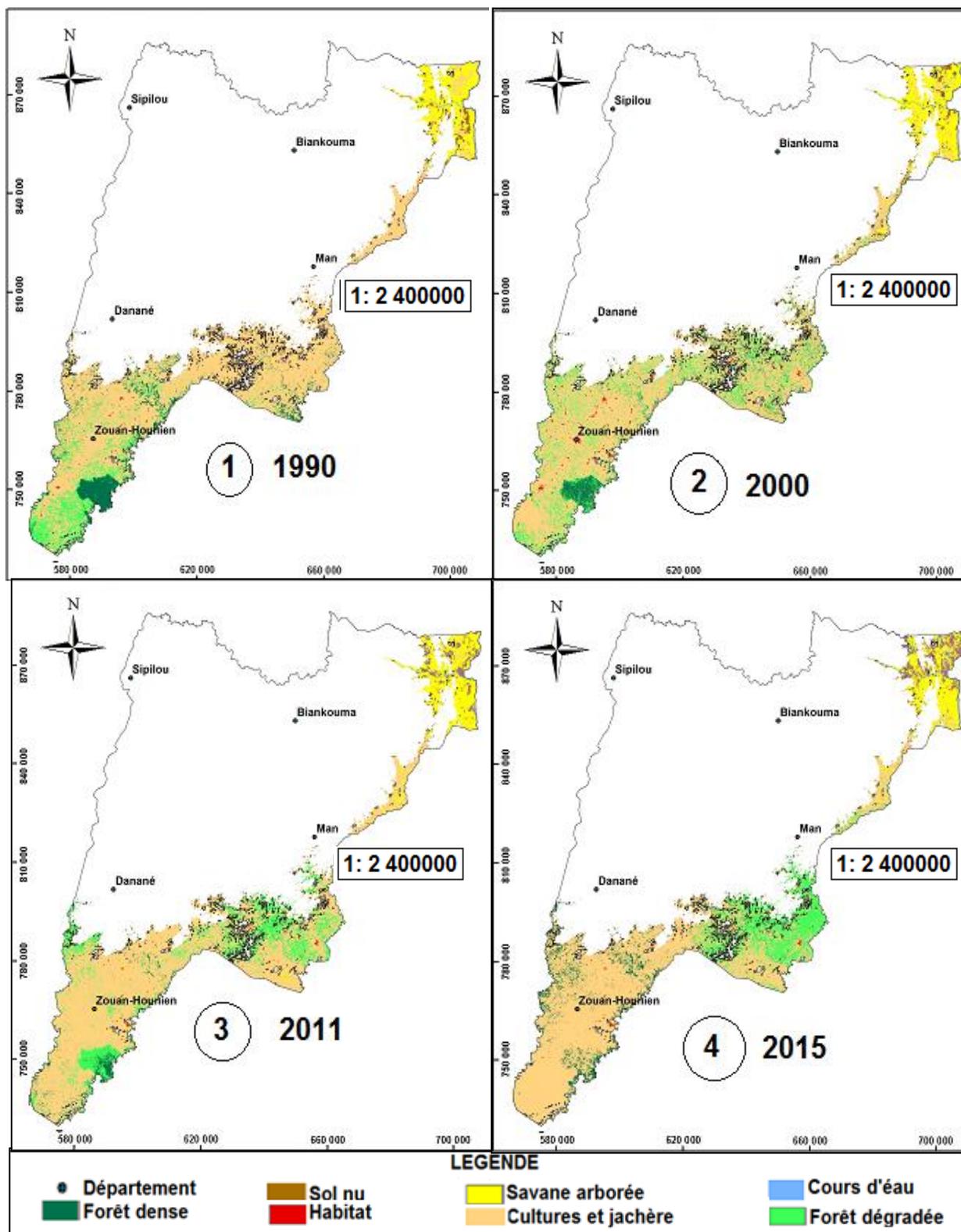


Figure 24 : Dynamique des occupations du sol en basses altitudes de 1990 à 2015, 1 : 1990, 2 : 2000, 3 : 2011, 4 : 2015

4.1.5.2. Evolution de l'occupation du sol en moyennes altitudes

L'occupation du sol en moyennes altitudes, comme le montre la figure 26 est dominée par les cultures et jachères situées au centre de la région du Tonkpi (figure 25). Ces dernières ont subi deux phases dans leur dynamique spatio-temporelle de 1990 à 2015. Dans la première phase, les surfaces emblavées par les cultures et jachères ont subi une décroissance continue, en passant de 293 855 ha en 1990 à 233 477 ha en 2011. De 2011 à 2015, les cultures et jachères ont connu un accroissement relativement rapide, en avoisinant leur superficie initiale (290 754 ha).

Les forêts dégradées ont également subi une dynamique en deux phases dans les mêmes périodes. Cependant, leur allure est totalement différente de celle des cultures et jachères.

Par ailleurs, les surfaces occupées par les habitats ont subi une croissance continue de 1990 à 2015, en passant de 9 680 ha à 11 899 ha. En outre, les superficies des savanes arborées suivent une tendance générale croissante. Elles se répartissent dans le Nord de la région du Tonkpi, dans les départements de Sipilou et Biankouma.

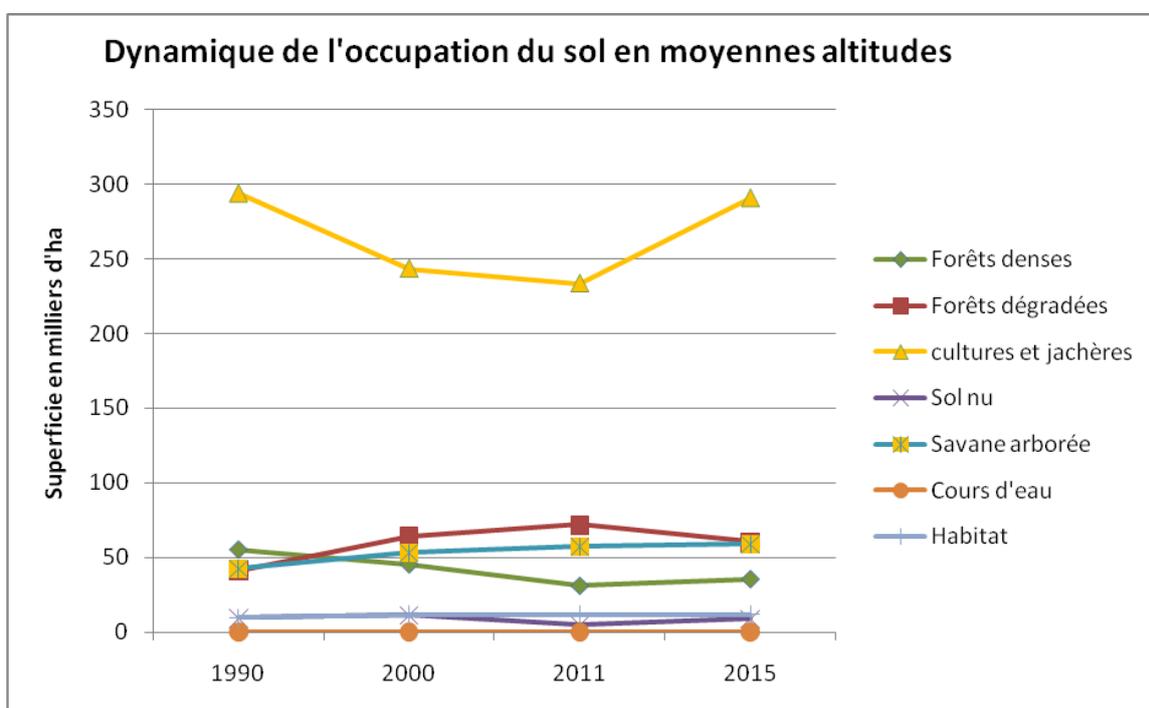


Figure 25 : Dynamique de l'occupation du sol en moyennes altitudes

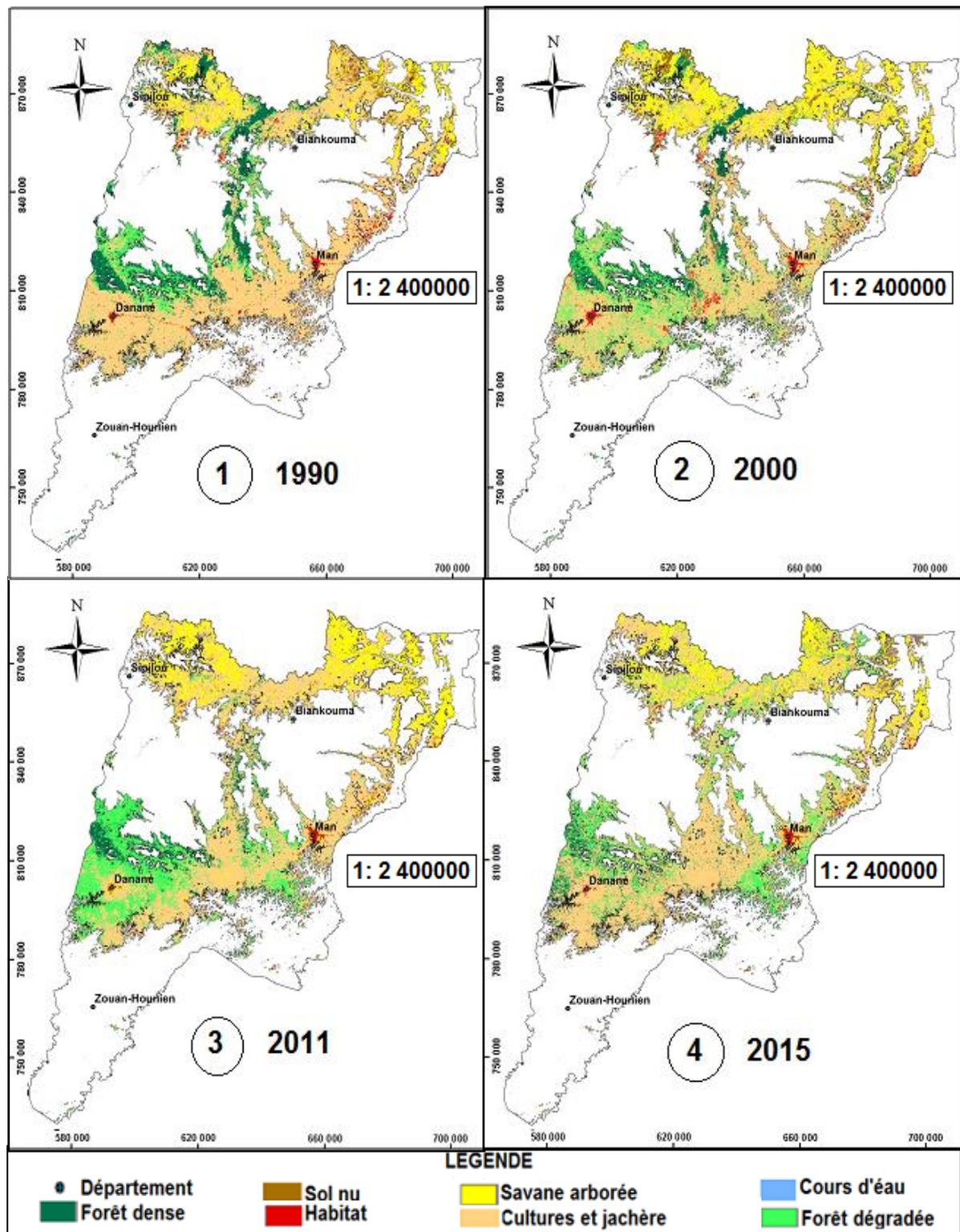


Figure 26 : Dynamique de l'occupation du sol en moyennes altitudes de 1990 à 2015, 1 : 1990, 2 : 2000, 3 : 2011, 4 : 2015

4.1.5.3. Evolution de l'occupation du sol en hautes altitudes

Comme le montre la figure 27, la dynamique de l'occupation du sol en hautes altitudes est une forte tendance baissière des forêts dégradées de 1990 à 2000, en passant de 125 811 ha à 77 462 ha. Cependant, de 2000 à 2015, elles subissent une légère augmentation qui les a limitées à 84 895 ha. Les forêts dégradées se localisent au centre de la région du Tonkpi, au sud du département de Sipilou et au Nord de Danané (figure 28).

Les superficies des habitats sont très faibles en hautes altitudes. De 1990 à 2000, elles ont subi une baisse, en passant de 1 902 ha à 1 591 ha. A partir de 2000, les surfaces des habitats se sont légèrement accrues.

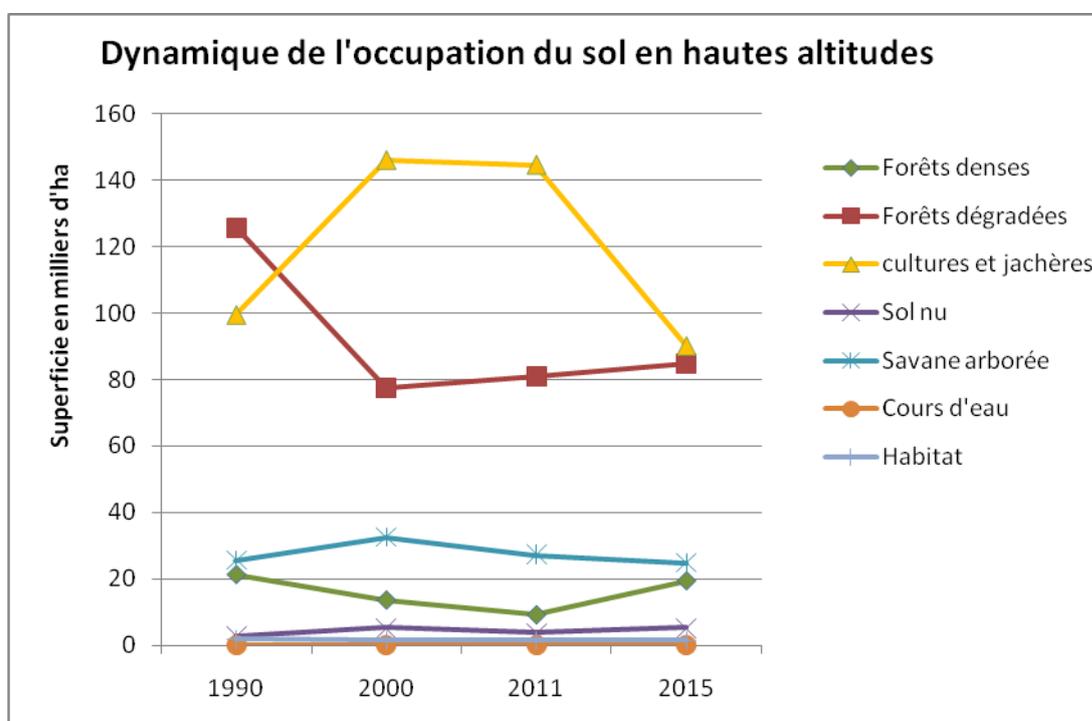


Figure 27 : Dynamique de l'occupation du sol en hautes altitudes

En dehors de la période de 1990 à 2000, les surfaces emblavées par les cultures et jachères ont fortement baissé, de 145 988 ha à 90 079 ha, 2000 à 2015. Les savanes arborées ont subi la même dynamique spatio-temporelle, et ont baissé 32 000 ha en 2000, à près de 25 000 ha en 2015.

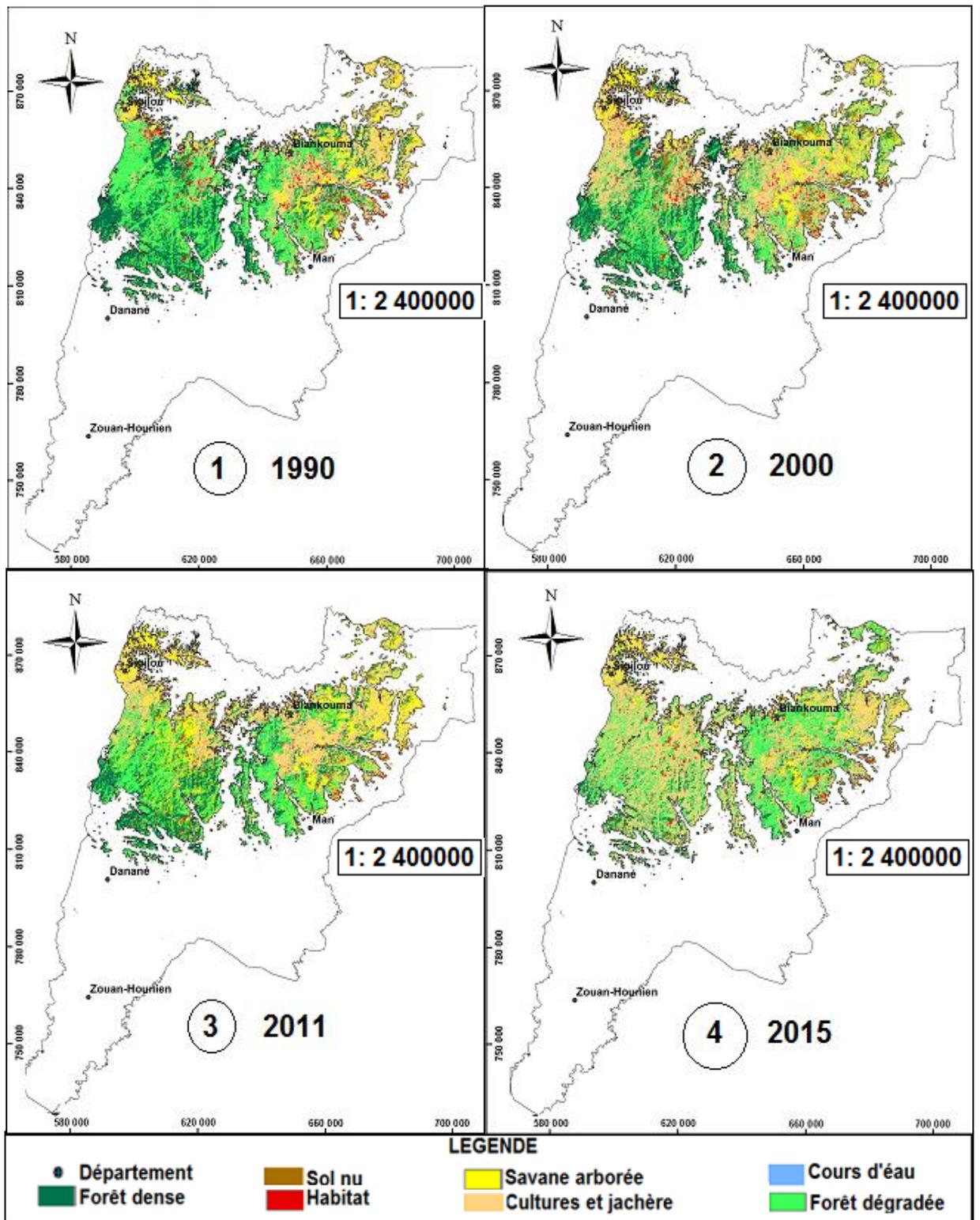


Figure 28 : Dynamique des occupations du sol en hautes altitudes de 1990 à 2015, 1 : 1990, 2 : 2000, 3 : 2011, 4 : 2015

4.1.6. Dynamique spatio-temporelle au sein d'une classe d'occupation du sol en fonction de l'altitude

Tableau XIII : Evolution d'une classe d'occupation du sol en fonction de l'altitude

Classes d'occupation du sol	Superficies des classes (ha)				% de variation (1990-2015)
	1990	2000	2011	2015	
Forêts denses	163 390,26	134 524,65	105 313,36	87 210,27	-46,62%
<i>Basses altitudes</i>	86 543,19	75 396,78	72 698,07	38 671,11	-55,32%
<i>Moyennes altitudes</i>	55 516,77	45 493,56	31 012,77	35 525,97	-36,01%
<i>Hautes altitudes</i>	21 330,30	13 634,31	9 180,75	19 440,72	-8,86%
Forêts dégradées	199 514,03	193 107,82	211 229,48	205 145,67	2,82%
<i>Basses altitudes</i>	32 519,25	51 445,80	58 181,81	59 877,42	84,13%
<i>Moyennes altitudes</i>	41 182,79	64 199,56	71 956,74	60 372,35	46,60%
<i>Hautes altitudes</i>	125 811,99	77 462,46	81 090,93	84 895,90	-32,52%
cultures et jachères	620 204,98	623 988,94	630 725,34	649 991,37	4,80%
<i>Basses altitudes</i>	226 932,52	234 595,84	252 670,98	269 157,42	18,61%
<i>Moyennes altitudes</i>	293 855,94	243 405,00	233 477,48	290 754,74	-1,06%
<i>Hautes altitudes</i>	99 416,52	145 988,10	144 576,88	90 079,21	-9,39%
Sol nu	15 409,26	23 202,83	14 659,00	23 896,06	55,08%
<i>Basses altitudes</i>	3 187,53	6 628,65	5 940,36	9 420,01	195,53%
<i>Moyennes altitudes</i>	9 327,78	11 332,26	4 831,00	9 125,91	-2,16%
<i>Hautes altitudes</i>	2 893,95	5 241,92	3 887,64	5 350,14	84,87%
Savane arborée	95 021,75	115 255,67	122 842,74	123 115,57	29,57%
<i>Basses altitudes</i>	26 890,67	29 263,59	38 039,58	39 252,49	45,97%
<i>Moyennes altitudes</i>	42 487,38	53 395,43	57 421,97	58 956,12	38,76%
<i>Hautes altitudes</i>	25 643,70	32 596,65	27 381,19	24 906,96	-2,87%
Cours d'eau	1 615,88	1 615,88	1 615,96	1 615,98	0,01%
<i>Basses altitudes</i>	1 371,74	1 371,74	1 371,82	1 371,84	0,01%
<i>Moyennes altitudes</i>	139,14	139,14	139,14	139,14	0,00%
<i>Hautes altitudes</i>	105,00	105,00	105,00	105,00	0,00%
Habitat	24 368,23	27 828,61	28 138,52	28 549,47	17,16%
<i>Basses altitudes</i>	12 785,58	14 569,95	14 732,21	14 947,37	16,91%
<i>Moyennes altitudes</i>	9 680,41	11 666,82	11 782,33	11 899,21	22,92%
<i>Hautes altitudes</i>	1 902,24	1 591,84	1 623,98	1 702,89	-10,48%

Le tableau XIII montre que les forêts denses en général, ont subi une réduction de 46,62% de leurs superficies entre 1990 et 2015, ce qui équivaut à une perte de plus de 76 179 ha. Cette

tendance baissière est observée au niveau de toutes les classes d'altitudes et est plus marquée au niveau des basses altitudes avec des pertes (38 671 ha) qui avoisinent la moitié des superficies.

Concernant les forêts dégradées, leurs superficies évoluent en dent de scie sur la période de 1990 à 2015, cependant la tendance générale est marquée par une augmentation des superficies de plus de 2,82% soit 5 631 ha. Cette augmentation est plus marquée au niveau des basses et moyennes altitudes avec une hausse totale de près de 46 547 ha. Par contre, cette dynamique n'est pas constatée au niveau des hautes altitudes où l'on observe une diminution des surfaces de près de 32,52%, soit environ 40 916 ha.

Les superficies emblavées en cultures et les jachères connaissent en général, un accroissement continu de 1990 à 2015. Cette hausse des superficies s'estime à 4,80%, soit plus de 29 786 ha de gain. Cette augmentation générale des superficies des cultures et jachères s'explique exclusivement par l'accroissement au niveau des basses altitudes, où il a eu une hausse de 18,61%, équivalant à un gain de 42 224 ha. En revanche, dans les moyennes et hautes altitudes, les surfaces occupées par les cultures et jachères ont subi une décroissance respective de 1,06% et 9,39%, correspondant à une réduction globale de 12 438 ha.

S'agissant des surfaces des savanes arborées, la dynamique est marquée par une augmentation continue de 1990 à 2015. Cette hausse estimée à 29,57%, équivaut à un accroissement de 28 093 ha. L'analyse de la dynamique au niveau des classes d'altitudes révèle que cette augmentation générale des surfaces des savanes arborées est due à l'accroissement des superficies au niveau des basses et moyennes altitudes. Dans ces zones, l'accroissement respectivement estimée à 45,97% et 38,76%, correspondant à un gain total de 28 830 ha. Par contre, au niveau des hautes altitudes, les surfaces des savanes arborées ont subi une baisse de 2,87%, équivalant à une baisse de plus de 736 ha.

Au niveau de l'habitat, l'on constate que les surfaces occupées ont subi une augmentation générale continue de 1990 à 2015. Cet accroissement des superficies s'évalue à 17,16%, soit un gain de plus 4 181 ha. Cette hausse globale des superficies de l'habitat a été induite par l'accroissement au niveau des basses et moyennes altitudes, où la hausse cumulée de 15,69%, équivaut à un gain de 4 380 ha. En revanche, dans les hautes altitudes, les surfaces occupées par l'habitat ont subi une décroissance de 10,48%, correspondant à une réduction de près de 200 ha.

4.2. Discussions

4.2.1. Traitement numérique

Les matrices de confusion des classifications d'images, des années 1990, 2000, 2011 et 2015, ont permis d'obtenir des coefficients de kappa qui sont respectivement de 0,93 ; 0,90 ; 0,83 et 0,92.

Ces valeurs de coefficients de kappa étant comprises entre 0,81 et 1, les résultats de ces classifications sont statistiquement acceptables. En effet, selon LANDIS et KOCH (1977), le coefficient de Kappa d'une classification d'image est excellent quand il est compris entre 0,81 et 1; bon lorsqu'il est compris entre 0,61 et 0,80; et modéré entre 0,21 et 0,60.

Par ailleurs, les précisions globales des traitements estimées à 94,98% et 93,46%, respectivement pour les années 1990 et 2015, restent très proches des valeurs obtenues par YOUSSEF (2013) ayant travaillé sur des images Landsat.

Les travaux de ce chercheur porte sur l'étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc), à partir des images Landsat, qui sont assez évocateurs.

En effet, ces travaux de recherche ont été entrepris dans une zone présentant des caractéristiques morphologiques similaires à celles de la région du Tonkpi. Ce bassin versant comporte une unité géomorphologique de hautes altitudes, variant entre 1000 m et 1400 m, et une autre unité géomorphologique de moyennes altitudes, comprises entre 500 m et 900 m. Ces deux unités géomorphologiques représentent plus de la moitié de la zone d'étude.

Les précisions globales des classifications d'images Landsat issues de cette étude qui sont respectivement de 89,25% et 87,67% pour les années 1987 et 2011, se rapprochent de celles obtenues sur la région du Tonkpi.

4.2.2. Dynamique d'occupation du sol dans la Région du Tonkpi

De façon générale, cette étude permet de mettre en évidence le phénomène de déforestation de 1990 à 2015 avec une perte de près de 76 179 ha de forêts denses, soit un taux de déforestation moyen de 3047 ha /an. Cette déforestation serait la résultante de la combinaison de divers facteurs socioéconomiques, politiques et militaires défavorables à la conservation de la nature. En effet, de 1990 à 2000, nous constatons une augmentation de 3 783 ha de terres

emblavées par l'agriculture et les jachères. Cette situation s'explique par la mise en œuvre dans cette période d'un vaste projet agricole : le projet BAD-OUEST, qui a aménagé au moins 4000 ha de terres pour la riziculture irriguée. Ces résultats sont similaires à ceux des travaux d'EL GAROUANI *et al.*, (2008) qui a mis en évidence le rôle joué par l'agriculture dans la déforestation des régions montagneuses du bassin versant de l'Oued Tlata au Maroc. Selon, cet auteur, de 1994 à 2000, les surfaces des forêts ont régressé de 1, 29 km² à 1,06 km² tandis que les superficies occupées par l'agriculture ont connu un accroissement sur la même période de 10,95 km² à 16,56 km².

Outre l'agriculture, la déforestation dans la région du Tonkpi s'explique par la crise militaro-politique qu'a connue la Côte d'Ivoire, à partir de 2002, qui a particulièrement sévi dans la région du Tonkpi. Cette crise s'est traduite par le retrait de l'Administration forestière, laissant ainsi un libre accès à l'exploitation forestière de type minier.

Hormis l'extension des surfaces agricoles, le suivi de la dynamique de l'occupation du sol révèle que la savanisation est le phénomène le plus important. Cette savanisation est caractérisée par un accroissement de plus de 28 000 ha de savanes arborée sur la période de 1990 à 2015, dans la région du Tonkpi. Ces résultats sont similaires à ceux de BARIMA *et al.* (2009) qui ont travaillé sur la dynamique paysagère en milieu de transition forêt-savane ivoirienne. En effet, ces auteurs sont arrivés à la conclusion que la savanisation a été la dynamique la plus importante de 1986 à 2000 dans la zone de transition forêt-savane, situé dans le département de Tanda, à l'est de la Cote d'Ivoire. Cette dynamique a été marquée par une augmentation de 287% de savane qui sont passées de 665 km² (16% de la surface totale) à 2571 km², soit 61% de la surface totale.

Les résultats de cette étude sur la région du Tonkpi révèlent également une dégradation des forêts denses qui se traduit par une réduction de leurs surfaces au profit d'une augmentation des superficies des forêts dégradées (5 631 ha). Ces résultats sont également similaires à ceux de la région de DIAPAGA au Burkina Faso, où selon TANKOUANO (1992), la dégradation des formations végétales plus denses au profit des formations végétales moins denses est passée de 6% à 9% de 1956 à 1986. Cette situation était due à l'accroissement démographique des populations qui exercent une pression foncière. Cela est également le cas dans la région du Tonkpi, où la population est passée d'environ 238 157 habitants en 1988 à environ 1 047 769 habitants en 2014.

Les études de KOUASSI (2014) sur la région de Yamoussoukro en Côte d'Ivoire, ont obtenus des résultats sur la déforestation qui confortent également ceux de l'étude sur la déforestation dans la région du Tonkpi. En effet, les résultats de Yamoussoukro, montrent que le taux de déforestation est passé de 0,96% entre 1987 et 2002 à 7,20% entre 2002 et 2012. Selon KOUASSI (2014), cette tendance pourrait s'expliquer par les pressions anthropiques et l'augmentation de la population.

CONCLUSION PARTIELLE

La première partie de cette étude avait pour objectif de cartographier d'une part la dynamique des formations forestières dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015 et d'autre part l'évolution ces formations forestières en fonction de l'altitude.

Pour mettre en évidence la dynamique temporelle des formations forestières, l'approche méthodologique adoptée s'est appuyée sur le traitement numérique des images Landsat des capteurs TM 1990, TM 2000, ETM+ 2011 et OLI-TIRS 2015. L'application de l'algorithme de la classification supervisée par maximum de vraisemblance a permis de discriminer les différentes classes de l'occupation du sol dans la région du Tonkpi. Ainsi, sept différentes classes ont été identifiées : les forêts denses, les forêts dégradées, les cultures et jachères, les sols nus, les savanes arborées, les cours d'eau et les habitats.

L'étude diachronique de l'occupation du sol de 1990 à 2015 révèle une modification de l'espace naturel marquée par une dynamique de déforestation galopante qui s'est traduite par une baisse des superficies des forêts denses. Ce qui permet de dire que l'hypothèse selon laquelle les formations forestières ont subi une décroissance dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015 est confirmée au niveau des forêts denses. Cependant, au regard de la dynamique de dégradation des forêts avec pour corollaire l'augmentation des superficies des forêts dégradées, l'on constate que cette hypothèse est infirmée. En clair, l'hypothèse de la décroissance des formations forestières dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015 est en partie vérifiée.

Par ailleurs, l'on note des dynamique d'urbanisation, de savanisation et de dénudation des sols marquées respectivement par un accroissement des superficies de l'habitat, des savanes arborées et des sols nus. Toutes ces évolutions des composantes du paysage de la région de 1990 à 2015 permettent de mettre en évidence la dynamique temporelle de l'occupation sol de la région du Tonkpi sur cette même période.

Dans l'optique de cartographier la dynamique spatiale des formations forestières en fonction de l'altitude dans la région du Tonkpi, la détermination des classes d'altitudes à partir du modèle numérique de terrain (MNT) du satellite ASTER a été utilisée. Elle a permis d'obtenir trois classes d'altitudes : les basses, les moyennes et les hautes. La superposition des couches cartographiques de ces différentes classes d'altitudes avec la carte d'occupation du sol de toute la région du Tonkpi a révélé que la dynamique de déforestation s'est manifestée à différentes intensités en fonction de l'altitude. Ainsi, l'on constate un gradient décroissant de déforestation des basses altitudes aux hautes altitudes. Ce qui permet de dire que l'hypothèse selon laquelle la dynamique des formations forestières dans la région du Tonkpi est décroissante en fonction de l'altitude est confirmée pour les forêts denses. Par contre, au niveau des forêts dégradées, la décroissance est constatée au niveau des hautes altitudes tandis qu'au niveau des basses et moyennes altitudes, c'est le contraire. En conséquence, cette hypothèse est infirmée pour les forêts dégradées. En somme, l'hypothèse de la dynamique décroissante des formations forestières dans la région du Tonkpi en fonction de l'altitude est partiellement vérifiée.

Par ailleurs, les dynamiques de savanisation et d'urbanisation matérialisées par des augmentations générales de surfaces sur toute la région se sont manifestées par des accroissements de superficies à différentes intensités des basses altitudes aux moyennes altitudes. Cependant, aux niveaux des hautes altitudes, ce sont des réductions de superficies de ces classes de l'occupation du sol qui ont été observées. Enfin, les dynamiques d'accroissement de superficies des terres cultivées et des sols nus observées sur toute la région ne se sont manifestées qu'au niveau des basses altitudes excepté sur les moyennes et les hautes altitudes.

En définitive, il ressort de cette partie de la thèse que l'utilisation de la télédétection et des SIG a permis de cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol en général et en particulier des formations forestières, de la région du Tonkpi de 1990 à 2015.

**Partie II : ZONES À RISQUE D'ÉROSION HYDRIQUE DANS LA RÉGION DU
TONKPI**

5.1. Définitions et facteurs de l'érosion

5.1.1. Définitions de l'érosion

L'érosion vient du mot latin *Erodere* qui signifie ronger. Le sens, plus ou moins large, varie selon les spécialistes et leur domaine d'application.

L'érosion est un processus selon lequel les particules de sol sont arrachées de leur milieu, transportées par un agent de transport (l'eau, l'air) et déposées en un autre milieu. Ce processus peut s'écrire (DUBE, 1975).

EROSION = ARRACHEMENT → TRANSPORT → SEDIMENTATION

Selon GIRARD *et al.* (2005), l'érosion peut être définie comme un phénomène de déplacement des matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité. Elle est l'une des formes de dégradation physique des sols la plus importante en affectant les reliefs, la production du sol et la stabilité des versants.

Selon VIERS (1969), l'érosion est une action d'usure, de transport et d'accumulation que les eaux et les agents atmosphériques font subir à l'écorce terrestre.

ROOSE (1977) définit l'érosion comme étant un ensemble de processus variables dans le temps et dans l'espace, en fonction des conditions écologiques et des mauvaises conditions de gestion de la terre par l'homme.

On distingue l'érosion naturelle, géologique ou lente et l'érosion accélérée ou anthropique dont la vitesse est 10 à 1000 fois supérieure au premier cas (ROOSE, 1994).

Les changements climatiques et des paysages sous l'influence de la pression démographique et l'extension des cultures d'exploitation, ont contribué à l'augmentation de l'exposition des terres au processus de ruissellement, et par conséquent, à la dégradation des sols par l'érosion.

Il existe plusieurs mécanismes générant divers phénomènes d'érosion selon les régions et leurs caractéristiques. Nous avons entre autre l'érosion éolienne causée par le vent et l'érosion hydrique provoquée par l'eau.

Concernant l'érosion hydrique, les recherches montrent que l'eau est le principal agent de l'érosion. Pour WALL *et al.*, (2002), deux grands types de phénomènes caractérisent l'érosion hydrique: l'érosion en nappe et l'érosion concentrée.

L'érosion en nappe est provoquée par le caractère argilo-limoneux du sol qui tend à se désagréger et à produire une croûte en surface sous l'action de la pluie. Ce phénomène, nommé battance, s'effectue particulièrement lorsque les surfaces sont pauvres ou dénudées de végétation. La croûte de battance est propice au ruissellement en nappe et freine l'infiltration de l'eau. Par conséquent, des débris organiques et de fines particules minérales sont entraînés par l'eau (WILSON et LORANG, 2000).

L'érosion concentrée quant à elle correspond plutôt au caractère linéaire des flux de matière. Les ravines sont, par exemple, le résultat de ce type d'érosion (ROUET, 2009). On comprend que l'érosion hydrique c'est le détachement des particules du sol sous l'action de l'eau. Ainsi, les mouvements de masse et les mouvements de terrain désignent les mêmes phénomènes d'érosion. Ces termes sont employés pour représenter une multitude de phénomènes très diversifiés et complexes qui résultent souvent de l'addition de plusieurs mécanismes.

5.1.2. Facteurs de l'érosion en milieu montagnard

Les reliefs de montagnes sont des paysages particuliers admettant des mécanismes d'érosion parfois particuliers. Toutefois, quand il s'agit de rechercher les facteurs contribuant au phénomène d'érosion, ROOSE *et al.*, (1993) posent une question fondamentale en introduction dans une étude sur les montagnes algériennes: Quelles sont les causes de ces paysages désolés et pourtant si attachants?

La réponse à cette interrogation révèle que l'homme et ses activités dévastatrices, le climat, le mode de culture et le relief sont des facteurs d'influence. Certes, en milieu tropical, le phénomène d'érosion hydrique est accentué par le climat, mais le relief et la géologie y jouent des rôles primordiaux. Les conditions climatiques dominées par de fortes pluies équatoriales favorisent l'altération des matériaux géologiques pour générer les sols. Et, en l'absence de couverture végétale, la couche épaisse de matériaux résiduels meuble est soumise à des

mécanismes érosifs très actifs. Tandis que les sols en milieu montagnard étant peu profond sont vulnérables à l'érosion, les cultures à répétition avec les techniques culturales sur brûlis participent activement au phénomène de l'érosion. Au-delà des facteurs climatiques contribuant au phénomène d'érosion, les versants sont affectés par une évolution naturelle. Les nombreux processus de l'évolution des reliefs (orogénèse, tectonique, etc.) prédisposent les terrains au phénomène de l'érosion (ROOSE. 1995).

En dehors des facteurs précités, se trouvent aussi des facteurs dont la lithologie, la structure du sol et l'exposition. Enfin, les facteurs tels que la végétation, la faune, les précipitations, les eaux courantes et l'infiltration, l'air, la température, le feu ainsi que l'activité humaine contribuent également au phénomène d'érosion (WALL *et al.*, (2002), La problématique de l'érosion entraîne une multitude d'impacts non seulement environnementaux, mais également socio-économiques (ROUET, 2009).

En zone montagneuse, comme c'est le cas dans la région du Tonkpi, la pente du terrain est le facteur topographique le plus important. L'influence première de la pente est l'augmentation des vitesses d'écoulement. Sur des pentes plus grandes, l'infiltration est plus faible et le volume de ruissellement augmente. La longueur de la pente joue un rôle similaire. Elle augmente le volume de ruissellement et ainsi l'érosion (RIPLEY *et al.*, 1962).

Les micros dépressions du terrain provoquent une concentration de l'écoulement qui augmente le potentiel érosif par rapport à un même volume de ruissellement coulant selon une lame uniforme. Par contre, les dépressions fermées limitent les effets de l'érosion en permettant aux sédiments en suspension de se déposer au lieu de poursuivre leur chemin.

5.1.3. Travaux de recherche sur l'érosion hydrique en Côte d'Ivoire

Les études faites sur la détermination des zones de vulnérabilité à l'érosion hydrique, se sont plus basées sur le modèle révisé de WISCHMEIER and SMITH (1978). Dans leur étude, les chercheurs ont élaboré un modèle basé sur les facteurs classiques de ce modèle, qui ont été adaptés aux conditions de la région d'étude. Parmi ces chercheurs, on peut citer les travaux de ROUGERIE (1960), qui ont été les premières investigations menées dans la région forestière de la Côte d'Ivoire. Ces recherches ont permis d'analyser les divers processus d'érosion et les méthodes antiérosives.

En 2007, BOYOSSORO *et al.* (2007), ont publié un article intitulé « Insécurité climatique et géorisques en Côte d'Ivoire : étude du risque d'érosion hydrique des sols dans la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire) ». Dans cet article, ils ont établi un modèle d'expert, qui utilise les facteurs qui favorisent l'érosion hydrique des sols (Topographie, le sol, l'occupation du sol et l'eau), basé sur l'intégration des images satellites, ainsi que des données cartographiques, dans un système d'information géographique. Quatre classes d'érosion ont été retenues (faible, moyen, fort et très fort).

En 2012, AKE *et al.* (2012), ont élaboré une cartographie multifactorielle à l'érosion hydrique des sols dans la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Ils ont aussi utilisé les mêmes éléments pour déterminer les zones de vulnérabilité à l'érosion. Leur approche passe par une analyse des principaux facteurs de l'érosion : l'érosivité des pluies, l'érodibilité des sols, la pente et l'occupation des sols. Trois classes de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique ont été distinguées : les zones à faible vulnérabilité, les zones à vulnérabilité moyenne et les zones à vulnérabilité forte.

Malgré leurs atouts (estimation quantitative, prédiction, etc.), les différents modèles de l'érosion hydrique, il est possible de constater quelques inconvénients dans les études qui concernent la Côte d'Ivoire. Ces dernières n'ont pas pris en compte le facteur anthropique. L'absence de ces données a orienté la présente étude à choisir le Modèle MEDALUS.

Pour conclure, nous constatons que les approches qualitatives et quantitatives possèdent des avantages et des inconvénients. Les modèles basés sur l'expertise sont nombreux. Ces approches qui sont conçues en fonction de la disponibilité des bases de données, sont peu coûteuses et conviennent à beaucoup de pays. Elles offrent une simplicité dans la lecture des résultats. Ces modèles prennent en compte les particularités locales des régions étudiées en attribuant des pondérations aux différents facteurs qui favorisent l'érosion hydrique.

Les SIG sont très utiles pour analyser des phénomènes spatiaux tels que l'érosion. En intégrant des données matricielles incluant les images satellites dans le SIG, il est possible de décrire le milieu et étudier le phénomène de l'érosion à partir de différents paramètres. Pour ce faire, il existe de nombreuses méthodes. Afin de bien décrire le milieu, les dérivés du MNT, l'occupation du sol, la pluviométrie, le facteur anthropique ainsi que la sensibilité à l'érosion apparaissent comme les principaux paramètres pris en compte. Pour obtenir des

résultats s'approchant de la réalité, il est indispensable de vérifier le degré d'importance de chacun des paramètres utilisés dans le contexte d'étude.

Selon la littérature consultée, en Côte d'Ivoire de nombreux auteurs ont tenté de modéliser l'érosion hydrique. Les principaux modèles employés sont, entre autres l'USLE, le RUSLE. Or ces modèles ne prennent pas en compte les facteurs anthropiques (données populations, données socio-économiques). Cette raison va amener à utiliser le modèle du projet MEDALUS pour déterminer l'érosion hydrique.

5.2 Revue bibliographique des méthodes d'évaluation des risques d'érosion des sols et des techniques utilisées

De nombreuses recherches et articles ont été réalisés sur les risques de dégradations des terres agricoles, simultanément avec le développement de la population mondiale. Différentes approches ont été conçues pour évaluer le risque d'érosion hydrique. Toutefois, l'on pourra distinguer des approches basées sur la modélisation et des approches qualitatives basées sur l'expertise.

5.2.1. Les approches méthodologiques basées sur la modélisation

WISCHMEIER et SMITH (1978) ont mis en place un modèle, quantitatif et empirique, pour estimer les pertes en sol provoquées par l'érosion hydrique : Universal Soil Loss Equation (USLE). En 1978, ces chercheurs ont établi le modèle RUSLE, celui-ci est une équation multiplicative de plusieurs indices :

$$\text{Les pertes en sol (A)} = \mathbf{R * K * SL * C * P}$$

L'érosivité des pluies (R) est calculée en fonction de l'énergie cinétique des pluies. L'érodibilité des sols (K) dépend des matières organiques, de la texture, de la perméabilité et de la structure du sol. La topographie (SL) dépend de la longueur et de l'inclinaison de la pente. Le couvert végétal (C) est variable d'une saison à l'autre. Ils ont aussi pris en compte les pratiques utilisées pour limiter le risque érosif (P).

Même si ce modèle, (USLE), qui est conçu pour estimer les taux annuels d'érosion sur le long

terme dans les zones agricoles, est très utilisée grâce à sa simplicité et sa fiabilité, il ne s'applique pas à l'érosion linéaire ni à l'érosion en masse, mais il ne s'applique qu'à l'érosion en nappe. En plus, ce modèle attribue une grande valeur au facteur topographique par rapport à d'autres facteurs. Ce modèle est établi pour des conditions de milieux existants aux Etats Unis ce qui signifie que ce modèle ne peut pas être appliqué tel qu'il est dans les pays méditerranéens (CORMARY et MASSON, 1964).

En 1986, FRENETTE et JULIEN (1986), ont développé un modèle nommé LAVSED pour prédire l'érosion des bassins et le transfert de sédiments dans les cours d'eau nordiques. Ce modèle qui étudie les précipitations, les caractéristiques du bassin, l'érosion, la sédimentation et l'exploitation du territoire, est basé sur l'équation universelle de pertes en sol (USLE) de WISCHMEIER & SMITH (1978). Ce modèle s'appuie également sur l'équation de KILINE et RICHARDSON, qui est basée sur l'intensité de pluie, reliant l'érosion aux caractéristiques hydrauliques de ruissellement. A partir de ces données et de ces équations, les chercheurs ont établi la carte du risque érosif des bassins et ils ont déterminé les apports de solides aux cours d'eau. Le modèle LAVSED, comme le modèle USLE, donne une grande importance à l'érosion en nappe par rapport à l'érosion linéaire.

En 1982, MORGAN *et al.* (1982), ont créé le modèle Silsoe qui permet de calculer la production des sédiments causée par les pentes dans la partie du nord-ouest de l'Iran. Dans ce modèle, les chercheurs séparent le détachement du transport des matériaux. La carte de détachement des matériaux dépend de l'intensité de la pluviométrie, de la couverture végétale et du sol. Elle doit être comparée à la carte du transport qui, elle, est fonction de la couverture du terrain, du ruissellement et de la pente. Ce modèle ne prend pas en compte l'impact de la vitesse d'écoulement sur l'érosion. De ce fait ce modèle ne note aucun transfert d'écoulement en bas en pente.

En 1995, KIRKBY et COX (1995) ont établi le modèle MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use) pour le niveau régional. Ce modèle, qui été conçu pour déterminer le ruissellement et la sédimentation, nécessite une grande quantité de données. Malgré la performance de ce modèle pour évaluer les sédimentations au cours des inondations, il se montre peu performant pour évaluer le ruissellement.

En 1997, le modèle SEMMED (Soil Erosion Model for Mediterranean Areas) a été établi (DE JONG et RIEZEBOS, 1997). Celui-ci, qui est intégré dans un SIG, permet d'élaborer plusieurs produits intermédiaires, cartes de ruissellement, carte de la capacité de détachement et du transport et permet également d'identifier les zones vulnérables à l'érosion (BOU KHEIR *et al.*, 2001).

Malgré les avantages de ce modèle, l'on constate que les résultats dépendent de la précision des données des sols. De plus, ce modèle ne prend pas en compte l'encroûtement de la surface des sols.

En 1997, Quinton a élaboré le modèle EUROSEM (European Soil Erosion Model), pour estimer le risque d'érosion au niveau parcellaire pour la prédiction annuelle des pertes de terre. Ce modèle, établi en Europe, ne prend pas en compte les pratiques culturales, et estime les pertes en terre sans préciser les formes d'érosion hydriques.

En 2000, VAN DER KNIJFF *et al.*, (2000) ont estimé l'érosion hydrique en Italie grâce à une approche fondée sur une modélisation à partir de l'équation USLE de WISCHMEIER et SMITH (1978). Ce modèle empirique fonctionne à un intervalle mensuel de temps et permet d'estimer le taux annuel des pertes de sol des terres agricoles. Cette étude a pris en compte l'interaction entre la croissance végétale et les précipitations. L'angle de la pente a été étudié à partir d'un MNT avec une résolution de 250 mètres. Cette dernière est grossière pour estimer le risque d'érosion. En ce qui concerne le facteur d'érosivité des précipitations (R), les chercheurs n'ont pas pris en compte le facteur de la variété climatique en Italie.

Ces mêmes chercheurs ont utilisé une méthode basée sur le modèle d'USLE pour estimer l'érosion hydrique du sol en Europe (VAN DER KNIJFF *et al.*, 2000). A partir de leur méthode et en combinant l'érosivité des précipitations, l'érodibilité du sol, la topographie et le couvert du sol, ils ont calculé les taux moyens annuels d'érosion par hectare. Le modèle utilisé pour estimer l'aléa de l'érosion du sol en Europe est inspiré de l'aléa de l'érosion du sol en Italie.

En 2004, KIRKBY *et al.*, (2004) ont établi le modèle PESERA pour estimer l'aléa d'érosion hydrique des sols pour l'ensemble de l'Europe. Ce modèle, qui combine les effets de la topographie, du sol, du climat de la végétation est conçu pour prévoir le ruissellement avec un pas journalier.

Le taux d'érosion a été évalué à partir des enregistrements quotidiens des précipitations. Selon

VAN ROMPAEY *et al.*, (2003), ce modèle qui peut fonctionner comme un outil d'évaluation de changements de climat ou d'occupation du sol, propose des résultats concernant le taux d'érosion deux fois plus élevés que les valeurs observées en Belgique et quatre fois plus faible en République tchèque.

5.2.2. Les approches qualitatives basées sur l'expertise

En 1989, DE PLOEY (1989) a établi la carte de risque d'érosion des sols de l'Ouest de l'Europe en utilisant des méthodes basées sur l'expertise. Plusieurs experts ont délimité les aires là où le processus d'érosion était très important. Le point faible de cette approche est que le chercheur n'a pas défini les critères utilisés pour délimiter ces aires (YASSOGLOU *et al.*, 1998 ; VAN DER KNIJFF *et al.*, 2000).

En 1992, l'union européenne a adopté la méthode CORINE pour estimer le risque d'érosion hydrique dans la région méditerranéenne (VANESSA, 2011). Ce modèle, basé sur des points assignés à des facteurs apparentés à l'angle de la pente (8 classes), le couvert végétal (9 classes), la capacité du sol à la formation des croûtes (4 classes) et l'érodibilité (3 classes), a permis de dresser les cartes des risques d'érosion pour 17 pays européens et 2 pays d'Afriques du Nord. Mais ce qu'il est important de noter est que ces cartes n'ont pas été validées pour tester la pertinence du modèle appliqué. De plus, il n'y a aucune information actuelle sur la précision de leurs résultats.

En 1998, l'érosion des sols a été estimée en France en se basant sur une méthode d'expertise (MONTIER *et al.*, 1998). Pour ce faire, les chercheurs ont étudié les facteurs qui contribuent à l'érosion hydrique : la couverture végétale (9 classes), la capacité du sol à former une croûte de battance (4 classes), l'angle de pente (8 classes) et l'érodibilité (3 classes). L'avantage de la méthode employée, est qu'elle prend en compte les différents types d'érosion qui peuvent être constatés dans les secteurs cultivés ou dans les montagnes.

En 1998, l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), a développé un modèle, MESALES, pour évaluer l'aléa de l'érosion hydrique en France (COLMAR, 2006). Le modèle développé a été amélioré plus tard, suite à plusieurs tests réalisés à différentes échelles et à une approche basée sur un arbre de décision afin de définir des classes qualitatives d'aléa érosif. Les chercheurs ont regroupé les facteurs qui contribuent à l'érosion en plusieurs classes : l'occupation du sol 9 classes, la sensibilité à la formation des croûtes de battance 4

classes, l'érodibilité du sol 3 classes et la pente avec 8 classes. Le croisement de ces facteurs a conduit à établir la carte de la sensibilité à l'érosion. Cette dernière a été croisée avec l'intensité et le volume des précipitations, ce qui a permis d'établir la carte d'aléa pour chaque saison. Ce modèle, qui permet de simuler l'évolution des aléas en France et de mettre à jour les différentes données, permet également de faire une comparaison entre les différentes régions françaises ainsi qu'une cartographie saisonnière des aléas érosifs.

L'avantage de l'arbre à décision est qu'il est simple à construire et permet de classer un grand nombre d'échantillons en plusieurs classes. Malgré les avantages de cette méthode, et si toutefois des nouvelles données devaient être intégrées, il serait alors nécessaire de construire, un nouvel arbre de décision. Cela signifie que ce modèle ne sera pas facilement adaptable dans le cas où un nouveau critère serait jugé important après la validation du modèle (CERDAN *et al.*, 2010).

En 2003, un modèle a été développé, le MEH-SAFER (Modèle d'Érosion Hydrique en milieux Semi-arides de Forte Énergie de Relief) afin d'étudier les risques d'érosion hydrique dans le bassin versant du lac Laka-Laka en Bolivie, qui est un milieu semi-aride de forte énergie de relief (OUATTARA *et al.*, 2003). Ce modèle développé est basé sur le croisement du potentiel de ruissellement et de la vulnérabilité topographique, sur des images satellites issues de plusieurs sources et sur des modèles numériques du terrain afin de cartographier la topographie de la surface. Pour ce modèle, les chercheurs ont utilisé un MNT généralisé : un MNT moins grossier permet de donner plus de détails pour cette étude, ajoutant que ce modèle ne quantifie pas les pertes en érosion.

En 2004, DUMAS (2004) a utilisé une approche qualitative pour cartographier la sensibilité des sols à l'érosion hydrique, dans certaines régions de la Nouvelle Calédonie. Il a établi la carte de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique à partir d'une analyse multicritère qui combine les facteurs qui contribuent à l'érosion hydrique (la pente, le sol et l'occupation du sol) dans un SIG. Chacun de ces facteurs a été regroupé en plusieurs classes selon sa sensibilité ou non à favoriser l'érosion. Dans cette approche, l'auteur n'a pas pris en compte le facteur climatique, et le modèle utilisé étudie les surfaces émettrices des particules solides et ne prend pas en compte la sédimentation et leurs impacts.

En 2000, WILSON et LORANG (2000), ont établi la cartographie de l'aléa d'érosion du département de l'Aisne à partir d'un modèle « de type système expert » et à l'aide du système d'information géographique. Les différents facteurs qui contribuent à l'érosion hydrique du sol ont été croisés, pour établir la carte de l'aléa d'érosion. Le changement saisonnier a été mis en valeur dans cette approche pour mieux étudier l'interaction entre le couvert du sol et le climat. Le modèle appliqué est le même modèle établie par l'INRA en 1998 pour évaluer l'aléa de l'érosion hydrique en France, les chercheurs ont utilisé des données plus précises comme le MNT qui à été établie à partir des courbes de niveaux distantes de cinq mètres. Dans cette étude les chercheurs ont pris en compte le rôle de la matière organique pour étudier la sensibilité des sols à l'érodibilité et à la battance.

En 2005, ATHERTON *et al.*(2005), ont développé un modèle additif basé sur la combinaison de cinq facteurs (la pente, le sol, l'occupation du sol et les précipitations absolues ou saisonnières) et à l'aide d'un SIG afin de déterminer l'érosion des sols dans les bassins versants des îles Fidji. L'inconvénient de ce modèle est que les chercheurs n'ont pas validé leurs résultats sur le terrain pour tester le modèle, ainsi que la quantification de l'impact de l'infrastructure sur l'érosion.

En 2005, BATTI (2005) a étudié la probabilité des particules solides à l'arrachement et au transport dans les bassins versants du Lagon St Gilles sur le côté nord-ouest de l'île de la Réunion. Pour ce faire, l'auteur a utilisé un modèle qualitatif, basé sur une analyse multicritère à l'aide d'un arbre de décision à dire d'experts, pour établir la carte de l'aléa d'érosion des sols. La méthodologie appliquée est celle de l'IFEN/ INRA élaborée par WILSON et LORANG (2000). Quatre facteurs ont été pris en compte pour cette étude (le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat). L'un des points faibles pour ce travail est que le modèle utilisé a été déjà validé sur plusieurs sites en France mais, en revanche, n'a pas été validé dans un contexte tropical.

En 2006, un modèle a été adapté pour estimer l'aléa du risque érosif dans le contexte méditerranéen : l'exemple pris était la région du Languedoc-Roussillon (ANTONI *et al.*, 2006). L'approche utilisée pour cartographier l'aléa du risque érosif est une approche expertise basée sur la combinaison des facteurs suivants : occupation du sol, battance, pente, érodibilité, et intensité des pluies, et faite à l'aide d'un Système d'Information Géographique. Cette approche, inspirée par le modèle de l'IFEN/ INRA élaborée par WILSON et LORANG

(2000), a permis de cartographier les zones d'aléa érosif, prend en compte spécifiquement le taux de pierrosité, la teneur en matières organiques et en fer des sols et la texture.

En 2003, l'exactitude des trois modèles d'estimation de l'érosion hydrique du sol (USLE, INRA et PESERA), a été évaluée, afin de valider les estimations de l'aléa de l'érosion des sols à l'échelle européenne (VAN ROMPAEY *et al.*, 2003). Cette estimation est faite à partir de réservoirs qui permettent de mesurer le volume sédimentaire transporté dans différents bassins versants. Après avoir délimité le bassin versant de chaque réservoir et déterminé le coefficient de rapport de dépôts des sédiments, cette méthode a été appliquée dans différents pays européens comme l'Espagne, l'Italie. Ces chercheurs ont constaté que les modèles peuvent fournir une estimation satisfaisante dans certains pays européens, (Belgique et République tchèque), mais pas dans d'autres (Espagne et Italie). Les raisons viennent de l'incertitude qui subsiste sur les données de sédimentation dans les réservoirs et sur la non prise en compte de tous les processus de production et de transport des matériaux.

5.3 Méthodes d'évaluation de l'érosion

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de l'érosion. Il sera question dans cette section des méthodes basées sur les observations directes et mesures de terrain, celles s'appuyant sur l'utilisation de la télédétection et des SIG et celles faisant recours à la modélisation.

5.3.1. Méthodes d'observations directes et mesures de terrain

5.3.1.1. Mesures topographiques

Concernant les mesures topographiques, le principe se base sur le suivi de l'évolution topographique de la surface du sol, notamment :

- Mesure par rugosimètre : on estime la variation de la hauteur du sol par rapport à un plan de référence. Voici un exemple de dispositif de mesure de la rugosité (figure 29)

Le principe de mesure est comme suit :

- une boîte dont le cadre est placé à 90 mm de hauteur au-dessus du plan de référence ;
- quatre peignes espacés tous les 150 mm (Dy), dont deux se trouvent sur le cadre et les deux autres sont localisés ensuite par une translation contrôlée de la boîte ;

- chaque peigne à une longueur de 1000 mm et comporte 100 aiguilles espacées de 10 mm (Δx) ;
- chaque aiguille fait 200 mm de longueur ;
- on mesure la partie supérieure dépassant du cadre (Dz , en mm)

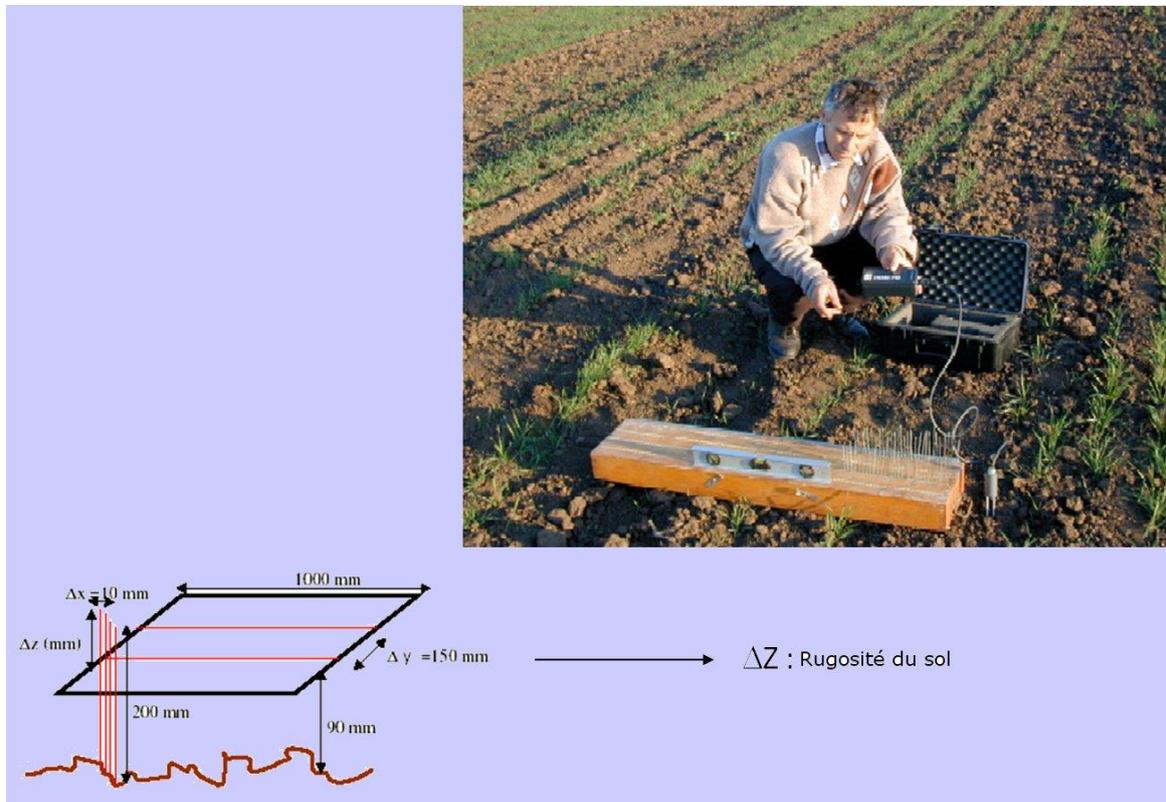


Figure 29 : Mesure de l'érosion par rugosimètre (OLIVIER, 2010)

- Suivi de l'évolution des ravines : on mesure la variation des dimensions de certaines sections des ravines après chaque évènement pluvieux.

5.3.1.2. Simulation de pluie

L'objectif dans le cas de la simulation de pluie est de déterminer certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols et ce, à petite échelle et sous diverses conditions de pluie et de sols. L'utilisation des simulateurs de pluie présente plusieurs d'avantages puisqu'ils :

- sont des dispositifs mobiles ;
- sont capables de produire à volonté des pluies d'intensité, de hauteur et d'énergie semblables à celles des pluies naturelles ;
- permettent de simuler des averses de fréquence rare qui causent le plus de dégâts ;
- permettent de raccourcir les temps d'observation sur le terrain.

Pour pouvoir effectuer des simulations de pluie sur le terrain, il est nécessaire de passer par l'étape de préparer les parcelles de mesure dont voici des illustrations (figure 30 et figure 31).

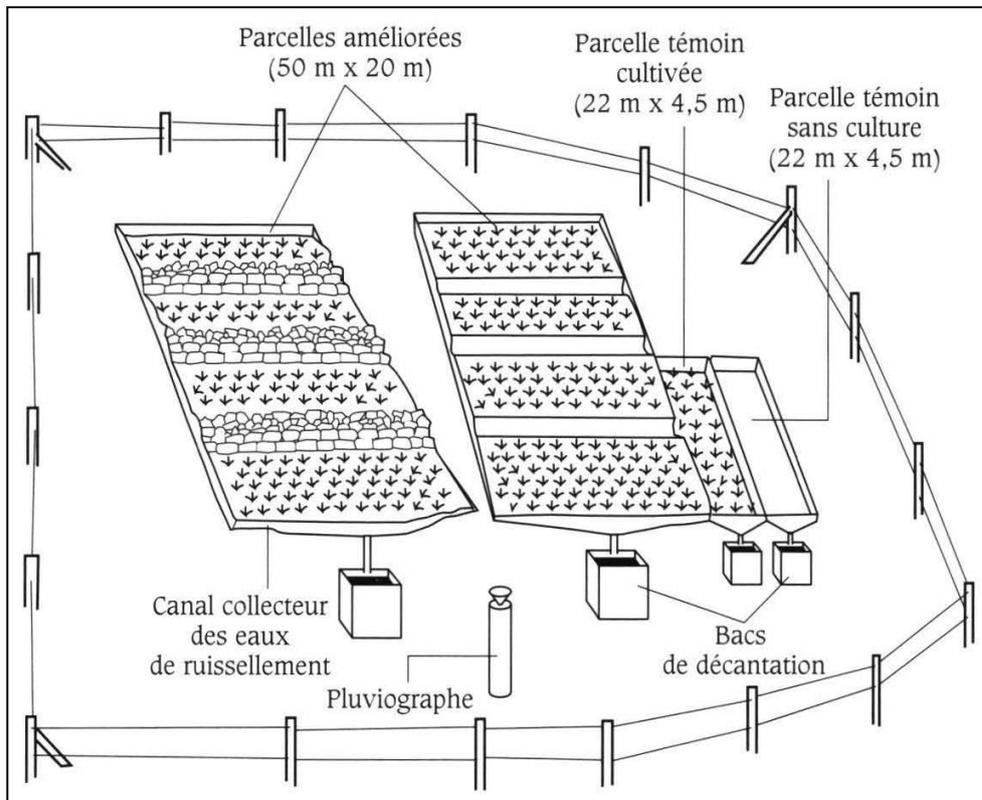


Figure 30 : Dispositif d'étude expérimentale de l'érosion (DE NONI *et al.*, 2001)

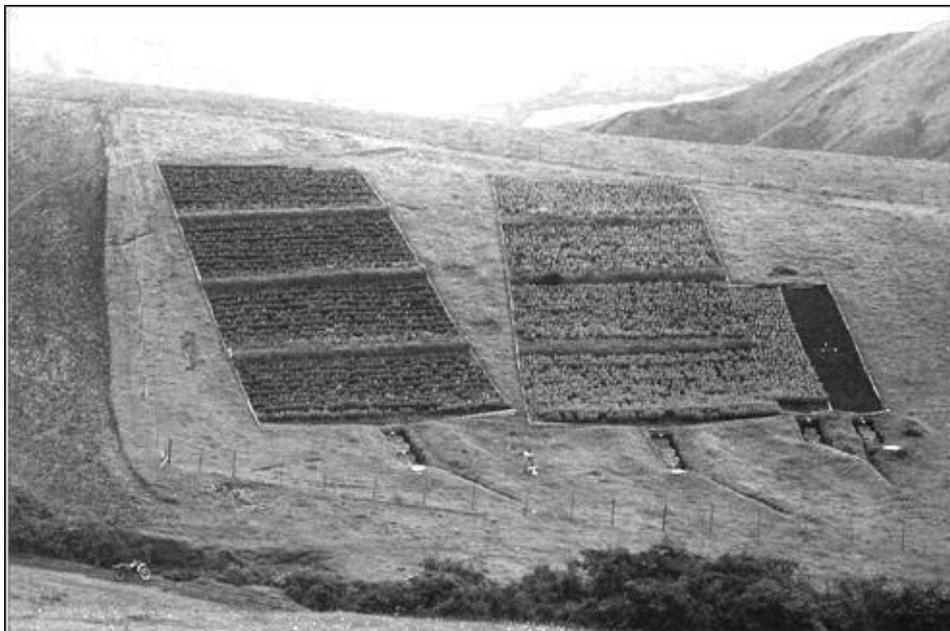


Figure 31 : Parcelles aménagées pour la simulation de pluie (DE NONI *et al.*, 2001)

Il y a plusieurs types de simulateurs des plus simples ou plus complexes. Il sera présenté deux modèles.

Le premier qui est très simple qui peut être confectionné par l'utilisateur, c'est le modèle mini simulateur type ORSTOM et se présente comme suit (figure 32) :

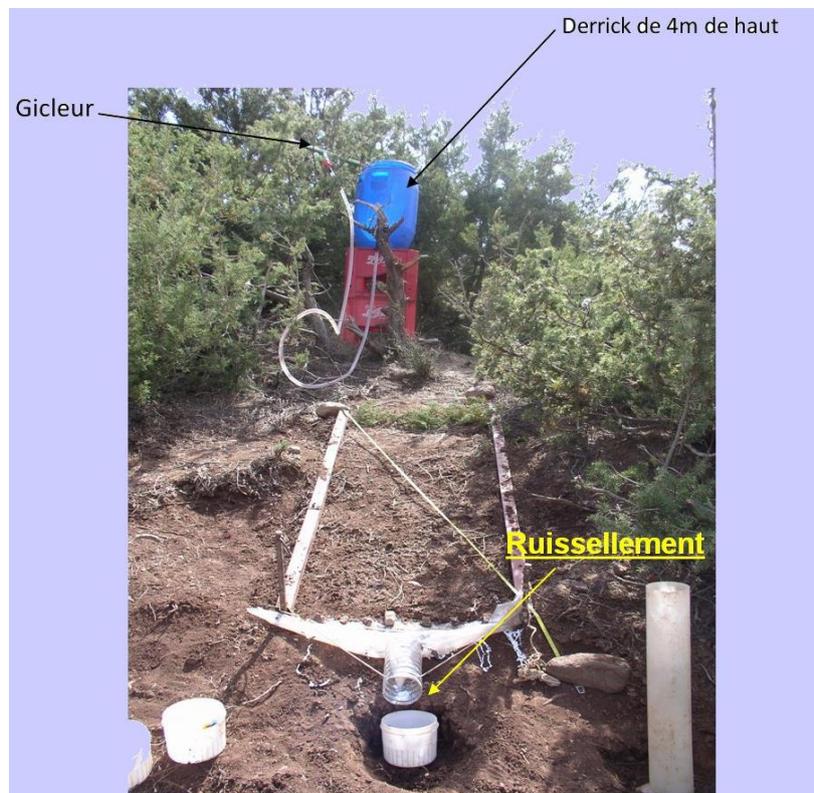


Figure 32 : Parcelle expérimentale installée au Maroc pour l'étude de l'érosion (OLIVIER, 2010)

C'est un simulateur qui a été mis au point par ASSELINE et VALENTIN (1978), il n'arrose que quelques mètres carrés. Il comprend un gicleur fixé sur un système qui se balance au sommet d'un derrick de 4 m de haut. La variation de l'angle de balancement permet de simuler des séquences de pluies d'intensités différentes programmables.

Le ruissellement et sa charge solide sont mesurés au bas d'une parcelle de 1 m². Ce dispositif permet de suivre avec précision, la dynamique de l'infiltration et de tester la détachabilité de la surface d'un sol, mais pas l'érosion, car la faible longueur de pente ne permet pas à l'énergie du ruissellement de s'exprimer. Cette méthode a donné lieu à de nombreuses applications par les pédologues et les hydrologues dans les pays tropicaux, tempérés et méditerranéens.

Elle exige malgré tout beaucoup d'eau (100 à 600 litres), du personnel (2 à 4 techniciens entraînés), du matériel et ne s'applique facilement que sur des pentes de 2 à 30 % et sur des

sols dont l'infiltration est réglée par l'état de surface et non pas par l'engorgement des horizons profonds.

Le deuxième modèle est celui de l'irrigateur manuel à rampe (figure 33) :



Figure 33 : Irrigateur manuel à rampe (OLIVIER, 2010)

Ce dispositif permet de simuler des pluies de différentes intensités qui peuvent atteindre 150 mm/h sur des échantillons de sol correspondants à la « surface élémentaire représentative » d'une parcelle cultivée (10 m² sur 0,3 m de profondeur), avec une pente variant de 0 à 20%.

L'irrigateur manuel à rampe est une version simplifiée à l'extrême de simulateur de pluies dont le cadre de mesure est semblable à celui qui est utilisé pour le simulateur ORSTOM, ou peut être adapté au mouvement des bras porteurs ou à la répartition de l'hétérogénéité de la surface du sol.

5.3.1.3. Mesures par l'étude du transport solide

- **Dans le cas du Transport en solution :** sa mesure est relativement facile puisque les concentrations en matières dissoutes sont en général homogènes dans une section. Ces concentrations sont liées à la conductivité qui est facilement mesurable in situ. Une formule établie par Richard et N'Guyen montre cette relation comme suit (SABIR, 1986) :

$$C \text{ (mg/l)} = K/R \text{ (ohms/cm.cm}^2\text{)}$$

- **Dans le cas du Transport en suspension** : son évaluation peut être faite in situ ou au laboratoire.

En général, le nombre de mesures est petit. En fait, on peut faire :

1. soit une seule mesure verticale au milieu ou au point le plus profond de la section ;
2. soit quelques mesures (2 à 5) réparties sur la section.

Ainsi, COLBY et HEMBREE (1955) ont établi un abaque pour la détermination du nombre de verticales à réaliser en tenant compte de la granulométrie des sédiments et d'un coefficient hydraulique:

$$K = \frac{\left[\frac{v^2}{D} \right]_{\max}}{\left[\frac{v^2}{D} \right]_{\text{moy}}}$$

Avec V : la vitesse moyenne sur une verticale et D : la profondeur de cette verticale

Généralement, on estime que 80 à 90 % du transport des solides se font au cours des périodes de crue durant lesquelles les conditions du travail sont les plus défavorables (manque de données).

5.3.2. Utilisation de la télédétection et des SIG dans l'évaluation de l'érosion

L'intérêt grandissant des études à échelle pluri-kilométrique et les problématiques environnementales associées ont stimulé l'utilisation de la télédétection dans les études des ressources naturelles et de l'environnement.

Sur la base de la connaissance des états de surface et de leur comportement vis-à-vis des ruissellements et de l'érosion par expérimentation, la cartographie des risques érosifs est possible à grande échelle (parcelle, petit bassin versant élémentaire) mais aussi sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de km² grâce à des modèles spatiaux (SOUIDI *et al.*, 2014).

Quant à l'étude de l'érosion hydrique, elle est l'une des formes de dégradation physique des sols la plus importante en affectant les reliefs, la production du sol et la stabilité des

versants. Plusieurs travaux illustrent amplement l'utilisation des photographies aériennes et images satellitaires pour l'évaluation de la vulnérabilité de l'érosion hydrique. Ce sont par exemple les travaux d'El GAROUANI *et al.* (2008) qui ont utilisé les images satellitaires pour cartographier l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued du Maroc. Ces travaux ont abouti à cartographier et à mettre en évidence le modèle d'équation universelle des pertes en sol révisée RUSLE intégré dans un SIG. Ils ont permis d'évaluer et d'estimer l'érosion nette.

Dès lors, dans la perspective de suivre la progression de ce phénomène insidieux et pour évaluer les résultats des actions de lutte, les outils spatiaux, tels que la télédétection et les systèmes d'informations géographiques (SIG), semblent être privilégiés. En effet, ils permettent d'une part d'élaborer des cartes précises sur la progression de la dégradation à partir des indicateurs écologiques qui mettent en évidence les transformations du milieu (SOUIDI *et al.*, 2014).

L'acquisition de données satellitaires (Landsat TM ou SPOT), une technique et un outil couramment utilisés aujourd'hui, peut servir à la cartographie des risques érosifs. Cette approche ne peut en aucun cas remplacer les études de terrain pour établir une compréhension du phénomène, de par son caractère spatial et temporel. Mais, elle reste la méthode de régionalisation et de mise à jour la plus rapide et la moins coûteuse. Actuellement, on peut atteindre une précision cartographique compatible avec des échelles de l'ordre du 1/25 000^{ème} et de 1/50 000^{ème}.

Les images satellitaires sont très corrélées aux paramètres radiométriques de surface, tels que l'albédo, l'indice de végétation (NDVI) et la température de surface. D'autre part, elles permettent le suivi spatio-temporel des cours d'eau et des actions hydriques de la pluviométrie sur le sol en continu. La télédétection permet aussi de donner, à courts intervalles de temps, des observations synoptiques du réseau hydrographique. Elle va plus loin, en permettant de détecter la rugosité du sol (COMPANY, 1993). Avec tous ces atouts, la télédétection, associée aux SIG, est aujourd'hui un outil indispensable dans les études de l'érosion hydrique.

Certes, la cartographie directe des traces d'érosion n'est pas possible à l'heure actuelle, mais on peut en revanche étudier des critères indirects révélant, en surface, la présence de phénomènes érosifs. Le choix de la dégradation structurale de la surface des sols, qui favorise

le ruissellement puis l'érosion, peut être utile pour l'estimation de la gravité de l'érosion sur une grande étendue de surface.

Selon BOU KHEIR *et al.*, (2001), le SIG est un outil indispensable pour l'étude de l'érosion hydrique.

Selon eux, ce dispositif permet de mettre à exécution l'équation universelle des pertes en sol de WISCHMEIER et SMITH (1978). Il a pour objectif de croiser des cartes aux thèmes différents, de fusionner leurs bases de données et d'appliquer des équations mathématiques sur les valeurs numériques des facteurs d'érosion qui y sont rangées. Cet outil informatique permet de stocker et de structurer les informations cartographiques de base, et d'intégrer les différentes caractéristiques des facteurs. En outre, dans leur étude, ils ont procédé à l'intégration des cartes thématiques des facteurs de ce modèle dans le SIG. Cela a permis de cerner l'impact de chaque facteur dans les pertes en sol, de classer par importance relative les zones d'érosion, et de quantifier les pertes en sol. D'autre part, EL GAROUANI *et al.*, (2008) utilise les systèmes d'informations géographiques (SIG) pour modéliser l'érosion hydrique au Nord-ouest du Maroc. Il a aussi intégré les différents facteurs de l'érosion hydrique dans son étude pour la quantifier le risque érosif dans sa zone.

5.3.3. Méthodes basées sur la modélisation

Il ressort que les phénomènes d'érosion sont le résultat d'interactions complexes variables dans le temps et l'espace. Dans une optique d'évaluation des risques ou d'établissement de schémas d'aménagement pour la conservation des sols, le recours à la modélisation peut constituer un outil d'aide à la décision (BOYOSSORO *et al.*, 2007). Le but de cette partie n'est pas de dresser une liste exhaustive des démarches et modèles existants, mais plutôt de décrire les principales approches développées actuellement.

Cependant, on peut rappeler que la modélisation a pour objectifs d'une part, de tester notre compréhension des processus intervenant dans la dégradation des sols par l'érosion et d'autre part, prévoir les risques futurs sous des conditions variables (CHAKROUN *et al.*, 2006).

5.3.3.1. Modèle USLE (Equation universelle de perte en sol)

De nombreux essais ont été conduits aux Etats-Unis par différents auteurs, dès 1932 sous la direction du service de la conservation du sol et du ministère de l'agriculture. En 1959, Wischmeier a finalement abouti à l'" Universal Soil Loss Equation " (USLE) due à l'érosion

pluviale (pluies et ruissellement) puis en 1978 la Revised Universal Loss Soil Equation (RUSLE).

Cette équation est utilisée aux Etats-Unis depuis cette date en agriculture. Son principe est de comparer l'érosion d'un site quelconque à l'érosion d'une parcelle témoin ayant une longueur de 22 m et une pente de 9% sur jachère nue, c'est à dire labourée périodiquement de manière à ce qu'aucune végétation ne puisse s'y développer et telle que le sol ne puisse former une croûte superficielle (DUBE, 1975).

Ce modèle empirique établi à partir du traitement statistique des résultats de nombreuses mesures en parcelles expérimentales menées sur plus de 20 ans exprime les pertes en sol comme le produit de différents facteurs selon la formule (KHALI *et al.*, 2016):

$$A = K * R * L * S * C * P$$

A est la **perte de sol** due à l'érosion et constatée par unité de surface pendant une période de temps déterminée. A est exprimé dans les mêmes unités que K.

R est appelé facteur pluie ou **indice d'érosivité ou facteur de pluviosité**. Il a été défini comme le produit de l'énergie de la pluie par son intensité maximum en 30 minutes. Il peut aussi être considéré comme l'indice moyen annuel d'érosion par la pluie. Ainsi, ont été dressées des cartes d'iso-érosion hydraulique pour le sud-est des Etats-Unis. Deux seuils empiriques ont été adoptés aux Etats-Unis, l'un associé à une hauteur de pluie de 12,7 mm au-dessous duquel les précipitations ne sont pas pris en compte en considérant que leur indice d'érosivité est faible, et l'autre qui retient les pluies de 6,35 mm tombées en 15 minutes donc d'intensité supérieure à 25.4mm/h sur une période de 15 minutes. Ce facteur s'exprime ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$)

K est appelé le facteur sol et caractérise **l'érodabilité** de ce sol. Elle peut être définie comme la susceptibilité du sol à l'érosion et est établie par rapport à une parcelle standard, évaluée en tenant compte de la texture, de la teneur en matière organique, de la structure et de la perméabilité du sol sans tenir compte du couvert végétal et des pratiques culturales. Il a été établi après le travail sur 8 sols limoneux et varie de 0,58 à 1,12T/ha suivant les types de sol rencontrés. Pour le calculer, on utilise des abaques prévus à cet effet. Il s'exprime en $t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ (KHALI *et al.*, 2016).

S * L Le facteur **pen**te et **déclivité** tient compte à la fois de la longueur de la pente (L) et de son inclinaison (S). Dans la pratique, les deux facteurs de pente, L et S sont combinés en un seul facteur topographique qui permet d'évaluer globalement l'influence de la pente sur la vitesse de l'érosion. Des formules, tables et abaques permettent de quantifier les valeurs du facteur topographique. Ce facteur est adimensionnel.

C Le facteur de **couverture végétale** est défini dans l'USLE comme le rapport entre la perte de sol d'une parcelle cultivée dans des conditions définies et la perte de sol correspondante d'une parcelle cultivée en jachère nue continue. C'est une mesure de l'efficacité relative des systèmes de gestion des sols et des cultures dans la prévention ou la réduction de la perte de sol (KHALI *et al.*, 2016).

La valeur du facteur C est conditionnée par plusieurs variables et leur interaction nécessite des renseignements sur :

- la voûte de verdure (feuilles et branches qui interceptent les gouttes de pluie et dissipent une partie de leur force érosive) ;
- la couverture végétale (résidus de culture et végétation vivante sur la surface du sol), la biomasse du sol (toute la matière végétale dans le sol, les résidus aident à améliorer l'écoulement de l'eau dans le sol et la capacité de rétention du sol) ;
- le travail du sol (type, période et fréquence de travail du sol ce qui influe sur la porosité, la rugosité de surface et la compaction du sol).

Chaque variable est traitée comme un sous facteur et C est le produit de ceux ci.

Des tables fournissent les valeurs des facteurs C pour les principales cultures et rotations pratiquées aux Etats-Unis (WISCHMEIER et SMITH, 1978). Dans une rotation triennale traitée classiquement, la valeur du facteur C est essentiellement contrôlée par les ameublissements, les traces de passage d'outils, l'évolution du couvert au cours du cycle végétatif des cultures et après celles ci, par la quantité de résidus laissés en surface. Ce facteur varie de 1 sur sol nu à 1/1000^{ème} sous forêt, 1/100^{ème} sous prairies et plantes de couverture, 1 à 9/10^{ème} sous cultures sarclées. Ce facteur est également adimensionnel (KHALI *et al.*, 2016).

P le facteur des **pratiques de soutien** (ou pratiques culturelles anti-érosives) est une mesure des effets des pratiques visant à modifier le profil, la pente ou la direction de l'écoulement du ruissellement en surface et à réduire ainsi l'érosion. On y trouve la culture en pente

transversale, la culture en courbes de niveau, la culture en bandes alternées, l'aménagement de terrasses et l'aménagement de voies d'eau gazonnées.

C'est le rapport de la perte de sol observée sur le terrain étudié travaillé mécaniquement d'une certaine manière et protégé contre l'érosion d'une quelconque façon avec celle qui aurait lieu si le terrain était labouré fréquemment dans le sens de la plus grande pente (suivant les pratiques et suivant la pente). Il varie entre 1 sur sol nu sans aucun aménagement antiérosif à $1/10^{\text{ème}}$ lorsque sur une pente faible, on pratique le billonnage. Ce facteur est adimensionnel.

L'équation a été réactualisée en 1978 et a été rendue plus accessible aux utilisateurs grâce notamment à des tableaux de données ainsi qu'à des graphes rendant son utilisation plus conviviale. Avec cette équation, les services américains de l'agriculture peuvent établir des tolérances ou des valeurs seuils de perte de terre pour des sols ou des systèmes culturaux donnés. Le poids des différents facteurs a été évalué à partir du traitement statistique d'un grand nombre de mesures réalisées et d'années sur des parcelles standardisées de dimensions réduites (KHALI *et al.*, 2016).

Si une utilisation appropriée des paramètres de l'équation permet d'avoir une idée de la quantité moyenne de terre exportée pour différents types d'occupation du sol, cette équation a ses limites, liées aux hypothèses de base et à ses objectifs. Elle permet de prédéterminer les pertes en terre annuelles moyennes pour une parcelle donnée, dans des conditions bien définies.

En résumé, ce modèle présente un certain nombre de points faibles :

- inaptitude à estimer les pertes en terre sur une courte période (saison ou épisode pluvieux isolé) ;
- il considère les facteurs de l'érosion comme indépendants, alors qu'il existe des nombreuses interactions entre ceux-ci ;
- il ne s'applique qu'à l'érosion en nappe puisque la source d'énergie est la pluie. Il ne s'applique jamais à l'érosion linéaire ni à l'érosion en masse.

Cette brève revue des différents paramètres de l'USLE montre qu'il est bien difficile de prévoir de manière fiable le risque érosif sans mesures aux champs. Néanmoins l'équation reste un outil intéressant dans certaines conditions mais qu'il convient d'utiliser avec précaution sans vouloir l'extrapoler systématiquement (KHALI *et al.*, 2016).

5.3.3.2. *Modèle RUSLE*

L'équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE), élaborée comme version améliorée provisoire de l'USLE, vise à combler le fossé entre ce qui est maintenant considérée comme une technologie désuète (c'est-à-dire, l'USLE) et la nouvelle génération de modèles basés sur les processus comme le modèle WEPP (Water Erosion Prediction Project) qui est encore au stade expérimental (WALL *et al.*, 2002).

La RUSLE utilise la même équation empirique que l'USLE. Cependant, de nouvelles méthodes sont introduites pour évaluer les valeurs des divers facteurs de l'USLE. Ces nouvelles méthodes tiennent compte des données quantitatives sur la variation saisonnière du facteur d'érosivité des sols (K), les relations entre les pentes irrégulières (LS) et la gestion des récoltes (C) et l'incidence sur l'érosion.

Contrairement à l'USLE, les calculs présentés dans la RUSLE sont informatisés tout comme les bases de données, qui renferment des renseignements sur l'érodabilité du sol (K) et sur le climat (R) de tous les principaux sols et villes des États-Unis mais non du Canada (WALL *et al.*, 2002).

Ainsi selon RENARD *et al.*, (1997) la version RUSLE de l'équation de USLE s'écrit :

$$A = K * R * (\lambda/72.6)^m(65.41 \sin^2\theta + 4.56 \sin\theta + 0.065) * C * P$$

$$LS = (\lambda/72.6)^m(65.41 \sin^2\theta + 4.56 \sin\theta + 0.065) \text{ où}$$

λ est la longueur de la pente en pieds

θ est l'angle de pente $m = 0,5$ si le % de pente est $>$ ou $= 5$, $m = 0,4$ sur les pentes comprises entre $3,5$ et $4,5$ %, $m = 0,3$ sur les pentes de 1 à 3 %, et $0,2$ sur les pentes uniformes de moins de 1 %.

5.3.3.3. *Modèle MUSLE*

La formule MUSLE de WILLIAMS (1975) est une version modifiée du modèle USLE et permet d'attribuer la part de l'érosion à chaque crue. La perte moyenne en sol pour une crue est une fonction multiplicative du volume de la crue (V en m^3), le débit de pointe de la crue (Q_p en m^3/s), l'érodabilité du sol (K), l'indice de pente (S), la longueur de pente (L), le couvert

végétal (C) et les pratiques culturales (P). La formule de Williams est estimée de la forme suivante :

$$A = 11,8 * (V * Q_p) 0,56 * K * L * S * C * P$$

Le croisement des cartes synthétiques des différents facteurs du modèle MUSLE ainsi que les volumes d'eau ruisselé et les débits maximums instantanés dans chaque sous-bassin ont permis de calculer la quantité de sédiments produite par sous bassin en t/an.

5.3.3.4. *Modèle MEDALUS*

MEDALUS est l'acronyme de Mediterranean Desertification and Land Use. C'est un projet de l'Union Européenne pour évaluer, modéliser et comprendre les phénomènes de désertification qui affectent de manière croissante la zone méditerranéenne, y compris dans sa partie nord (JOACHIM *et al.*, 1995), dans l'Union européenne, à cause des pratiques agricoles et d'aménagement du territoire, mais aussi probablement à cause du contexte de dérèglement climatique. Ce modèle s'est également expérimenté avec succès dans les pays du bassin méditerranéen, notamment dans les zones montagneuses du Maroc couvrant approximativement 16 000 km² (BOUABID *et al.*, 2010).

L'enjeux dans ce projet, était de permettre la survie des populations des régions méditerranéennes, par la restauration, la protection et une gestion durable des ressources en sol, en eau et par la protection des écosystèmes assurant des services vitaux pour les populations (KEPNER, 2006).

La modélisation développée dans le cadre du projet MEDALUS prévoit les interactions entre végétation des versants, l'hydrologie et les changements climatiques, à partir de l'état connu du sol et des données connues d'occupation du sol et usages des terres.

Ce modèle se compose de quatre sous-modèles :

- une modélisation de l'atmosphère et des prévisions en matière d'évapotranspiration ;
- une modélisation de la végétation (simulation de la croissance des plantes, avec jusqu'à quatre types fonctionnels) ;
- une modélisation simulant les surfaces d'infiltration, le ruissellement et l'érosion ;

- une modélisation simulant le mouvement des eaux souterraines dans le sol et les changements dans les propriétés physiques du sol (résultant de l'érosion ou de la restauration de l'humus, de l'apport de matières organiques...)

Les résultats de cette étude ont confirmé que l'occupation des sols influence fortement le ruissellement et l'érosion. Par conséquent ce modèle pouvait être appliqué dans la région du Tonkpi caractérisée par une topographie de montagne. MEDALUS a été appliqué à différents sites représentant une variété de paysages qui sont soumis à un certain nombre d'utilisations du sol représentatives de la région méditerranéenne. Il s'agit de terres agricoles plantées soit de céréales pluviales, de vignes, d'oliviers, de plantations d'eucalyptus ou de végétation naturelle (arbustes). Les résultats ont montré que l'utilisation des sols peut avoir un effet important sur le ruissellement et l'érosion des sols (ADELIA *et al.*, 2011).

D'après la méthode MEDALUS (GOODESS et PALUTIKOF, 1994), la sensibilité à la désertification est déterminée par l'indice ISD (Indice de Sensibilité à la Désertification) résultant de la combinaison de quatre sous-indices :

- l'indice de la qualité du climat (IQC),

La pluviométrie participe activement à la dégradation des espaces nus et à l'érosion des sols par le ruissellement en nappe. En effet, elle détache les particules du sol par la force du ruissellement mais aussi par l'effet « splash » ou la force d'érosivité des gouttes d'eau.

Depuis de nombreuses décennies, la corrélation entre les pluies torrentielles et l'intensité de l'érosion est observée. Les travaux de FOURNIER (1969), a montré que l'eau était le facteur causal de l'érosion du sol. En effet, les gouttes de pluie à travers l'action de l'énergie cinétique, exercent un impact sur les particules du sol. C'est ainsi que les études expérimentales sur parcelles ont montré que l'intensité des pluies exerçait à la fois un effet primaire et un effet secondaire (GALEVSKI et RENEUVE, 1955). L'effet primaire est défini comme étant l'action mécanique des gouttes pluviales produites sur le sol alors que l'effet secondaire se traduisait par la puissance de ruissellement sur les versants.

- l'indice de la qualité de sol (IQS),
- l'indice de la qualité de la végétation (IQV), et
- l'indice de la qualité de système d'aménagement des terres (IQSA).

Ce qui donne l'équation ci-dessous :

$$\mathbf{ISD = (IQC \times IQS \times IQV \times IQSA)^{1/4}}$$

Selon ce modèle, la superposition multiplicative des quatre indices de qualité sous format Raster, permet l'obtention de la carte de vulnérabilité à la désertification, où en chaque point d'une zone donnée, il est possible de déterminer la susceptibilité à la désertification.

Cette formule bien que développée pour la modélisation de la désertification dans les pays de la méditerranée, a été également appliquée pour l'évaluation de l'érosion hydrique par plusieurs auteurs. Dans ce cadre l'équation devient :

$$\mathbf{ISE = (IQC \times IQS \times IQV \times IQA)^{1/4}}$$

Où ISE : l'indice de sensibilité à l'érosion et IQA : l'indice de qualité anthropique.

Les classes de sensibilité décrivent le comportement de l'érosion d'une zone donnée. En effet, la classe faible représente les espaces où l'érosion est moins accentuée. Celle modérée représente les lieux où l'érosion est moyenne sur le sol. La classe forte met en relief les espaces fortement érodibles.

Les différents indices de qualités du modèle MEDALUS sont classés en deux grands groupes de facteurs en fonction de l'intervention directe de l'homme (CHANDOUL et al., 2014). Ainsi, l'on distingue les facteurs environnementaux qui regroupent l'indice de la qualité du climat et l'indice de la qualité du sol qui traduisent respectivement les influences des facteurs climatiques et ceux du sol dans le processus de l'érosion hydrique.

Les facteurs anthropiques renferment quant à eux, l'indice de qualité de la végétation et l'indice de qualité anthropique qui expriment respectivement les impacts des facteurs de la végétation et des facteurs d'aménagement des terres.

6.1. Données et documents utilisés pour l'évaluation de l'érosion hydrique

Trois types de données ont été utilisés dans cette étude. Il s'agit d'images satellitaires, de données cartographiques et démographiques.

Les images satellitaires étaient constituées d'images d'indice de végétation EVI (Enhance Vegetation Index) du satellite MODIS du 1 au 15 Décembre de 2001 à 2017, de quatre images Landsat 8 du 11 février de la scène 198-55 de 2016, des images ASTER GDEM et des images de simulations pluviométriques issues de TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission).

- Les images MODIS de moyenne résolution spatiale (250 m), présentent un intérêt particulier à travers leur indice de végétation EVI issue d'une synthèse de 15 jours d'observation. Ces images sont prises dans les 2 dernières semaines du mois de Décembre (saison sèche), période où les nuages sont les plus dissipés. Elles ont l'avantage d'une très haute résolution temporelle qui permet une facilité de suivi régulier de l'état de la végétation. De ce fait, il est plus aisé d'appréhender les cultures pratiquées et les types d'occupation du sol dans une zone indiquée avec ces images. Elles ont servi à définir l'indice de la qualité de la végétation à travers l'occupation du sol et le coefficient de variation de la végétation.
- Les images Landsat 8, d'une résolution spatiale de 30 m, ont permis d'obtenir à partir de son capteur 10, les données de température de surface du sol qui sont des paramètres bioclimatiques importants de l'état phénologique de la végétation.
- Les images ASTER GDEM, d'une résolution spatiale de 30 m, sont des Modèles Numériques de Terrain (MNT) qui permettent la représentation du relief et donc de la topographie. A partir de ces images ont été représentées les altitudes de la région qui d'ailleurs est l'espace le plus accidenté du pays. En outre, les classes de pentes ont été générées à partir de ce MNT.
- Les données cartographiques sont composées de la carte pédologique de la Côte d'Ivoire de DABIN *et al.* (1960) et des couches cartographiques géoréférencées des

limites de la Côte d'Ivoire, de la région du Tonkpi, de son réseau routier, du découpage administratif des Sous-préfectures, de l'habitat (villages).

- Les données alphanumériques sont constituées des données démographiques de la région du Tonkpi, issues du recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2014, obtenues auprès de l'Institut National de la Statistique (INS).

6.2. Méthodes d'évaluation des facteurs d'érosion

La méthodologie suivie dans cette étude s'est appuyée sur le modèle MEDALUS. Le choix de ce modèle se justifie par la difficulté à acquérir les instruments de mesures directes sur le terrain du fait de leurs coûts très élevés.

Par ailleurs, les conclusions sur l'applicabilité du modèle USLE en Afrique par ROOSE (1994) après un nombre relativement important de mesures de l'érosion en parcelles expérimentales (plus de 560) en Afrique de l'ouest, du nord et du centre révèlent que :

- le modèle USLE et sa variante RUSLE ne s'appliquent qu'à l'érosion en nappe et rigole (ROOSE E., 1977), sur une pente simple dans les zones de collines à l'exclusion des zones montagneuses où dominent les glissements de terrain et l'érosion linéaire (rigoles, ravines).

- Ce modèle est basé sur des données provenant de petites parcelles (100 m²), des champs ou des bassins versants de surface très limitée (quelques hectares): il se pose donc des problèmes d'échelle lorsqu'on tente d'estimer des valeurs régionales d'érosion (ROOSE E., 1977).

- Enfin, ce modèle néglige les interactions entre les différents facteurs (ROOSE E. 1994). Or, ces interactions se sont avérées très nombreuses. Ainsi, il existe une grande différence de réaction de sol à l'agressivité des pluies en fonction de la pente, selon que le sol est argileux (rigoles) ou sableux (nappes) et selon l'état de surface du sol (rugosité due aux façons culturales, humidité préalable du sol, gestion des résidus de culture).

Au regard des limites du modèle USLE à s'appliquer pour l'évaluation de la sensibilité à l'érosion hydrique dans la région montagneuse du Tonkpi, le modèle MEDALUS a été choisi car il satisfait à ses limites (BOUABID et al., 2010, ADELIA et al., 2011).

Le modèle MEDALUS identifie la sensibilité à l'érosion à partir de la moyenne géométrique d'indices de qualité issus du milieu et de l'action de l'homme (sol, climat, végétation et système d'aménagement du territoire) (TRA, 2013).

Ces paramètres sont susceptibles d'agir sur le phénomène de dégradation du sol décrit par différents auteurs (FLORET et LE FLOC'H, 1975 ; LE HOUEROU, 1992 ; AIDOUUD et TOUFFET, 1996 ; KHELIL, 1997 ; JAUFFRET, 2001; ESCADAFAL, 2002 ; SALAMANI et HIRCHE, 2006 ; HIRCHE *et al.*, 2007).

L'étude de la vulnérabilité des sols est basée sur l'analyse de quatre facteurs principaux : la qualité du sol, la qualité anthropique, la qualité de la végétation et la qualité climatique.

6.2.1. Indice de la qualité climatique (IQC)

L'indice de qualité du climat (IQC) donné par l'équation 4, est obtenu en croisant la couche des précipitations totales (PP) et la couche de température de surface (T) selon l'équation suivante :

$$IQC = (PP \times T)^{1/2} \quad (1)$$

Le climat est l'un des principaux facteurs influençant la dégradation des sols. Sa qualité est évaluée en employant les paramètres qui influencent la disponibilité de l'eau qui sont la quantité des précipitations et la température du sol (MOKHTARI, 2016). La spatialisation des données climatiques est nécessaire pour dériver la carte relative à la qualité du climat.

La carte des températures de surface (T) a été réalisée en utilisant les bandes thermiques (bande 10 et 11) des images LANDSAT 8. Cela a permis de faire ressortir une carte des températures de surface de la zone d'étude sous forme de trois classes: (1) Inférieure à 24° C, (2) De 24 – 30° C, (3) Supérieure à 30° C.

Les précipitations utilisées pour caractériser l'ensemble de la région sont les moyennes annuelles de la période de 2000 à 2014. Les trois classes retenues renferment les précipitations inférieures à 1200 mm (faible), celles comprises entre de 1200 et 1500 mm (moyenne) et celles supérieures à 1500 mm (forte).

6.2.2. Indice de la qualité du sol (IQS)

Cet indice exprime la susceptibilité au détachement ou à l'enlèvement des particules et sables fins du sol sous l'effet mécanique des vents, de la pluie et du ruissellement. Les facteurs de

résistance du sol sont indispensables pour l'étude de l'érosion hydrique. Trois paramètres permettent de les définir : les paramètres structuraux ((agrégation en mottes, fissures, porosité, compacité, teneurs en eau, perméabilité), les paramètres texturaux (granulométrie, plasticité) et les paramètres physico-chimiques (argilosité, richesse ionique de l'eau dans le sol).

L'influence de la qualité du sol sur la sensibilité à l'érosion du sol est gouvernée par la texture du sol (T) et par la pente du terrain (P_e). Elle est décrite par l'équation 2.

$$IQS = (T \times P_e)^{1/2} \quad (2)$$

6.2.2.1. *Elaboration de la carte des pentes (P)*

En partant de la numérisation de la carte pédologique de PERRAUD et DE LA SOUCHERE (1971), nous avons classifié, puis codifié les différentes unités de sols (Tableau XVI). La carte des pentes générée à partir du modèle numérique de terrain (MNT) a été reclassée en se basant sur la classification de MAYER (1990), et transformée en carte de vulnérabilité à l'érosion des terrains en fonction de l'inclinaison de la pente (Tableau XIV).

Tableau XIV : Classes des pentes selon les normes de MEDALUS

Classes	Qualité	code
< 5 %	Très faible	1
5 à 15 %	Faible	1,33
15 à 25 %	Moyenne à forte	1,66
> 25 %	Très forte	2

Source : BACHAOUI *et al.* (2007), TRA (2013).

6.2.2.2. *Elaboration de la carte de résistance des sols à l'érosion (Texture du sol)*

La texture est une des propriétés fondamentales des sols et permet d'évaluer leur comportement vis-à-vis de l'eau et des contraintes biophysiques. Ainsi, les travaux de DABIN *et al.*, (1960) ont permis d'établir la texture des sols en fonction de leur prépondérance en éléments tels que les argiles, limons et sables (tableau XV).

Par ailleurs, en tenant compte l'importance ces différents éléments dans la cohésion des particules du sol et de leur stabilité structurale, des indices ou codes ont été attribués à chaque type de sol (DUBE, 1975). En effet, les particules argileuses à partir de 30% de composition du sol assure une forte cohésion des particules et par ricochet une forte stabilité structurale. Ce qui veut dire que les sols ferralitiques sur roche granitique (indice 1).ayant une texture

équilibrée avec près de 33% d'argile ont une résistance à l'érosion hydrique plus importante que les sols ferrallitiques moyennement lessivés sur granite (indice 1,33).

Les sols ferrallitiques lessivés sur schistes ayant une texture avec une prédominance des éléments grossiers (sable) ont une faible cohésion des particules et par conséquent une faible stabilité structurale (indice 1,66). L'indice de 2 a été aux ferrisols de types au regard de leur texture.

Tableau XV : Caractéristiques texturales des différents types de sol

Type de sol	Description	code
Sols ferrallitiques sur roche granitiques	Equilibrée	1
Sols ferrallitiques lessivés sur roches granitiques	Fine	1,33
Sols ferrallitiques lessivés sur schistes	Grossière	1,66
Ferrisols de types montagnards	Très Grossière	2

Source : DABIN *et al.* (1960).

6.2.2.3. *Elaboration de la carte de l'indice de qualité du sol*

Déterminé par la multiplication des facteurs pentes et types de sol, l'indice de qualité du sol est très capital pour la détermination de la vulnérabilité à l'érosion dans une région. En effet, le croisement des cartes de ces deux permet la dérivation de la carte de l'indice de qualité des sols d'une région donnée.

Par ailleurs, il faudra noter que cet indice exprime la qualité du sol du point de vue vulnérabilité à la l'érosion (évaluée uniquement sur la base de la texture du sol et la pente) et non sa qualité intrinsèque du point de vue aptitude agronomique du sol.

En effet, le sol étant le premier concerné par l'érosion, ces aptitudes additionnées aux valeurs des pentes conditionnent l'agressivité de l'écoulement d'eau.

La combinaison des deux cartes permet d'obtenir la carte d'indice de la qualité des sols.

6.2.3. **Indice de la qualité anthropique (IQA)**

La qualité anthropique résulte de la combinaison de trois facteurs : la densité de population (D_P), la densité des routes (D_R) et la densité des localités (L) (équation 3).

$$IQA = (D_P \times D_R \times L)^{1/3} \quad (3)$$

L'indice de densité de la population, évalué par la densité moyenne par sous-préfecture a été extrait des données issues du recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2014. Toutes ces données ont été subdivisées en classes et codées (Tableau XVI). La carte des

densités des localités a été réalisée par l'application d'une grille régulière de 20 km² sur la carte de la région et par comptage approximatif des localités. Quant à la carte des densités des routes, elle a été réalisée par l'application d'une grille régulière de 20 km² sur la carte de la région et par comptage approximatif des intersections des routes dans chaque grille.

6.2.4. Indice de la qualité de la végétation (IQV)

L'IQV est quant à lui obtenu par combinaison du Coefficient de variation de la couverture végétale (*CV*) et de l'occupation du sol actuel de la zone d'étude (*OCS*) (équation 3).

$$IQV = (CV \times OCS)^{1/2} \quad (3)$$

Cet indice est dérivé comme étant la moyenne géométrique des caractéristiques de la végétation, à savoir les couches relatives au coefficient de variation de la couverture végétale (*CV*) et l'occupation du sol actuel de la zone d'étude.

Pour élaborer la carte du Coefficient de variation de la couverture végétale, nous avons utilisé les images satellites MODIS acquises de 2001 à 2017 et ayant une résolution spatiale de 250 mètres en projection UTM et ortho rectifiées. Ces images ont été compilées pour avoir une seule image qui a servi aux traitements statistiques en calculant le coefficient de variation de la couverture végétale

La carte d'occupation du sol a été établie à partir de la classification de l'image LANDSAT TM (2015) de la région du Tonkpi. Cette image géoréférencée et intégrée à d'autres couches d'informations vectorielles (cartes de terrain, carte raster), au sein d'un système d'information a permis d'obtenir la carte de l'occupation du sol. Cette carte, sous forme d'image, définit la répartition spatiale des classes dominantes dans l'occupation du sol de la région. La procédure utilisée est une classification par l'analyse visuelle des compositions colorées (OLI 6-5-4). Elle a été suivie par l'extraction manuelle des thèmes carto-topographiques (réseau hydrographique, routes, habitat, etc.) et par la délimitation des autres classes. Par la suite, la validation de la nomenclature de certaines classes proposées a été faite sur le terrain. Les compositions colorées ont permis de discriminer sept classes de l'occupation du sol.

Le tableau XVI fait la synthèse des différents indices de qualité de l'érosion hydrique et facteurs, des classes, des descriptions et des codes correspondants.

Tableau XVI : Classification des facteurs de vulnérabilité des terrains à l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi

Indice	Facteur d'érosion	Classe	Description	Code
Indice de qualité du sol	Texture du sol	1	Equilibré	1
		2	Fine	1,33
		3	Grossière	1,66
		4	Très Grossière	2
	Pente	1	<5	1
		2	5-15	1,33
		3	15-25	1,66
		4	>25	2
Indice de qualité anthropique	Densité de population	1	<40	1
		2	40-100	1,33
		3	100-200	1,66
		4	>200	2
	Densité des localités	1	<8	1
		2	8-16	1,5
		3	>16	2
	Densité des routes	1	<8	1
		2	8-20	1,5
		3	>20	2
Indice de qualité de la végétation	Coefficient de variation	1	4,5	1
		2	10-20	1,5
		3	20-75	2
	Couverture végétale	1	Forêt et eau	1
		2	Forêt dégradée	1,5
		3	Savane culture	2
Indice de la qualité climatique	Pluviométrie	1	<200	1
		2	1200-1500	1,5
		3	>1500	2
	Température	1	<24	1
		2	24-30	1,5
		3	>30	2

Source : BACHAOUI *et al.* (2007), TRA (2013), CHANDOUL *et al.* (2014), ABAOUI *et al.* (2005), LAHLOI *et al.* (2017)

6.2.5. Elaboration de la carte de sensibilité à l'érosion

La figure 34 résume la procédure générale appliquée pour la cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région du Tonkpi. Le modèle MEDALUS utilisé identifie les zones écologiquement sensibles (KOSMAS *et al.*, 1999) et implique le sol, la végétation, les facteurs climatiques et de gestion (BENABDERRAHMANE et CHENCHOUNI, 2010).

Chaque facteur est représenté par un indice qui est calculé par la combinaison de sous-indices sous forme de produit matriciel dans un SIG. La carte de sortie correspond aux zones de sensibilité à l'érosion. À partir des connaissances actuelles sur les différents types de fonctionnements érosifs, les facteurs retenus sont : la qualité des sols, la qualité anthropique, la qualité de la végétation, et la qualité climatique pour aboutir à la carte de sensibilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols du Tonkpi selon l'équation de l'indice de sensibilité à l'érosion.

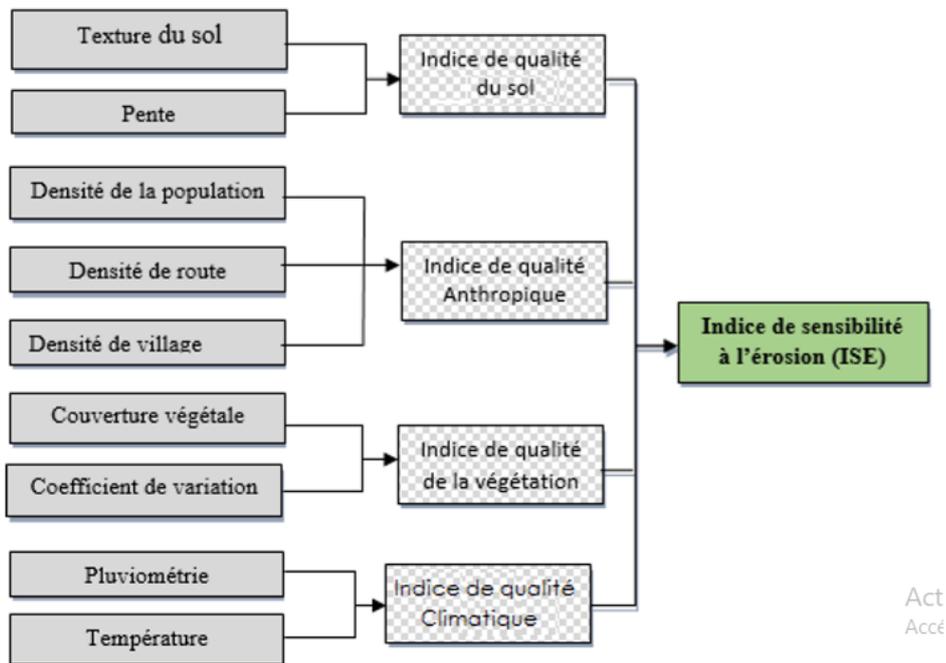


Figure 34 : Schéma méthodologique des étapes suivies pour la réalisation de l'indice de sensibilité à l'érosion (ISE)

Chapitre 7 : Résultats et discussion de l'évaluation de l'érosion hydrique

Ce chapitre expose les résultats de l'évaluation qualitative de l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi, avant d'en faire une discussion.

7.1. Résultats de l'évaluation de l'érosion hydrique

7.1.1. Résultats de l'indice de qualité climatique (IQC)

La présentation des résultats sur l'indice de la qualité climatique (IQC) dans la région du Tonkpi comporte les résultats concernant les sous facteurs de la température et de la pluviométrie.

7.1.1.1. Carte des températures de surface (T)

L'utilisation des bandes thermiques (bande 10 et 11) des images LANDSAT 8, ont permis de faire ressortir une carte des températures de surface de la zone d'étude (Figure 35). Ces traitements ont permis de générer trois classes de température de surface:

- les températures inférieures à 24° C ;
- les températures comprises entre 24 et 30° C ;
- les températures supérieures à 30° C.

On note à travers les résultats statistiques (Tableau XVII) que dans la région du Tonkpi les classes de températures moyennes occupent une proportion de 50,06 % soit une superficie 564 271,62 ha. Elles se localisent au Centre et au nord-ouest de la région. Par contre, les classes de températures fortes sont localisées au Nord-est c'est-à-dire à l'est du département de Biankouma. Elles représentent 16,59 % de la surface totale.

Tableau XVII : Statistique de la température de surface de la région du Tonkpi

Classes	Description (° C)	Qualité	Code	Pourcentage
1	< 24	Faible	1	32,69
2	24 - 30	Moyenne	1,5	50,06
3	> 30	Forte	2	16,59

Source : BACHAOUI *et al.* (2007), LAHLAOI *et al.* (2017)

Enfin, les zones de températures inférieures à 24 °C se localisent au sud de la région dans les départements de Danané et Zouan-hounien. Cette zone occupe une superficie de 368 500 ha et représente 33% de la région.

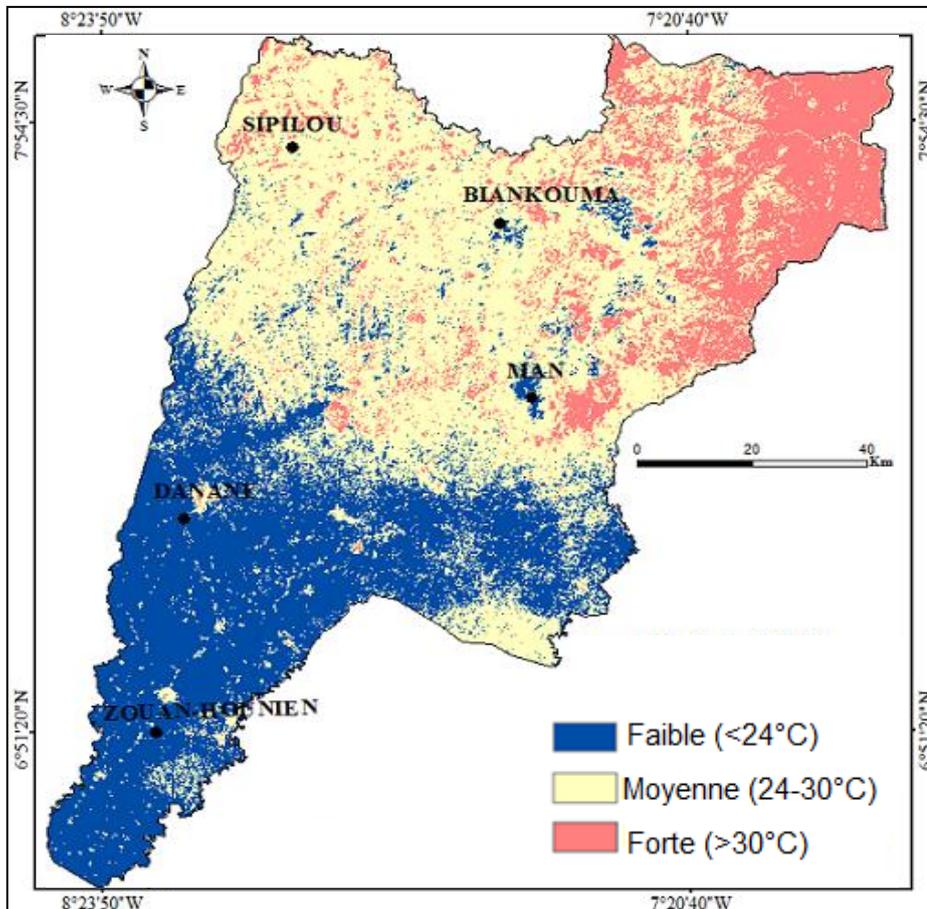


Figure 35 : Carte de températures de surface Source : Landsat 8 (2015)

7.1.1.2. Carte de la pluviométrie (PP)

Les précipitations utilisées pour caractériser l'ensemble de la région sont les moyennes annuelles de la période de 2000 à 2014. Les trois classes retenues (tableau XVIII) renferment la classe faible des précipitations inférieures à 1200 mm, celle de la classe moyenne caractérisée par des quantités de pluies comprises entre de 1200 et 1500 mm (moyenne) et celle de la classe forte ayant des quantités de pluies supérieures à 1500 mm. Les résultats des statistiques ont fait ressortir que la classe moyenne occupe 24,40% de la région d'étude, soit une superficie totale 273 163,95 ha.

Tableau XVIII : Statistique de la pluviométrie de la région du Tonkpi

Classes	Description (mm)	Qualité	Code	Pourcentage (%)
1	< 1200	Faible	1	75,54%
2	1200 - 1500	Moyenne	1,5	24,40%
3	> 1500	Forte	2	0,06%

Source : TRA (2013), LAHLAOI et al. (2017)

Par ailleurs, la classe de précipitations inférieures à 1200 mm occupe une superficie de 845 688,72 ha (75,54%) dans la région. Du point de vue spatial, on les rencontre dans les départements de Danané, de Sipilou et Biankouma (figure 36). Celle de la classe forte ayant des quantités de pluie supérieures à 1500 mm est localisée dans le sud du département de Zouan-hounien. Elle occupe une superficie de 671, 71 ha soit 0, 06% de la région du Tonkpi.

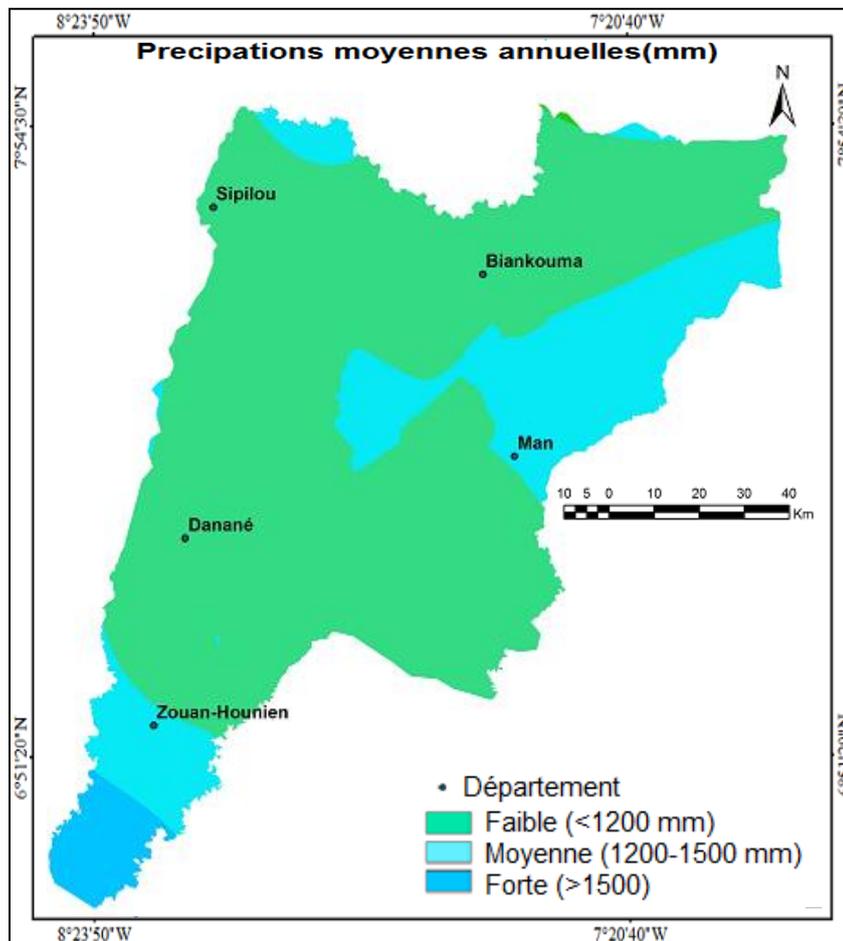


Figure 36 : Carte des précipitations moyennes annuelles de la région du Tonkpi

Source : Satellite TRMM

7.1.1.3. Carte de l'indice de qualité climatique

L'analyse du tableau XIX et la figure 37, indique que la majorité (66%) de la région du Tonkpi est en proie à une forte vulnérabilité à l'érosion liée aux facteurs climatiques (pluviométrie, température). On constate que l'influence des facteurs climatiques est faible sur 26% du territoire et se localise dans un carré autour de Danané et dans des îlots saupoudrés dans la région.

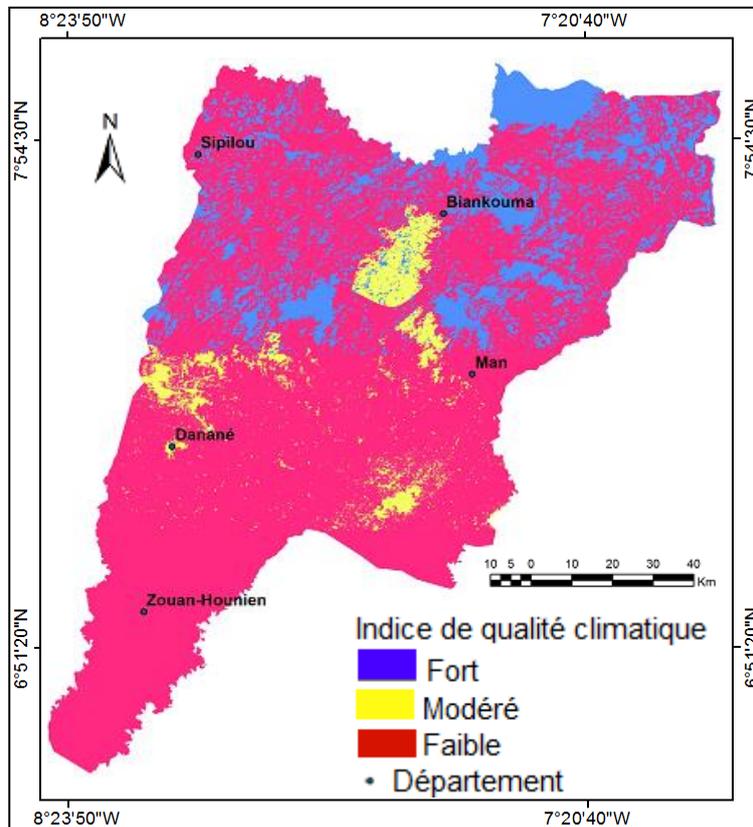


Figure 37 : Carte de l'indice de qualité climatique de la région du Tonkpi

La partie de la région faiblement sensible à l'érosion due aux facteurs climatiques couvre près de 178 575 ha et se situe au-dessus de Man dans les départements de Biankouma et Sipilou.

Tableau XIX : Répartition de l'indice de qualité climatique dans la région du Tonkpi

Classes IQC	Superficie (Ha)	Proportion (%)
Faible	178 575,93	15,96%
Modéré	56 756,97	5,07%
Fort	883 907,91	78,97%

7.1.2. Résultats de l'indice de la qualité du sol (IQS)

Les résultats sur l'indice de la qualité du sol (IQS) dans la région du Tonkpi concernent les cartes des sous facteurs de la pente et de résistance des sols à l'érosion.

7.1.2.1. Carte des pentes (P)

Comme le montre le tableau XX et la figure 38 les zones de pentes très faibles à faibles sont plus dominantes dans la région du Tonkpi. Elles se localisent au Nord-Ouest, Nord-Est, Sud et au Sud-Est de la région, dans les départements de Sipilou, de Zouan-hounien. Elles occupent une superficie de 767 453 ha soit 68,54 % de la zone d'étude.

Tableau XX : Superficies des classes des pentes selon les normes de MEDALUS

Classes	Qualité	Code	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
< 5 %	Très faible	1	324 609	29
5 à 15 %	Faible	1,33	442 844	39,55
15 à 25 %	Moyenne à forte	1,66	140 884,6	12,60
> 25 %	Très forte	2	211 350, 56	18,85

Source : BACHAOUI *et al.* (2007), CHANDOUL *et al.* (2014),

Les pentes fortes et très fortes occupent des superficies de l'ordre de 352 235, 62 ha et sont localisées au Centre de la région. On les trouve plus dans les départements de Biankouma, Man, et au Nord de Danané.

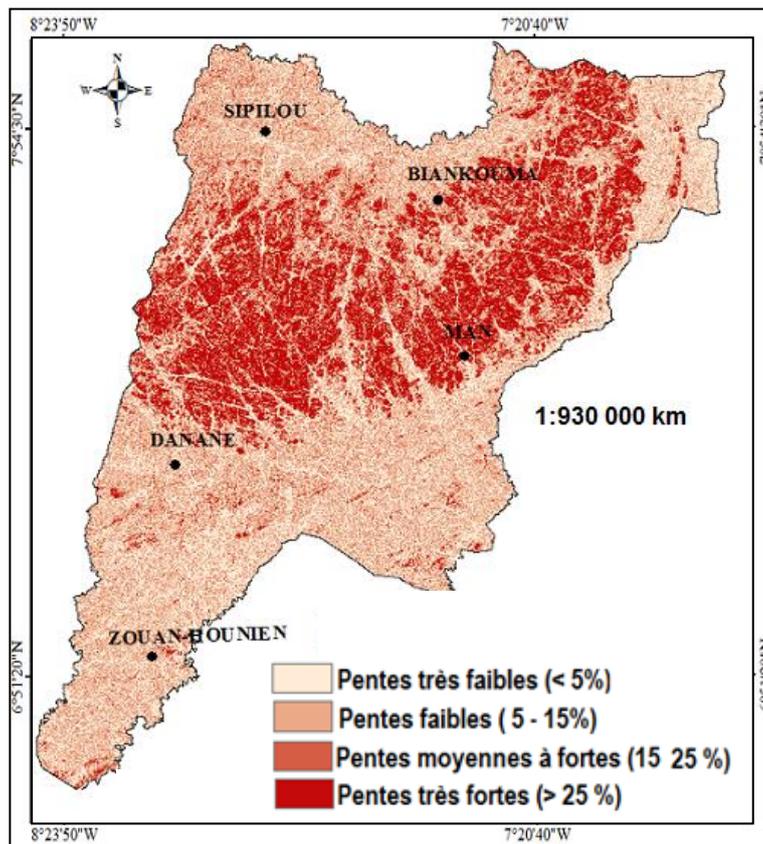


Figure 38 : Carte des pentes (%) de la région du Tonkpi

7.1.2.2. Carte de résistance des sols à l'érosion (Texture du sol)

La numérisation de la carte pédologique de PERRAUD et DE LA SOUCHERE (1971) a permis d'obtenir la carte pédologique de la région du Tonkpi (Figure 39).

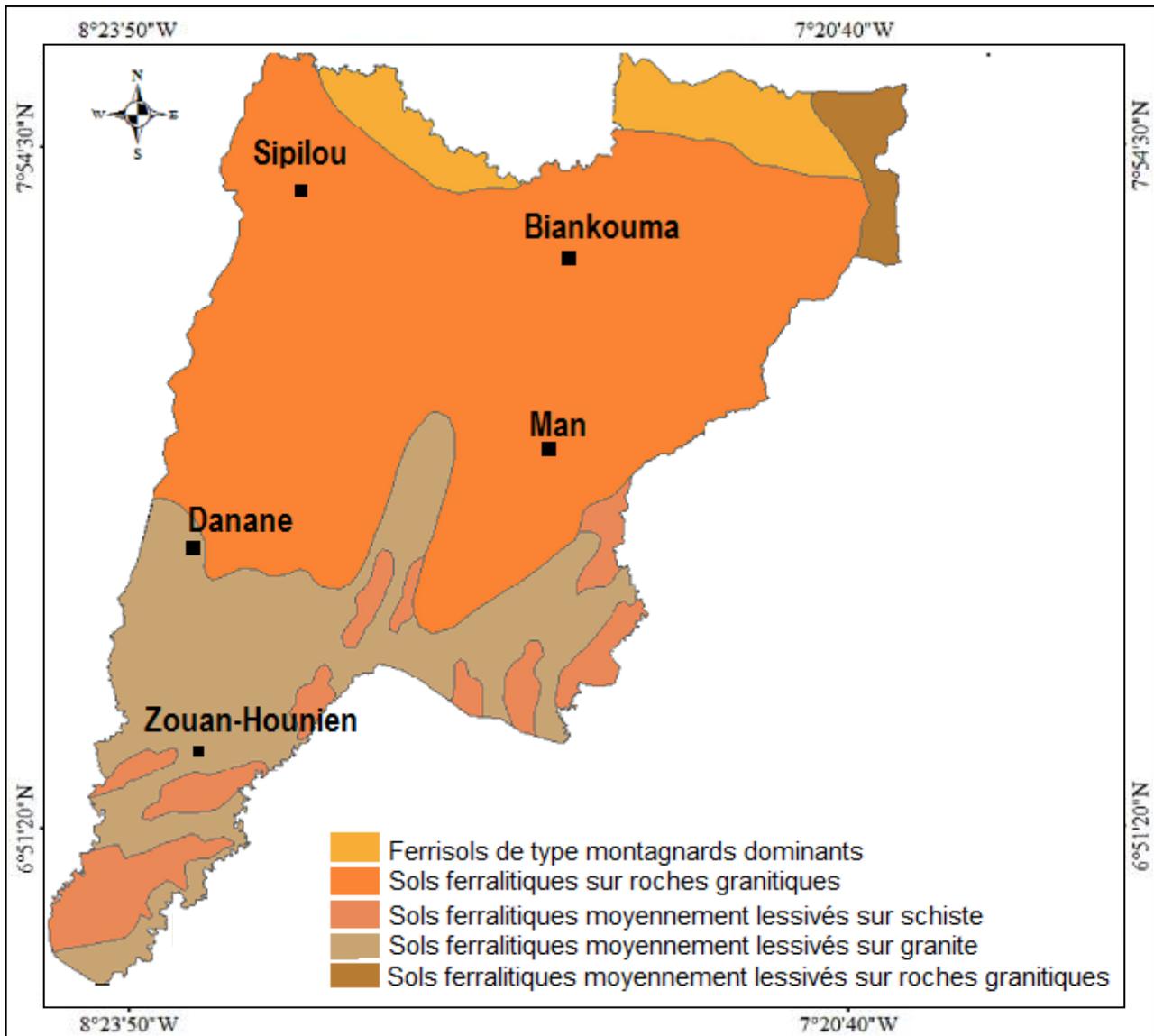


Figure 39 : Carte pédologique de la région de Tonkpi

Tableau XXI : Superficies des aptitudes culturelles des sols

Type de sol	Aptitudes culturelles	Description	Code	Superficies (ha)	Pourcent ages (%)
Sols ferrallitiques sur roche granitiques	Aptitude culturelle mauvaise	Equilibrée	1	682 958	60, 59
Sols ferrallitiques lessivés sur roches granitiques	Aptitude culturelle faible	Fine	1,33	280 140	24,76
Sols ferrallitiques lessivés sur schistes	Aptitude culturelle moyenne à bonne	Grossière	1,66	90 272	08
Ferrisols de types montagnards	Très bonne aptitude culturelle	Très Grossière	2	73 665	06,53

Source : TRA (2013), LAHLAOI et al. (2017), DABIN *et al.* (1960).

La mise en relation des caractéristiques pédologiques des sols (Tableau XXI) et leurs aptitudes culturelles (en annexe) retenues par l'approche MEDALUS a permis de produire la carte des textures de sols (figure 40). Cette carte et le tableau XXI montrent une dominance des sols qui ont une texture équilibrée avec plus de 60% de la surface de la région. Ces sols se localisent dans les départements de Man, Biankouma et Sipilou.

Les sols de texture grossière occupent 8% de la région et sont éparpillés dans le Sud de la région, dans les départements de Zouan-hounien, à l'est de Danané et au Sud de Man. Par contre, les sols de texture très grossière se localisent au Nord des départements de Sipilou et de Biankouma, et représentent près de 7%.

Enfin, les sols à texture fine occupent près de 25% de la zone d'étude et se localisent à la pointe Nord-est de la région, dans les départements de Danané, Zouan-hounien et au Sud de Man.

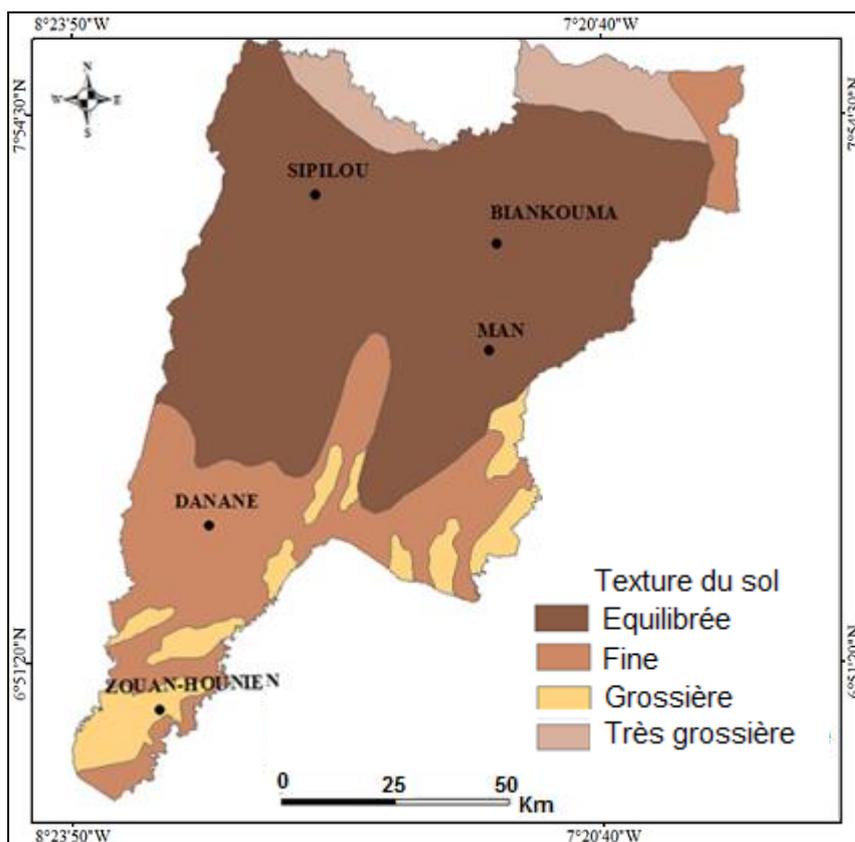


Figure 40 : Textures des sols de la région du Tonkpi Source : DABIN *et al.* (1960).

7.1.2.3. Carte de l'indice de qualité du sol

Déterminé par la multiplication des facteurs pentes et types de sol, l'indice de qualité du sol est très capital pour la détermination de la vulnérabilité à l'érosion dans la région.

Le tableau XXII ci-après présente les superficies correspondantes à chaque classe de cet indice. Par ailleurs, il faudra noter que cet indice exprime la qualité du sol du point de vue vulnérabilité à la l'érosion (évaluée uniquement sur la base de la texture du sol et la pente).

La Figure 41 indique que les sols modérément sensibles à l'érosion, constituées essentiellement des sols ferralitiques moyennement lessivés et les sols ferralitiques sur granite sont dominants dans la région. Ceux-ci représentent 74,25 % de la surface de la région du Tonkpi et occupent une superficie de 836 664,56 ha (Tableau XXI). On retrouve ces sols dans les départements de Zouan-hounien et de Man.

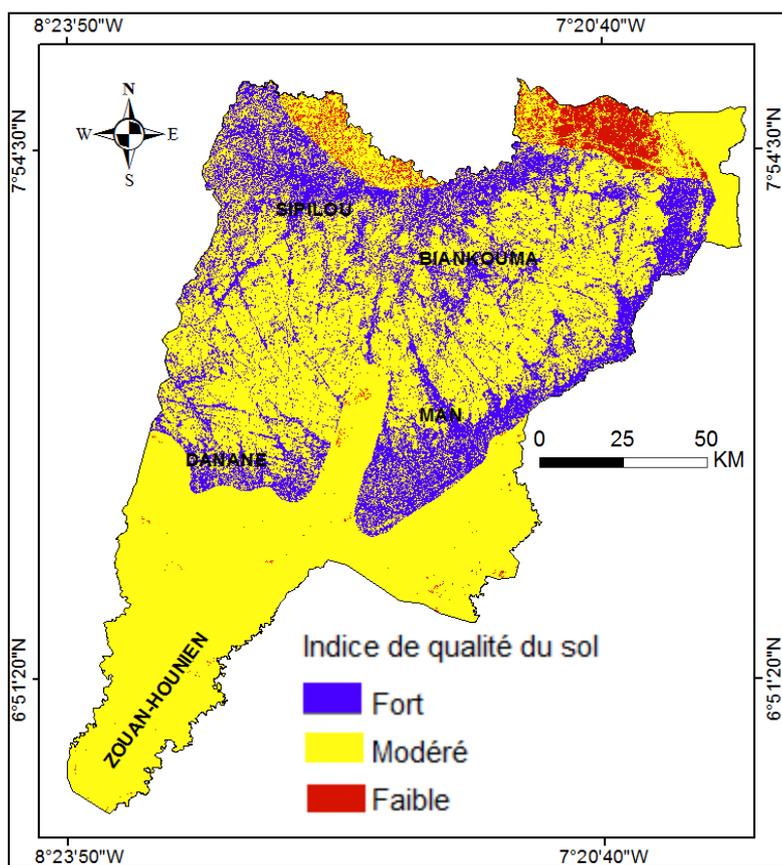


Figure 41 : Carte de l'indice de la qualité du sol dans la région du Tonkpi

Cependant, à l'extrême Nord du territoire, dans les départements de Biankouma et Sipilou, on trouve les sols les plus vulnérables à l'érosion du fait des pentes très fortes. Ils représentent 3,17 % de la surface de la région et sont essentiellement composés de ferrisols de type montagnard dominants (figure 42). Les sols à faible sensibilité à l'érosion, environ 22,6 % de région, sont des sols ferralitiques sur granites. On rencontre ces sols en certaines zones des départements de Sipilou, Biankouma et Danané.

Tableau XXII : Répartition de l'indice de qualité du sol dans la région du Tonkpi

Classes IQS	Superficie (Ha)	Proportion (%)
Faible	254 331,25	22,57
Modéré	836 664,56	74,25
Fort	35 740,19	3,17



Figure 42 : Flanc de montagne érodé à Man (TIESSE, 2017)

7.1.3. Résultats de l'indice de la qualité anthropique (IQA)

Les résultats sur l'indice de la qualité anthropique (IQA) dans la région du Tonkpi comportent ceux concernant les sous facteurs de la densité de la population (DP), la densité des routes (DR) et la densité des localités (DL).

7.1.3.1. Carte des densités de la population (DP)

L'indice de densité de la population, évaluée par la densité moyenne par sous-préfecture dans la région, montre que la répartition de la population est inégale (tableau XXIII). On constate selon la cartographie (figure 43) que les zones du Nord-est et Nord-ouest sont très faiblement peuplées. Elles occupent 40,9 % de la surface. En outre, celles des zones faiblement peuplées suivent avec 29,55%. On les localise au Centre de la région. Par ailleurs, les zones moyennement à fortement peuplées se trouvent dans les sous-préfectures de Man, Danané, Biankouma, Zouan-Hounien. Elles occupent une proportion de 28,84 %.

Tableau XXIII : Superficies et normes de la densité de la population (DP)

Classes	Description (hbts/km ²)	Qualité	Code	Superficies (ha)	Pourcentage (%)
1	< 40	Très faible	1	461 030,18	40,9
2	40 - 100	Faible	1,33	333 123,56	29,55
3	100 - 200	Moyenne à forte	1,66	26579,01	23,58
4	> 200	Forte	2	59 329,1	05,26

Source : TRA (2013), LAHLAOI et al. (2017), CHANDOUL *et al.* (2014),

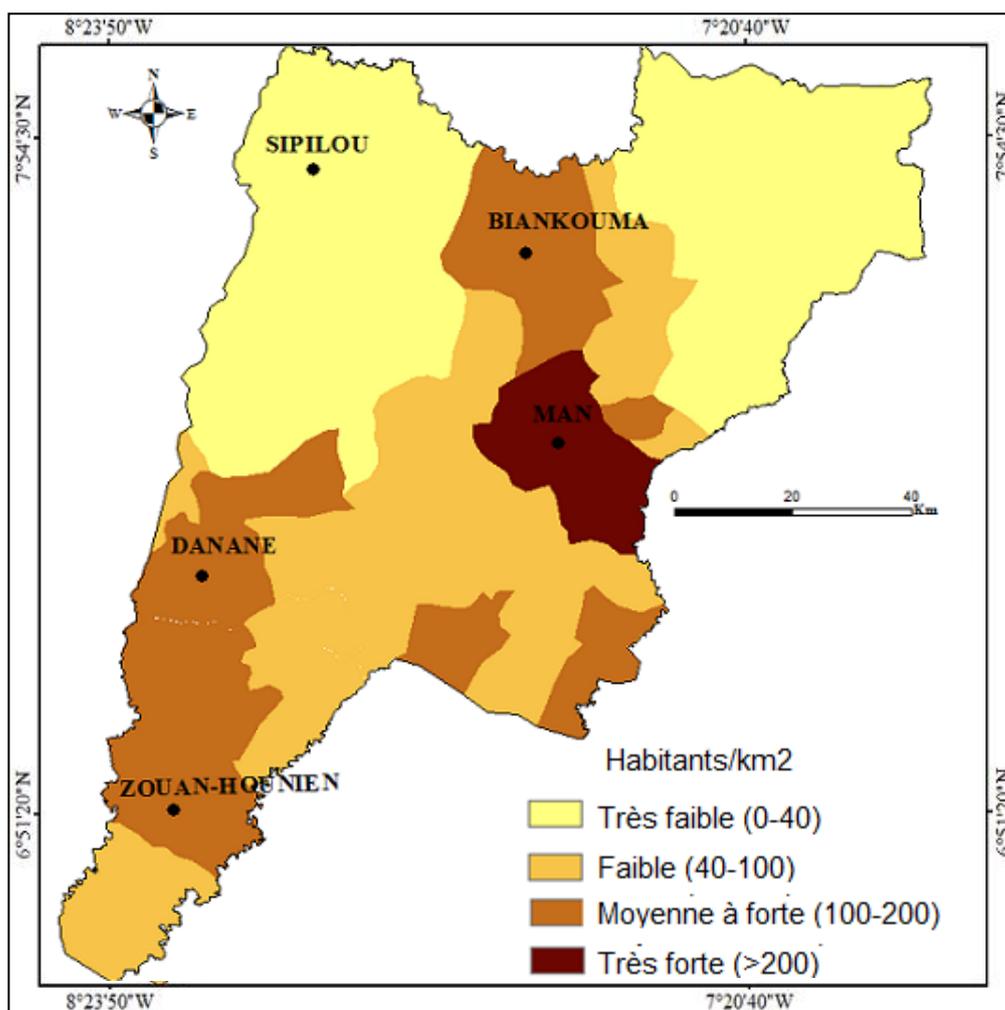


Figure 43 : Carte de la densité de la population en 2014

7.1.3.2. Carte des densités de localités (DL)

La répartition de la densité de l’habitat comprend trois classes (Tableau XXIV) :

- Les classes de faible densité (Inférieure à 8 localités/km², indice 1) ;
- Les classes de densité moyenne (de 8 à 16 localités, indice 1,5) ;
- Les classes de forte densité (Supérieur à 16 localités, indice 2).

Du point de vue statistique et spatial (Figure 44), les classes de densité faible représentent 49,57% de la surface totale. On les retrouve au Nord-ouest et Nord-est c’est-à-dire dans la localité de Sipilou, Danané. Par ailleurs, les classes de forte densité couvrent 27,45% soit une superficie de 30 937,61 ha. Elles se localisent dans les départements de Biankouma, Man et Zouan-hounien.

Tableau XXIV : Superficies et normes de densité de localité

Classes	Description	Qualité	Code	Superficies (ha)	Pourcentage
1	< 8	Faible	1	55 8756,39	49,57
2	8 - 16	Moyenne	1,5	25 1620,23	22,32
3	> 16	Forte	2	30 937,61	27,45

Source : TRA (2013), LAHLAOI et al. (2017)

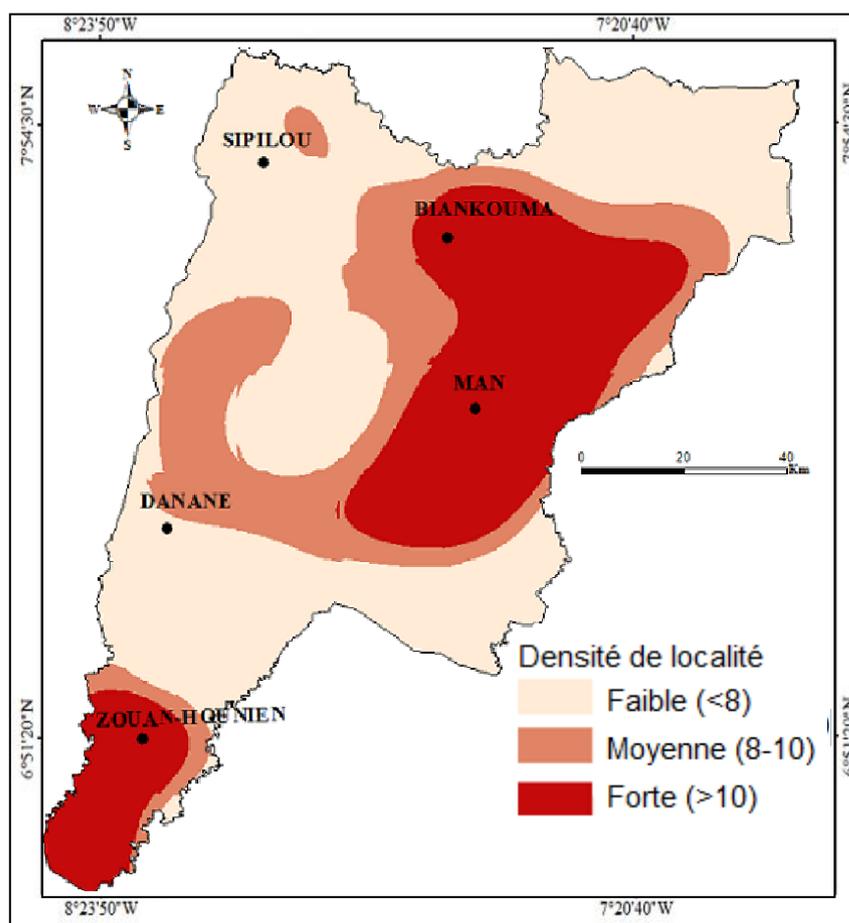


Figure 44 : Densité de localité dans la région du Tonkpi

7.1.3.3. Carte des densités de routes

Concernant la carte des densités des routes (figure 45), les résultats obtenus permettent d’apercevoir que dans la région du Tonkpi, les classes de densité de routes supérieures à 20 sont dominantes (tableau XXV). Elles occupent 57,63% de la superficie. Elles se trouvent dans les départements de Biankouma, Danané, Man, SipiLou, Zouan-Hounien. Par ailleurs, les classes de densité de routes inférieures à 8 sont moins représentées dans la région du Tonkpi avec 21,99%.

Tableau XXV: Superficies et normes de densité de route

Classes	Description	Qualité	Code	Superficie (ha)	Pourcentage
1	< 8	Faible	1	247 930,44	21,99
2	8 - 20	Moyenne	1,5	222 305,2	19,72
3	> 20	Forte	2	649 515,6	57,63

Source : TRA (2013), LAHLOI et al. (2017)

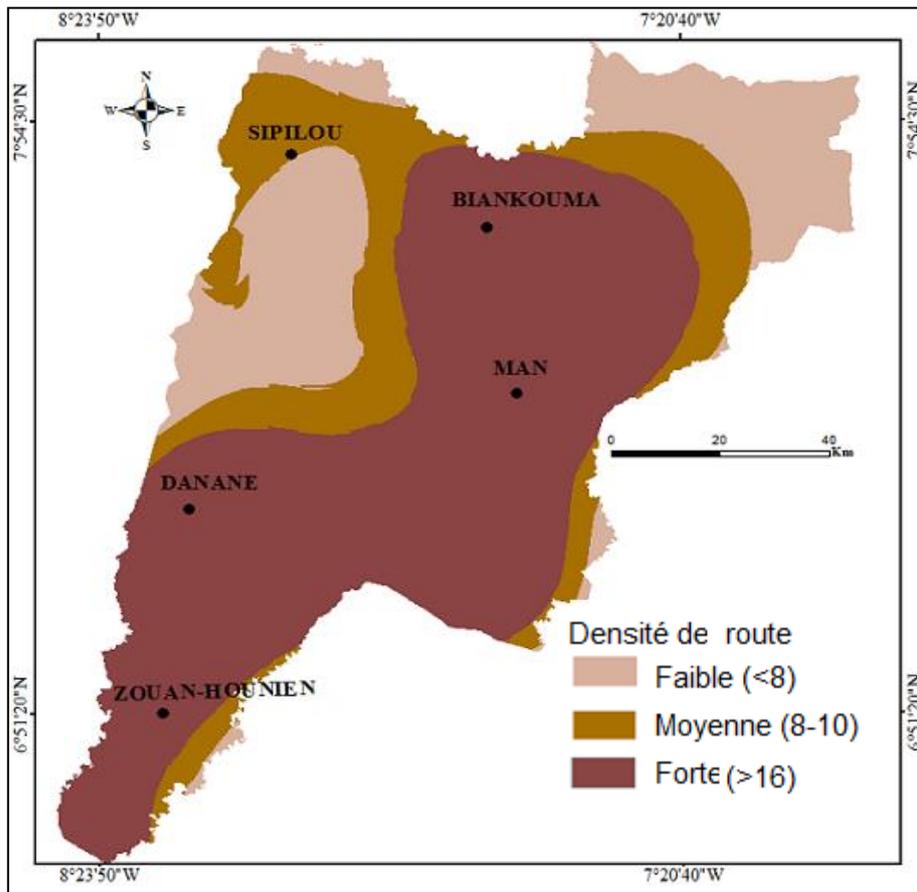


Figure 45 : Carte de densité de routes dans la région du Tonkpi

7.1.3.4. Carte de l'indice de la qualité anthropique (IQA)

La forte pression démographique et la densité des routes sur un espace donné constituent des facteurs d'anthropisation du milieu qui favorisent l'érosion des sols par les activités économiques rurales. La figure 46 montre que l'extrême Nord-Ouest (Moitié Nord du département de Biankouma) et Nord-Est (département de Sipilou) de la région paraissent moins vulnérables à l'érosion par rapport au centre.

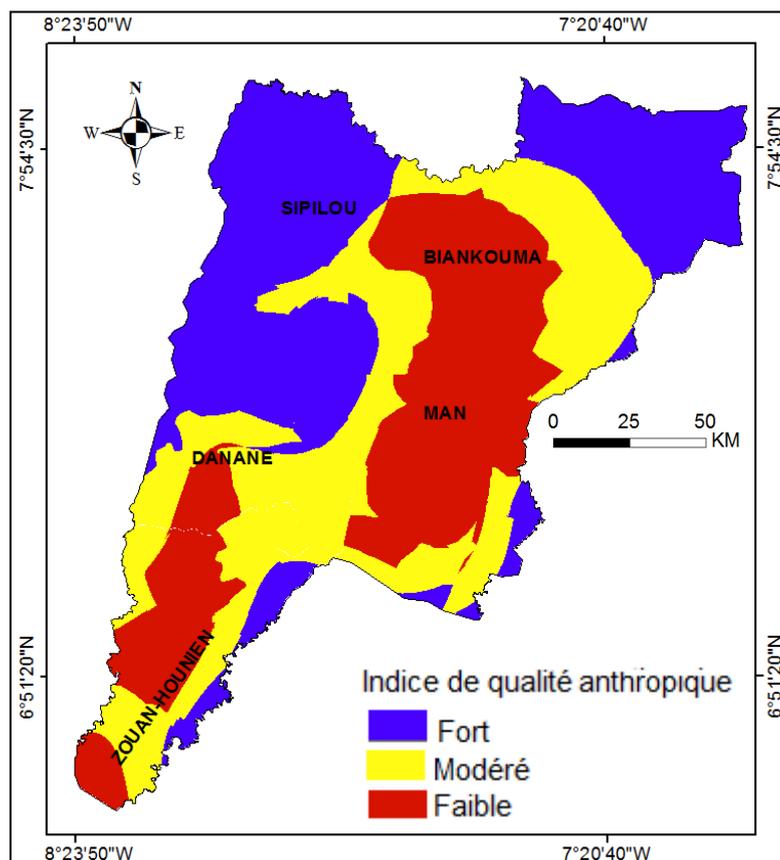


Figure 46 : Carte de l'indice de qualité anthropique (IQA)

Le tableau XXVI présente trois classes de sensibilité à l'érosion en fonction des facteurs anthropiques. On observe qu'il y a autant d'espaces modérément érodables (41,2%) que d'espaces fortement érodables (41,73%). Seulement 17,1% de la région présente une vulnérabilité faible due aux facteurs anthropiques.

Tableau XXVI: Répartition géographique de l'indice de qualité anthropique

Classes IQA	Superficie (Ha)	Proportion (%)
Faible	190 411,09	17,1
Modéré	461 243,12	41,2
Fort	467 222,59	41,7

Les activités anthropiques qui influencent l'érosion du sol sont le concassage des blocs de granites aux alentours de certaines villes telles que Man et Biankouma. Une fois que les blocs de granites sont concassés, on observe un décapage du sol par les pluies laissant apparaître la roche mère de couleur rougeâtre (figure 47).



Figure 47 : Fosses et fouilles de concassage à Man (TIESSE, 2017)

7.1.4. Résultats de l'indice de qualité de la végétation (IQV)

Les résultats issus de la cartographie du coefficient de variation de la couverture végétale (CV) et de celle de l'occupation du sol de la région du Tonkpi permettent d'apprécier la cartographie de l'indice de la qualité de la végétation.

7.1.4.1. Carte du coefficient de variation (CV)

La cartographie du coefficient de variation de la couverture végétale (figure 48) de la région permet d'obtenir trois classes (tableau XXVII):

- Les classes de faible variation de la couverture végétale de 4,5 à 10 ;
- Les classes de moyenne variation de la couverture végétale de 10 à 20 ;
- Les classes de forte variation de la couverture végétale de 20 à 75.

Tableau XXVII : Caractéristiques des classes de variation de couverture végétale

Classes	Description	Qualité	Code	Superficie (ha)	Pourcentage
1	4,5 - 10	Faible	1	397 401,88	35,26
2	10 - 20	Moyenne	1,5	601 831,91	53,39
3	20 - 75	Forte	2	120 480,94	11,35

Source : TRA (2013), LAHLOI et al. (2017)

On note, à travers les résultats de la variation du couvert végétal, que les zones à moyenne variation sont plus dominantes. Elles occupent une proportion de 53,39% de la surface totale

de la région, soit 601 831,91ha (Tableau XXVII). Elles sont disséminées sur toute la surface totale.

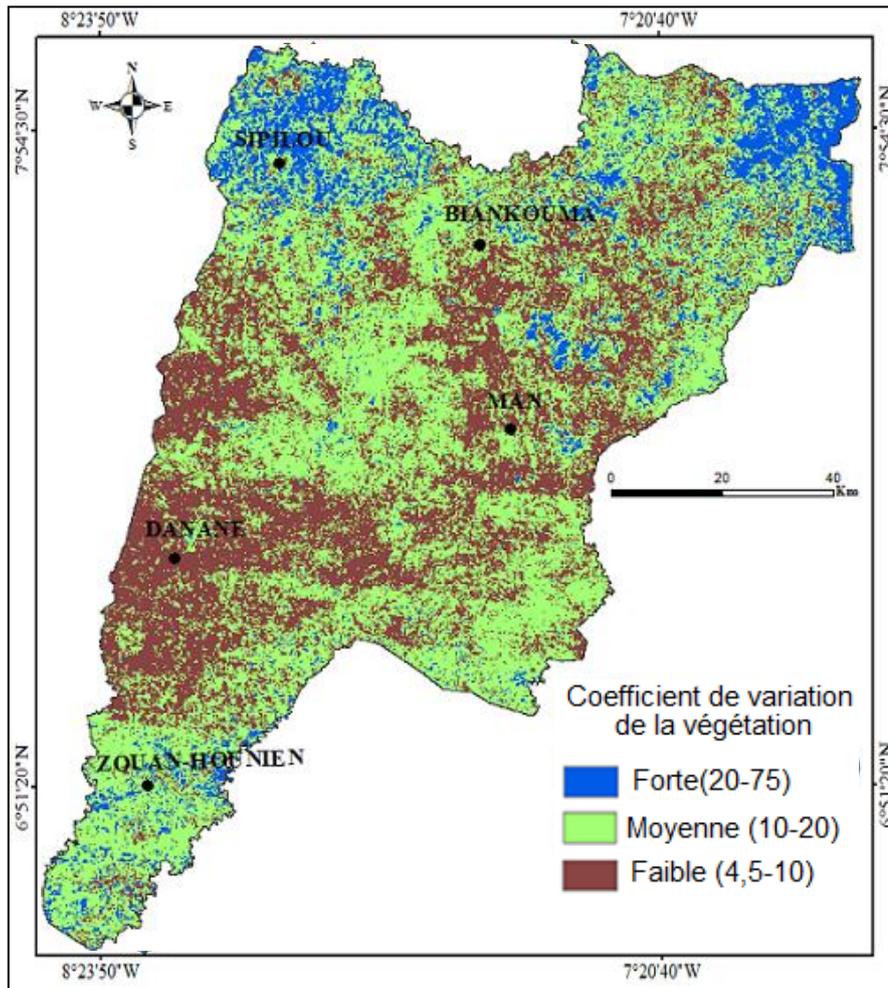


Figure 48 : Carte du coefficient de variation de la végétation

Par contre, celles des zones à faible variation de la couverture végétale représentent une proportion de 35,26%, soit une surface de 397 401,88ha ; elles se trouvent surtout au Nord-ouest et Nord-est précisément dans les localités de Sipilou, Man et à Biankouma.

7.1.4.2. Carte d'occupation du sol en 2015

L'état de l'occupation du sol en 2015 (figure 49) montre une dominance de la classe «cultures et jachères» avec des variations de superficies. La répartition des classes est la suivante :

- les forêts denses couvrent une superficie de 87 210,27 hectares de superficie estimée à 7,79% de la superficie totale ;
- les forêts dégradées s'étendent sur 205 145,67 hectares soit 18,32% de la totalité ;

- les cultures et les jachères dominent la répartition avec 649 991,37 hectares, soit 58,06% de la région d'étude ;
- les sols nus s'étalent sur une superficie de 23 896,06 hectares et représentent 2,13% de la région du Tonkpi ;
- les savanes arborées occupent une superficie de 123 115,57 hectares, soit 11,00% de la superficie totale de la région du Tonkpi ;
- les cours d'eau occupent près de 1 615,98 hectares de terrain soit environ 0,14% de la région d'étude ;
- les habitats couvrent une superficie de 28 549,47 hectares soit environ 2,55% de la surface totale.

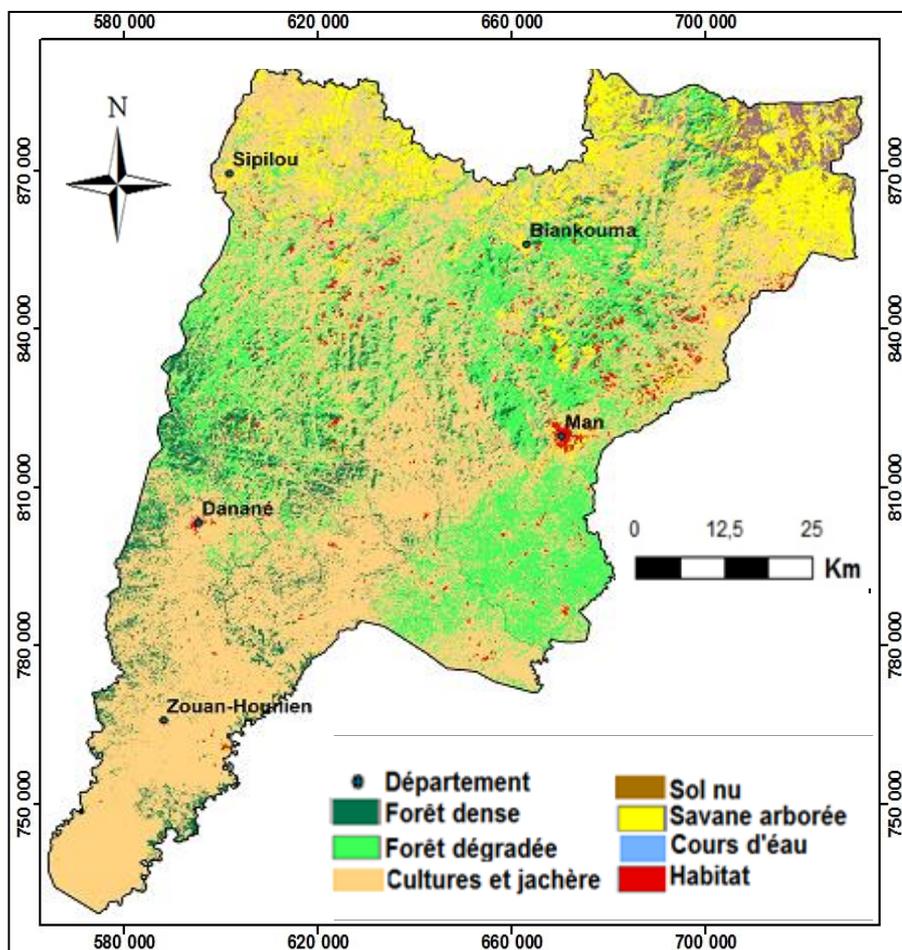


Figure 49 : Carte d'occupation du sol de la région du Tonkpi en 2015

7.1.4.3. Carte de l'indice de qualité de la végétation (IQV)

La carte de l'indice de qualité de la végétation (figure 50) montre que 65,31 % de la région du Tonkpi, soit une superficie d'environ 738 085 ha a une faible qualité de végétation (tableau XXVIII). Par conséquent, elle présente une forte sensibilité à l'érosion hydrique (planche 4). Une grande partie du Nord de la région et la pointe Sud sont les plus concernées.

Tableau XXVIII : l'indice de qualité de la végétation

Classes IQV	Superficie (Ha)	Proportion (%)
Fort	37 958,76	3,38
Modéré	343 704,75	30,69
Faible	738 085,70	65,31

Cela s'explique par la forte déforestation observée dans ces zones (TIESSE *et al.*, 2017). Par contre, les zones du Centre-Ouest (Danané) (30,69 % de la région) et au Nord-Est (Man et Biankouma) (3,38%) ont des aptitudes modérées d'érosion due à la qualité de la végétation.

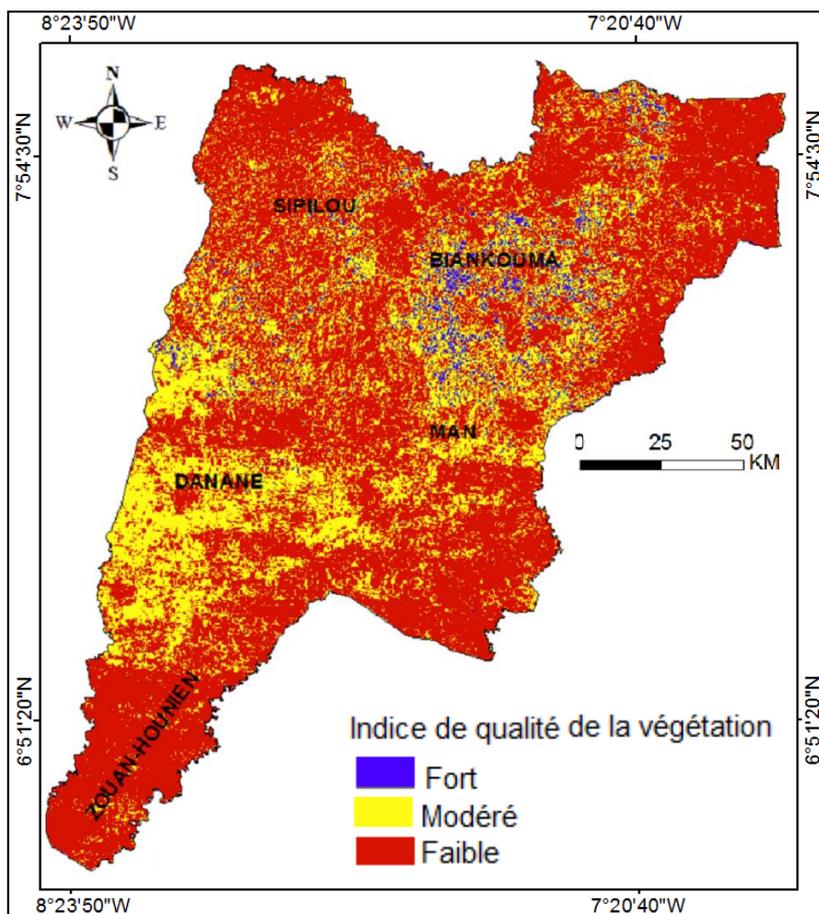


Figure 50 : Carte de l'indice de qualité de la végétation



Planche 4 : Erosion sous les reboisements d'un flanc de montagne et sur un espace enherbée en pente (TIESSE, 2017)

7.1.5. Cartographie de l'indice de sensibilité à l'érosion (ISE)

La superposition multiplicative des quatre indices de qualité IQS , IQV, IQA et IQC sous format Raster, a permis de concevoir la carte de vulnérabilité à l'érosion (Figure 51).

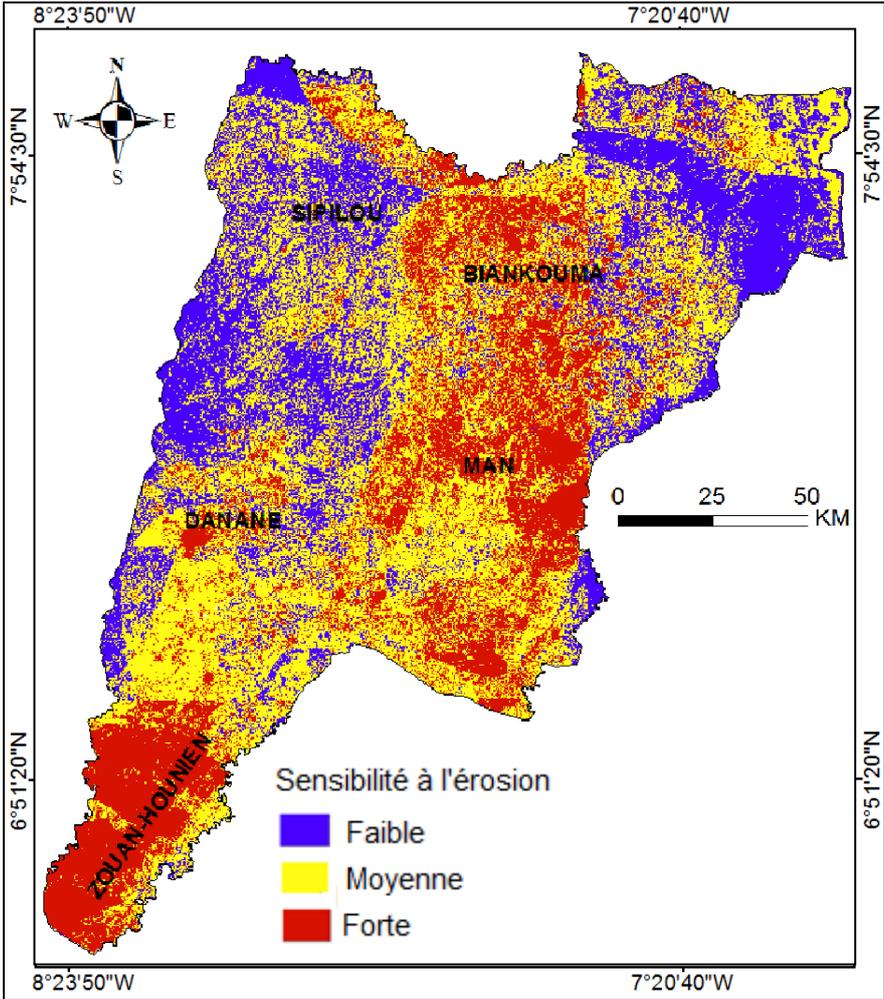


Figure 51 : Carte de sensibilité à l'érosion dans la Région du Tonkpi

Elle donne la possibilité de déterminer la susceptibilité à l'érosion en chaque point de la région. On constate que presque la moitié (43,45%) de la région du Tonkpi est fortement sensible à l'érosion (tableau XXIX). Seulement 1/5^e du territoire présente une sensibilité faible à l'érosion ; le reste 34,82% moyennement sensible à l'érosion.

Tableau XXIX : Indice de sensibilité à l'érosion (ISE)

Classes ISE	Superficie (Ha)	Proportion (%)
Faible	243 272,65	21,73
Modéré	389 818,40	34,82
Fort	486 433,35	43,45

Les zones fortement soumises à l'érosion se localisent dans les Départements de Biankouma, Man et de Zouan-Hounien. L'urbanisation étant un facteur d'érosion majeur, les grandes villes et leur alentour se retrouvent très érodées à l'image de la ville de Man (planche 5).



Planche 5 : Terrains soumis à l'érosion à Man (TIESSE, 2017)

Les sols modérément érodibles sont disséminés sur l'ensemble de la région, surtout au Sud de Danané et de Man. Les sols moins érodibles se retrouvent majoritairement au Nord-est (Sipilou) et Nord-Ouest (Biankouma) de la Région. Ces résultats traduisent de manière générale, une sensibilité à l'érosion élevée dans la région montagneuse du Tonkpi. En effet, plus de 78% de la région présente une sensibilité modérée à forte à l'érosion du sol.

La figure 52 résume l'impact des différents facteurs sur la sensibilité du sol de la région du Tonkpi à l'érosion. Elle permet une comparaison explicite des degrés de sensibilité à l'érosion due à chaque facteur.

Ainsi, il ressort que les facteurs anthropiques à travers l'indice de qualité de la végétation (65,31%) et l'indice de qualité anthropique (41,7%) sont plus déterminants que les facteurs environnementaux (indice de qualité du sol et indice de qualité climatique) dans la forte sensibilité du sol de la région à l'érosion hydrique. En outre, de tous les quatre facteurs de l'érosion hydrique, la qualité de végétation influence plus la forte sensibilité à l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi (Figure 52).

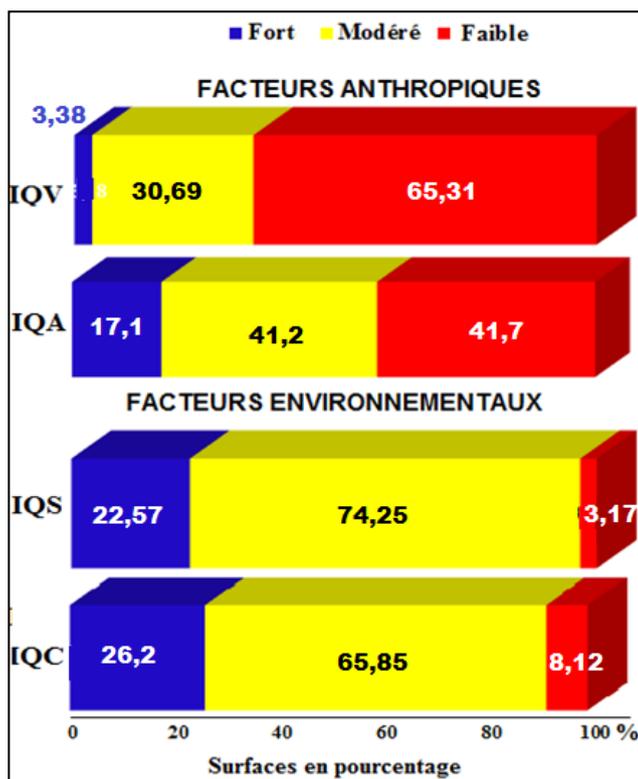


Figure 52: Pourcentage des classes par indice de qualité

7.2. Discussions sur les résultats de l'évaluation de l'érosion hydrique

Les résultats indiquent que 66% de la région du Tonkpi serait modérément sensible à l'érosion due aux facteurs climatiques. A l'image de toutes les régions de la Cote d'Ivoire, le Tonkpi a connu une période de sécheresse mais depuis 1991, elle connaît des périodes humides. La pluviométrie se situe entre 1200 à 2100 mm/an avec un gradient orienté vers le sud-ouest. Cette pluviométrie pourrait expliquer l'influence modérée des facteurs climatiques sur la sensibilité à l'érosion dans la région.

L'indice de qualité des sols (IQS) qui exprime l'influence de la texture du sol et de la pente sur la sensibilité à l'érosion des sols est modéré sur 74% du territoire du Tonkpi. La topographie de la région du Tonkpi est représentée par de hautes altitudes et un paysage accidentés. Les pentes fortes affectent le taux d'érosion du sol à travers ses caractéristiques morphologiques tel que le gradient et la longueur de la pente (WISCHMEIER ET SMITH, 1978).

La carte des pentes issues du MNT montre que les pentes fortes et très fortes occupent des superficies de l'ordre de 352 235, 62 ha soit 32% du territoire et sont localisées au centre de la région. Ces zones sont très vulnérables à l'érosion. Le reste du territoire dont les pentes sont très faibles (<5%) à faibles (5-15%) et qui occupent 69% du territoire sont légèrement ou moins vulnérables à l'érosion.

Les sols de la région sont à 61% des sols ferralitiques sur roches granitiques qui sont des sols équilibrés. Dans 25% de cas, on trouve des sols ferralitiques lessivés sur roches granitiques qui sont des sols fins. Par endroit, on rencontre des sols ferralitiques lessivés sur schistes et des Ferrisols de types montagnards qui sont des sols grossiers. Ces différentes propriétés affectent différemment la dégradation du sol. Les sols ferralitiques sur roches granitiques qui représentent 61% du territoire présentent une mauvaise aptitude culturale. Lorsque ces sols sont cultivés elles sont vulnérables à l'érosion à cause de leur faible profondeur.

L'indice de la qualité anthropique est modéré pour 41% du territoire et fort pour 42% du territoire. On peut donc dire que les facteurs anthropiques sont un élément essentiel dans la sensibilité à l'érosion des sols dans la région du Tonkpi. Les zones d'habitation et le réseau routier sont considérés comme fortement favorables à la vulnérabilité à l'érosion parce que les activités anthropiques augmentent l'érodabilité des sols. En effet, l'impact anthropique

augmente avec l'accroissement de la population et la pression humaine. Par exemple, THOMAS (1991) a montré que de tous les facteurs influençant l'érosion dans le bassin de Gauche au Kenya, 81% sont causées par des facteurs humains dont la déforestation, les pratiques agricoles telles que le surpâturage et la surexploitation des terres.

Comme les populations n'ont pas assez de ressources et à cause de la rareté des terres, les agriculteurs ne pratiquent plus les techniques de protection des sols. Traditionnellement, les jachères ont été utilisées pour la gestion de la fertilité des sols mais à cause de la forte pression sur les terres, celles-ci ont été réduites ou sont inexistantes conduisant à une mise en culture continue des terres.

Dans le Tonkpi, où les pluies sont souvent fortes, durant la grande saison de pluie, les jachères établies sur les flancs des montagnes ne peuvent pas arrêter l'érosion. En plus, bien que l'élevage ne soit pas une tradition dans la région, les quelques bêtes existantes pâturent le long des flancs des montagnes où l'herbe est disponible et fraîche. Ce qui est une contribution complémentaire pour l'érosion.

Les résultats de TIESSE *et al.*, (2017) ont montré que dans la région du Tonkpi, la forêt dense a été fortement détruite alors qu'elle est moins vulnérable à l'érosion (PIMENTEL *et al.*, 1998). Elle couvrait 145 565,40 ha en 1990, elle ne couvre plus que 93 745,95 ha en 2015 soit une réduction de 36% sur 25 ans. Dans la même période, les terres extrêmement vulnérables à l'érosion, les forêts dégradées et les terrains et habitations ont augmenté respectivement de 15 et 11%.

Les terres consacrées aux cultures et jachères, localisées sur les terres arables aux alentours des villes, bien que sensibles à l'érosion ont été remplacées par des habitations, qui sont très vulnérables à l'érosion. Cette évolution de la couverture des terres entraîne une augmentation de l'érosion en raison de la disparition de la végétation, du surpâturage et du labour. En effet, le feuillage au-dessus du sol ralentit la vitesse de l'eau qui coule sur le sol, ce qui réduit la quantité d'eau et de sol perdues avec le ruissellement. De même, les racines des plantes lient physiquement les particules et améliorent également la conservation de l'eau en créant des pores dans le sol, ce qui stabilise le sol et augmentant sa résistance à l'érosion.

Par ailleurs, l'abattage des arbres pour le bois de chauffe ou le charbon sans remplacement est un sérieux problème qui contribue à la perte de végétation et donc à l'érosion accrue du sol. L'augmentation de la population humaine a réduit la disponibilité des terres et a créé une

pression sur des terres dans cette zone semi-montagneuse où les terres cultivables sont limitées.

La carte des risques d'érosion obtenue montre que les zones à fort risque d'érosion occupent environ 43 % de la région du Tonkpi, sur les versants abrupts des montagnes et dans les vallées encaissées. Cette carte montre que les versants subissent une érosion plus forte que celle qui s'observe sur les plateaux.

Les résultats indiquent aussi qu'il y a une répartition spatiale éparpillée de la sensibilité à l'érosion sur le territoire de la région, ce qui montre clairement l'impact cumulé des différents facteurs déterminant de l'érosion (HAROUN *et al.*, 2010). En effet, les zones fortement exposées à l'érosion (33% du territoire) sont celles où l'indice de qualité du Sol (IQS) représentait 32% et l'indice de qualité de la Végétation était de 25%. De même, ces résultats montrent une forte influence de l'indice de qualité de végétation (IQV = 65%) dans le risque d'érosion.

La carte de risque d'érosion montre ainsi que hormis les propriétés intrinsèques des sols les paramètres tels que la végétation et la pente contribuent à modifier considérablement la sensibilité à l'érosion des sols. La végétation protège les sols de par son rôle de protection contre les agents érosifs, de fixation des sols et de piégeage de sédiments. Elle contribue également à améliorer l'infiltration des eaux pluviales et favorise un microclimat moins contrasté sous les plantes en raison de l'ombre. Ces conditions génèrent alors une faune et une flore plus active et modifient les propriétés des sols (REY et BERGER, 2002).

De même, du fait que les sols dans certains endroits du territoire soient caillouteux, la sensibilité à l'érosion est plus faible que celle d'un sol composé de matériaux fins ou sableux (ROOSE ET SARRAILH, 1990). La pente conditionne également la propriété et la structure des sols. Ainsi, sur terrains plats, les sols sont souvent plus épais que sur les terrains pentus observés autour des grandes villes telles que Man, Duekoué et Biankouma où les sols sont en général plus minces. Cela s'explique par l'entraînement des produits de l'altération de l'humification ou de la minéralisation (DUCHAUFOR, 2001).

De manière générale, aucun indice pris seul, ne peut permettre d'expliquer la vulnérabilité des sols à l'érosion. Cependant, l'indice de la qualité de la végétation semble à lui seul appréhender au mieux la sensibilité à l'érosion. Alors, on retient que la méthode utilisée fait

une très bonne intégration des différents indices pour produire des résultats qui y sont corrélés.

CONCLUSION PARTIELLE

L'objectif poursuivi par la deuxième partie de cette thèse consistait à l'évaluation de la sensibilité à l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi. Pour y parvenir la méthodologie utilisée s'est basée sur l'utilisation du modèle MEDALUS. Ce modèle d'évaluation qualitative de l'érosion comprend quatre facteurs ou indices, à savoir l'indice de qualité de la végétation, l'indice de qualité anthropique, l'indice de qualité du climat et l'indice de qualité du sol. Chaque indice a été évalué par la combinaison de sous-indices et représenté en format cartographique. La superposition de tous ces indices dans un SIG a permis de spatialiser le degré de sensibilité à l'érosion hydrique à l'échelle de la région du Tonkpi dans une carte synthétique.

Il ressort de l'analyse de la carte de sensibilité à l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi trois classes de sensibilité, faible, modérée et forte. Les zones de forte sensibilité sont des zones critiques où les effets de l'érosion hydriques sont les plus sévères. Elles occupent la plus grande partie de la région du Tonkpi et se localisent dans le Département de Zouan-hounien et dans l'axe central Man-Biankouma.

Les zones de sensibilité modérée sont des zones fragiles où les effets de l'érosion hydrique sont moins sévères. Ces zones représentent le tiers de la région et se situent dans les localités de Danané, au Sud du Département de Man et disséminées par endroits dans la région.

Les zones de faible sensibilité sont des zones potentiellement sensibles où les effets de l'érosion hydrique sont très peu perceptibles. Elles représentent près d'un cinquième de la superficie de la région et se retrouvent dans les départements de Sipilou et au Nord-Ouest de la région dans le département de Biankouma.

L'érosion hydrique étant un processus de dégradation du sol qui est causé à la fois par des facteurs anthropiques que des facteurs environnementaux, l'analyse des cartes d'indices de qualité et de la carte de sensibilité à l'érosion hydrique a permis de mettre en évidence l'importance relative de ces deux types de facteurs. Ainsi, les indices de qualité de la végétation et de qualité anthropique constituant les facteurs anthropiques ont entraîné une sensibilité à l'érosion hydrique plus importante de celle des facteurs environnementaux. Ce

résultat permet de confirmer l'hypothèse selon laquelle il y a une différence de sensibilité à l'érosion hydrique du fait des facteurs anthropiques et environnementaux.

En définitive, l'utilisation de la télédétection et des SIG intégrée au modèle MEDALUS a contribué à l'évaluation qualitative et à la cartographie de la vulnérabilité à l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi.

En outre, cette carte de sensibilité à l'érosion hydrique constitue un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires afin de déterminer les zones prioritaires aux aménagements de lutte antiérosive et de reconstitution forestière. A cet effet, les zones de sensibilité modérée, estimées à 190 545 ha après déduction des superficies des forêts denses, des cours d'eau et de l'habitat, seraient recommandables compte tenu du niveau de dégradation critique des zones de forte sensibilité et des coûts éventuels que pourraient engendrer leur reconstitution.

Cependant, certaines données utilisées dans le cadre de cette étude telles que la pédologie ne sont plus représentatives des conditions actuelles, ce qui peut biaiser les résultats. Les cartes pédologiques datent des années 1960 et mériteraient d'être mises à jour. En effet, sous l'impulsion de la déforestation et de l'occupation du sol, les états de surfaces du sol ont pu être modifiés. La texture a pu donc évoluer dans le temps. Une fois les sols dénudés, leur modification est favorisée par l'agressivité du climat, la fragilité des sols et la minéralisation rapide des matières organiques.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude centrée sur les phénomènes de la déforestation et de l'érosion hydrique avait pour objectif la cartographie de la dynamique spatio-temporelle des formations forestières de 1990 à 2015 et l'évaluation de la sensibilité à l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi.

Pour mettre en évidence la dynamique temporelle des formations forestières, l'approche méthodologique adoptée s'est appuyée sur le traitement numérique des images LANDSAT des capteurs TM 1990, TM 2000, ETM+ 2011 et OLI-TIRS 2015. L'application de l'algorithme de la classification supervisée par maximum de vraisemblance a permis de discriminer sept différentes classes de l'occupation du sol dans la région du Tonkpi : les forêts denses, les forêts dégradées, les cultures et jachères, les sols nus, les savanes arborées, les cours d'eau et les habitats.

L'étude diachronique de l'occupation du sol de 1990 à 2015 révèle une modification de l'espace naturel marquée par une dynamique de déforestation galopante qui s'est traduite par une baisse des superficies des forêts denses. Ce qui permet de dire que l'hypothèse selon laquelle les formations forestières ont subi une décroissance dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015 est confirmée au niveau des forêts denses. Cependant, au regard de la dynamique de dégradation des forêts avec pour corollaire l'augmentation des superficies des forêts dégradées, l'on constate que cette hypothèse est infirmée. En clair, l'hypothèse de la décroissance des formations forestières dans la région du Tonkpi de 1990 à 2015 est en partie vérifiée.

Par ailleurs, l'on note des dynamiques d'urbanisation, de savanisation et de dénudation des sols marquées respectivement par un accroissement des superficies de l'habitat, des savanes arborées et des sols nus. Toutes ces évolutions des composantes du paysage de la région de 1990 à 2015 permettent de mettre en évidence la dynamique temporelle de l'occupation du sol de la région du Tonkpi sur cette même période.

Dans l'optique de cartographier la dynamique spatiale des formations forestières en fonction de l'altitude dans la région du Tonkpi, la détermination des classes d'altitudes à partir du modèle numérique de terrain (MNT) du satellite ASTER a été utilisée. Elle a permis d'obtenir trois classes d'altitudes : les basses, les moyennes et les hautes. La superposition des couches cartographiques de ces différentes classes d'altitudes avec la carte d'occupation du sol de toute la région du Tonkpi a révélé que la dynamique de déforestation s'est manifestée à différentes intensités en fonction de l'altitude. Ainsi, l'on constate un gradient décroissant de

déforestation des basses altitudes aux hautes altitudes. Ce qui permet de dire que l'hypothèse selon laquelle la dynamique des formations forestières dans la région du Tonkpi est décroissante en fonction de l'altitude est confirmée pour les forêts denses. Par contre, au niveau des forêts dégradées, la décroissance est constatée au niveau des hautes altitudes tandis qu'au niveau des basses et moyennes altitudes, c'est le contraire. En conséquence, cette hypothèse est infirmée pour les forêts dégradées. En somme, l'hypothèse de la dynamique décroissante des formations forestières dans la région du Tonkpi en fonction de l'altitude est partiellement vérifiée.

Par ailleurs, les dynamiques de savanisation et d'urbanisation matérialisées par des augmentations générales de surfaces sur toute la région se sont manifestées par des accroissements de superficies à différentes intensités des basses altitudes aux moyennes altitudes. Cependant, aux niveaux des hautes altitudes, ce sont des réductions de superficies de ces classes de l'occupation du sol qui ont été observées. Enfin, les dynamiques d'accroissement de superficies des terres cultivées et des sols nus observées sur toute la région ne se sont manifestées qu'au niveau des basses altitudes excepté sur les moyennes et les hautes altitudes.

Concernant l'évaluation de la sensibilité à l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi, la méthodologie utilisée s'est basée sur l'utilisation du modèle MEDALUS. Ce modèle d'évaluation qualitative de l'érosion comprend quatre facteurs ou indices, à savoir l'indice de qualité de la végétation, l'indice de qualité anthropique, l'indice de qualité du climat et l'indice de qualité du sol. Chaque indice a été évalué par la combinaison de sous-indices et représenté en format cartographique. La superposition de tous ces indices dans un SIG a permis de spatialiser le degré de sensibilité à l'érosion hydrique à l'échelle de la région du Tonkpi dans une carte synthétique.

Il ressort de l'analyse de la carte de sensibilité à l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi trois classes de sensibilité : faible, modérée et forte. Les zones de forte sensibilité sont des zones critiques où les effets de l'érosion hydrique sont les plus sévères. Elles occupent la plus grande partie de la région du Tonkpi et se localisent dans le Département de Zouan-hounien et dans l'axe central Man-Biankouma.

Les zones de sensibilité modérée sont des zones fragiles où les effets de l'érosion hydrique sont moins sévères. Ces zones représentent le tiers de la région et se situent dans les localités de Danané, au Sud du Département de Man et disséminées par endroits dans la région.

Les zones de faible sensibilité sont des zones potentiellement sensibles où les effets de l'érosion hydrique sont très peu perceptibles. Elles représentent près d'un cinquième de la superficie de la région et se retrouvent dans les départements de Sipilou et au Nord-Ouest de la région dans le département de Biankouma.

L'érosion hydrique étant un processus de dégradation du sol qui est causée à la fois par des facteurs anthropiques que des facteurs environnementaux, l'analyse des cartes d'indices de qualité et de la carte de sensibilité à l'érosion hydrique a permis de mettre en évidence l'importance relative de ces deux types de facteurs. Ainsi, les indices de qualité de la végétation et de qualité anthropique constituant les facteurs anthropiques ont entraîné une sensibilité à l'érosion hydrique plus importante de celle des facteurs environnementaux. Ce résultat permet de confirmer l'hypothèse selon laquelle il y a une différence de sensibilité à l'érosion hydrique du fait des facteurs anthropiques et environnementaux. De plus, parmi tous les quatre facteurs influençant l'érosion hydrique dans la région du Tonkpi, celui de la qualité de la végétation est le plus prépondérant.

En définitive, il ressort de cette étude que l'utilisation de la télédétection et des SIG a contribué à cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol de la région du Tonkpi de 1990 à 2015. En plus, cette évolution de l'occupation du sol fortement influencée par les activités anthropiques notamment la déforestation et la dégradation des forêts ont entraîné une plus grande sensibilité de la région du Tonkpi à l'érosion hydrique.

En outre, cette carte de sensibilité à l'érosion hydrique constitue un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires afin de déterminer les zones prioritaires aux aménagements de lutte antiérosive et de reconstitution forestière en vue d'une gestion rationnelle et efficace des ressources naturelles de la région du Tonkpi.

Les recommandations suivantes peuvent se dégager :

- a) Le recours à l'approche participative pour la gestion environnementale des hauts sommets de la région du Tonkpi serait envisageable. Ceci suppose des campagnes de sensibilisation en vue d'apporter des connaissances aux populations sur la protection et la gestion durable des ressources sur les flancs de montagnes.
- b) L'orientation prioritaire des actions d'aménagement de lutte anti-érosive et de reconstitution forestière dans les zones de sensibilité modérée à l'érosion hydrique, estimées à 190 545 ha, serait recommandable. Ce choix se justifie par le niveau de

dégradation critique des zones de forte sensibilité et des coûts éventuels que pourraient engendrer leur reconstitution.

- c) La réalisation des activités de restauration du couvert forestier au travers des reboisements par l'agroforesterie couplée aux techniques de défense et restauration des sols pourraient être expérimentés. Ces approches techniques pourront se mettre en œuvre sur les espaces occupés par les cultures et jachères et les forêts dégradées, localisées dans les zones de sensibilité modérée à l'érosion.
- d) Le renforcement de la surveillance des reliques forestières denses et la prise d'arrêtés préfectoraux interdisant les activités de concassage de gravier sur les flancs de montagnes sont des mesures importantes qui pourraient être prises.
- e) La mise en place d'un zonage dans la région du Tonkpi en général et particulièrement sur les hauts sommets s'impose. Ce zonage consiste à diviser après enquête publique, le territoire des départements en zone et d'en déterminer la vocation. Cette action permettra de contrôler l'usage des terrains et des bâtiments ainsi que l'implantation, la forme et l'apparence des constructions.

Au terme de cette étude, les perspectives suivantes se dégagent dans un souci d'améliorer ce travail pour une gestion durable des ressources naturelles de la région du Tonkpi.

- i. L'évaluation quantitative de l'érosion hydrique en vue de déterminer les pertes de sol dans la région du Tonkpi au regard de la vocation agricole de cette région.
- ii. L'amélioration de la qualité des données utilisées à travers l'utilisation d'images satellitaires de très haute résolution pour l'élaboration des cartes de l'occupation du sol. Par ailleurs, il conviendrait d'envisager l'utilisation de cartes pédologiques récentes pour une prise en compte des informations actualisées sur la texture et la structure des sols.
- iii. L'utilisation du radioisotope, le césium-137 (^{137}Cs) dans des travaux de recherche pourrait permettre une évaluation quantitative relativement rapide de l'érosion et prendre en compte les variations temporelles et spatiales à l'échelle du bassin-versant.
- iv. L'évaluation de l'impact du feu à travers le suivi des zones brûlées par télédétection en calculant l'indice de brûlure normalisé.
- v. La prise en compte de l'impact des vents dans le processus de dégradation des sols.

BIBLIOGRAPHIE

- ABAOUI J., El GHMARI A., El Harti A., BACHAOUI E. M., BANNARI A. et El BOUADILI A. (2005). Cartographie de l'érosion hydrique en zone montagneuse : cas du bassin versant des Ait Bou Goumez, haut atlas, Maroc. *Estudios Geológicos*, DOI: 10.3989/egeol.05611-240.
- ACHARD F., EVA H. D., STIBIG H. J., MAYAUX P., GALLEGO J., RICHARD T. et MANLINGREAU J. P. (2002). Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forest. *Science* 297 (5583): pp. 999-1002.
- ADELIA N., ANTONIO C. D. et CELESTE O.A. (2011). Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography*, 31 : 687-69
- AIDOUUD A. et TOUFFET J. (1996). La régression de l'Alfa (*Stipa tenacissima*) graminée pérenne, un indicateur de désertification des steppes algériennes. In *Sécheresse*, Vol 7, p.187-193.
- AKE A. L. (1984). Flore de la Côte-d'Ivoire: Etude descriptive et biogéographique avec quelques notes ethnobotaniques. Tome I.II. III. Thèse Doct. Ès-Sc. Nat., F.A.S.T. Univ. Abidjan. 1205p.
- AKE G.E., BOYOSSORO H.K., MIESSAN G.A., ETTIEN J.-B., KOKOH R. E. et BIEMI J., (2012). Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), *Physio-Géo* [En ligne], Volume 6 | 2012, mis en ligne le 06 avril 2012, consulté le 09 mars 2018. URL: <http://journals.openedition.org/physio-geo/2285>; DOI: 10.4000/physio-geo.2285
- ANTONI V., LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., ZAIDI N., LAROCHE B., BARTHES S., DAROUSSIN J. et ARROUAYS D. (2006). Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 13, 3, 2006 - pages 201 à 222

- ASSELIN J. et VALENTIN C. (1978). Construction et mise au point d'un infiltromètre. Cah. Orstom. Sér. Hydrol. 15 (4), 321-349
- ATHERTON J., OLSON D., FARLEY L. et QAUQUAU I. (2005). Watershed Assessment for Halthy Reefs and Fishreries, Final Report to the United States Department of State. In Wildlife Conservation Society-South Pacific, [En ligne]. <http://wcsfiji.com/LinkClick.aspx?fileticket=QhrgOesPgpM%3D&tabid=3428> (Page consultée le 8 mars 2011).
- AUGOU T. (2003). La gestion des forêts tropicales secondaires en Afrique: Réalités et Perspectives, Rapport National de la Côte d'Ivoire, Atelier FAO/ECLNV/GTZ), Douala, Cameroun.
- AVENARD J.-M., ELDIN M., SIRCOULON J., TOUCHEBEUF P., GUILLAUMET J.L., ADJANOHOOUN E. et PERRAUD A. (1971). Le milieu naturel de la Cote d'Ivoire. Paris. ORSTOM CI 391 p. planches, photos, cartes (mémoires ORSTOM 50)
- AVENARD J.-M., (1977). Cartographie géomorphologique de l'ouest de la Cote d'Ivoire : quelques exemples de l'évolution géomorphologique régionale : son incidence sur la répartition actuelle des formations végétales. Paris. ORSTOM CI
- BACHAOUI B., BACHAOUI E. M., HARTI A. E., BANNARI A. et GHMARI A. E. (2007) Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique : exemple du haut atlas marocain. *Revue Télédetection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 393-404
- BAKAYOKO S., SORO D., KOUADIO K.K.H., KONAN-WAIDHET A.B., ANGUI P. (2013). Characteristics of Tonkpi Mountain soils and plateaus soils in West Côte d'Ivoire. [archive], sur www.heraldjournals.org, (consulté le 22 juin 2014)
- BATTI A. (2005). Spatialisation des pluies extrêmes et cartographie de l'aléa érosion des sols dans les bassins en amont du lagon St-Gilles. Stage de master, Institut de recherche et développement, Nouméa, 55 p.
- BEHERA M. D., BORATE S. N., PANDA S. N., BEHERA P. R. et ROY P. S. (2012). Modelling and analyzing the watershed dynamics using Cellular Automata (CA) - Markov model : A geo-information based approach. *Earth System Sciences*, 121 (4) : pp. 1011-1024.

- BENABDERRAHMANE M.C. et CHENCHOUNI, H. (2010). Assessing Environmental Sensitivity Areas to Desertification in Eastern Algeria using Mediterranean Desertification and Land Use “MEDALUS” Model. *Int. J. Sustain. Water Environ. Syst.* 2010, 1, 5–10.
- BENSAID A. (2006). SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la Wilaya de Naâma (Algérie), Thèse Doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble1, France, p. 288.
- BOU KHEIR R., GIRARD M., SHABAN A., KHAWLIE M., GHALEB F. et 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 : pp. 79-90 ;
- BOYOSSORO H. K., KOFFI F. K., BACHIR M. S., BIEMI J. et TRAORE I. (2007). Insécurité climatique et géorisques en Côte d'Ivoire : étude du risque d'érosion hydrique des sols dans la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire), *Sécheresse* 2007, 18 (1), Pp. 29-37
- BRUNET R., FERRAS R. et THERY H. (1992). Les mots de la géographie dictionnaire critique, 3^{ème} édition, collection Dynamiques du territoire, édition Reclus, 518 p.
- CALOZ R., BLASER T. J. et WILLEMIN G. (1993). Création d'une ortho-image à l'aide d'un modèle numérique d'altitude : influence des modes de ré échantillonnage radiométrique. In télédétection et cartographie. Ed. AUPELF-UREF. Les Presses de l'université du Québec. pp. 17-30.
- CCT (Centre Canadien de Télédétection) (2008). Tutoriel : Notions Fondamentales de Télédétection, [En ligne] consulté le 05 mai 2017, http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_f.php
- CERDAN O., GOVERS G., LE BISSONNAIS Y., OOST K., POESEN J., SABY N., GOBIN A., VACCA A., QUINTON J., AUERSWALD K., KLIK A., KWAAD F.J.P.M., RACLOT D., IONITA I., REJMAN J., ROUSSEVA S., MUXART T. et ROXOMARIA D. (2010). Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology*. 122. 167-177. 10.1016/j.geomorph.2010.06.011.
- CHAKROUN H., NOURI M., VACCA A. et REJEB M. N. (2006). Modélisation de la Désertification par l'Adaptation de la Méthode MEDALUS à un Bassin Versant du Centre

- de la Tunisie, 14th International Soil Conservation Organization Conference, Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environment, 4p.
- CHANDOUL I. R., BOUAZIZ S. et DHIA H. B. (2014). Utilisation des SIG pour l'évaluation de la sensibilité à la désertification par l'approche MEDALUS : Application « région de Gabès »
- CHATELAIN C. (1996). Possibilités d'application de l'imagerie satellitaire à haute résolution pour l'étude des transformations de la végétation en Côte d'Ivoire forestière, Thèse de doctorat ès-Sciences, Faculté des Sciences, Université de Genève, Suisse, 206 p.
- CLEUZION G. (2004). Une méthode de classification non supervisée pour l'apprentissage des règles et la recherche d'information. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans.
- CNRA (2009). La Direction Régionale CNRA de Man en quelques mots et chiffres, Man, 12p
- COLBY M.B. et HEMBREE C.H. (1955). Computation of total sediment discharge Niobrara River Near Cody, Nebraska. Supply, no 1357.
- COLMAR A. (2006). Evaluation du risque érosif en Bretagne : Analyse de sensibilité et validation du modèle MESALES. Mémoire de fin d'études ENITA Bordeaux - UMR SAS INRA-Agrocampus Rennes – UMR INRA-AGRO LISAH Montpellier. 56p.
- COMPANY A. (1993). Utilisation de la télédétection active dans l'estimation des surfaces potentiellement ruisselantes. Application à une région viticole méditerranéenne, bassin du Réart. BRGM, service géologique National, département télédétection, BP 6009-45060 ORLEANS CEDEX 02 France, 93p
- CONSEIL REGIONAL DU TONKPI (2013). *Tonkpi*, 9p.
- CORMARY Y. et MASSON J. (1964). Etude de conservation des eaux et du sol au Centre de Recherches du Génie Rural de Tunisie : application à un projet-type de la formule de perte de sols de Wischmeier. Cahiers ORSTOM. Série Pédologie, 2 (3), 3-26. ISSN 0029-7259
- DABIN B., LENEUF N. et RIOU G. (1960). Carte pédologique de la cote d'ivoire 1/2.000.000, Notice explicative. Institut d'Enseignement et, de Recherches Tropicales Adiopodoumé O.R.S.T.O.M. Publiée par le Secrétariat d'Etat à l'agriculture direction des sols, Abidjan, Côte d'Ivoire

- DCGTx (1990). Plan National de l'énergie, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- DELVAUX M. et NYS C. (2002). Géographie : Lire le monde. De Boeck Edition, Bruxelles. Pages 296. ISBN : 2-8041-4075-X.
- DE JONG S.M. et RIEZEBOS, H.T., (1997). SEMMED: a distributed approach to soil erosion modelling. In: Spiteri, A. (Ed.), Remote Sensing '96: Integrated Applications for Risk Assessment and Disaster Prevention for the Mediterranean. Balkema, Rotterdam, pp. 199–204.
- DE NONI G., VIENNOT M. et ASSELINE J. (2001). Terres d'altitude, terres de risque : La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes. Nouvelle édition [en ligne]. Marseille : IRD Éditions, 2001 (généré le 13 janvier 2019). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/8367>>. ISBN : 9782709917940. DOI : 10.4000/books.ird_éditions.8367.
- DE PLOEY J., (1989). Sol erosion map of western Europe. Cartes et posters édités par. Catena Verlag.
- DJEZOU W.B. (2009). Analyse de la consommation d'énergie et gestion durable en Côte d'Ivoire. Cellule d'Analyse de Politiques Economiques du CIRES. Abidjan, Côte d'Ivoire p 34.
- DUBE A. (1975). L'eau et l'érosion des sols. Ressources. Ministère des Richesses Naturelles du Québec. Vol VI (4),: 8-15.
- DUCHAUFOR P. (2001). Introduction à la science du sol: Sol, végétation, environnement. 6ème édition. Editions Dunod, Paris. 331 p.
- DUCROT D. (2005). Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources, Extraction de caractéristiques du paysage, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, INP Toulouse, 240p.
- DUMAS P. (2004). Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et SIG pour une gestion intégrée en Nouvelle-Calédonie. Thèse de géographie, Orléans, 402 p.

- EL GAROUANI A., CHEN H., LEWIS L., TRIBAK A., et 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, In Revue Télédétection, vol. 8, n° 3, pp 193-201.
- ENONZAN F. B. (2010). Utilisation de la télédétection et des SIG dans la gestion durable des aires protégées : cas des forêts classées de Dogo-Ketou au Bénin. Mémoire de fin d'études, Obafemi Awolowo University Campus, Nigéria. 89 p.
- ESCADAFAL R. (2002). CAMELEO: Changes in arid Mediterranean ecosystems on the long term and earth observation. Final report. INCO contract: ERBIC18CT970155, Ispra (Italie) : Joint Research Center (JRC).
- ESRI (2009). An overview of linear referencing– ArcGIS 9.1, Webhelptopic, 40p, [Enligne] <http://webhelp.esri.com>(dernièrevisiteavril 2017)
- FAO (1996). Forest resources assessment 1990 - Survey tropical forest cover studies of change processes. FAO Forestry Paper 130, Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome, Italie. [en ligne] <http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.htm> (dernière visite : 16 sept. 2013)
- FAO (1997). Élaboration d'une base de données sur l'occupation du sol grâce à la télédétection et à un système d'informations géographiques. Série Télédétection pour décideurs N° 21.
- FAO (2001). Situation des forêts du monde 2001. Rome, FAO, 2001. 181 p. 34
- FAO (2001). Woodfuel Sustainability Maps, Forest Energy Forum 9: 23-24, FAO, Rome.
- FAO (2007). Situation des forêts en 2007, Rome, 143p. <http://www.fao.org/docrep/009/a0773f/a0773f00.htm>
- FAO (2010). Global forest resources assessment : Terms and definitions. ROME, 27 p
- FAO (2017). Données forestières de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire, Cartographie de la dynamique forestière de 1986 à 2015, p. 1-18
- FAO. (2018). La situation des forêts du monde 2018. Les forêts au service du développement durable. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

- FLORET C. et LE FLOC'H E. (1975). L'évaluation de la production des parcours et de la sensibilité de la végétation naturelle, éléments de l'aménagement rationnel des zones présahariennes de la Tunisie. *Options méditerranéennes*, 26 : p.9-51.
- FOURNIER F. (1969). L'érosion hydrique et le climat. *Bulletin Technique d'Information. Météorologie et Agriculture*, (237), 111-115.
- FRENETTE M. et JULIEN P.Y. (1986). Scale effects in predicting soil erosion. In : *Drainage Basin Sediment Delivery*, IAHS Publ., 159, 253-259.
- FREYDIER R. (1997). Chimie des précipitations en Afrique intertropicale: cations et anions majeurs, éléments traces et acides organiques. Thèse de Doctorat Univ. P S, Toulouse, France. 235 p.
- GALEVSKI M. et RENEUVE P. (1955). La corrélation entre les pluies torrentielles et l'intensité de l'érosion (d'après les observations faites dans un périmètre torrentiel) - Avant-propos. ENEF, Ecole nationale des eaux et forêts, Nancy (FRA).
- GIRARD M. C. (1994). Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols : un exemple dans la région de Lodève. *Etude et gestion des sols*, 1,2, Pp 7-2.
- GIRARD M. C. et GIRARD C. M. (1999). *Traitement des données de télédétection*, DUNOD, Paris, 529p.
- GIRARD M.C. et GIRARD C.M. (2010). *Traitement des données de télédétection: environnement et ressources naturelles*, 2e ed., DUNOD 576p.
- GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.-C., BERTHELIN J. et MOREL J.-L. (2005). *Sols et environnement*. Paris, DUNOD, 816 p.
- GOODESS, C.M. et PALUTIKOF, J.P. (1994). Regional scenarios of climate change: changes in the precipitation regime of the Guadalentin Basin. *MEDALUS Working Paper Number 33*, 10 pp., (<https://crudata.uea.ac.uk/projects/medalus/>)
- GUILLAUMET J. L. et ADJANOHOUN E. (1971). La végétation de Côte d'Ivoire. In : Avenard J.M., Eldin E., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J. L., Adjanooun E. and Perraud A. (eds). *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*. 159-263. O.R.S.T.O.M., Paris.

- HAROUN C., MOHAMED C. et BENABDERRAHMANE A. (2010). Assessing Environmental Sensitivity Areas to Desertification in Eastern Algeria using Mediterranean Desertification and Land Use “MEDALUS” Model, *Int. J. of Sustainable Water & Environmental Systems, Volume 1, No. 1 (2010) 5-10* DOI: 10.5383/swes.01.01.002
- HIRCHE A., SALAMANI M., BOUGHANI M., NEDJRAOUI D. et ABDELLAOUI A. (2007). Contribution à l'étude de la désertification dans le sud Oranais. *Revue Française de photogrammétrie et de Télédétection*, 3/4 pp187-188.
- JAIN M. K., KOTHYARI U. C. et RANGA R. K.G. (2005). GIS based Distributed Model for Soil Erosion and Rate of Sediment Outflow from Catchments. *Journal of hydraulic engineering*, vol. 131, n° 9, p. 755-769.
- JAUFFRET S. (2001). Validation et comparaison de divers indicateurs de changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides. Application au suivi de la désertification dans le sud tunisien. Thèse de Doctorat, Université de Marseille III.
- JOACHIM H., JACQUES M. G. et WOLFGANG M. (1995). Land degradation, soil erosion and desertification monitoring in Mediterranean ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 12, Issue 1 & 2, 1995: 107 – 130
- JUSTICE C. O., TOWNSHEND J. R. G., HOLBEN B. N. et TUCKERC. J. (1985). Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data, in *International Journal of Remote Sensing* (6), pp1271-1318.
- KEPNER W.G. (2006). Introduction: desertification and security Perspectives for the Mediterranean Region. In: Kepner W.G., Rubio J.L., Mouat D.A., Pedrazzini F. (eds) *Desertification in the Mediterranean Region. A Security Issue. NATO Security Through Science Series*, vol 3. Springer, Dordrecht. DOI : https://doi.org/10.1007/1-4020-3760-0_01.
- KHALI I., BEN H. K.L-H., RAISSOUNI A. et EL ARRIM A. (2016). Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par approche SIG/USLE au niveau du bassin versant Kalaya (Maroc Nord Occidental). *J. Mater. Environ. Sci.*, Vol 7 N°8: p2778–2795.
- KHELIL A. (1997). *L'écosystème steppique : Quel avenir ?* Édition Dahleb, Alger.

- KIRKBY M.J. et COX N.J., (1995). A climatic index for soil erosion potential (CSEP) including seasonal and vegetation factors. *Catena* 25, 333-52.
- KIRKBY M. J., JONES R. J. A., IRVINE B., GOBIN A., GOVERS G., CERDAN O., VAN ROMPAEY A. J. J., LE BISSONNAIS Y., DAROUSSIN J., KING D., MONTANARELLA L., GRIMM M., VIEILLEFONT V., PUIGDEFABREGAS J., BOER M., KOSMAS C., YASSOGLOU N., TSARA M., MANTEL S., VAN LYNDEN G. J. et HUTING, J. (2004). Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map, Version 1 October 2003. Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.73 (S.P.I.04.73). European Soil Bureau Research Report No.16, EUR 21176, 18pp. and 1 map in ISO B1 format. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- KONE M., AMAN, A., YAO, A. C., COULIBALY, L. et N'GUESSAN, K. E. (2006). Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Revue Télédétection*, 7 (1-2-3-4) : pp 433-446.
- KOSMAS C., FERRARA A., BRIASOULI H., IMESON A. (1999). Methodology for Mapping Environmentally Sensitive Areas (ESAs) to Desertification. In: The Medalus Project Mediterranean Desertification and Land Use. Manual on Key Indicators of Desertification and Mapping Environmentally Sensitive Areas to Desertification; Kosmas, C., Kirkby, M., Geeson, N., Eds.; EU: Brussels, Belgium, 1999; pp. 31–47.
- KOUADIO Y. B., TOURE A. et T.ETKOLIB. Z. (2000). Essai de corrélation, par traitement d'une image HRV (XS) de SPOT, entre la dégradation des milieux naturels et les densités de population autour du Parc national du mont Péko en Côte d'Ivoire forestière. in *La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives*, AUF, Montréal, pp163-169.
- KOUASSI J.-L. (2014). Suivi de la dynamique de l'occupation du sol a l'aide de l'imagerie satellitaire et des systèmes d'informations géographiques : cas de la direction régionale des eaux et forêts de Yamoussoukro (cote d'ivoire), 51 p
- LAHLAOI H., RHINANE H., HILALI A., LAHSSINI S. et MOUKRIM S. (2017). Desertification assessment using MEDALUS model in watershed Oued El Maleh, Morocco. *Geosciences* 2017, 7, 50; doi:10.3390/geosciences7030050.

- LAMBIN, E. F. et EHRLICH, D. (1997). Land-cover changes in sub-Saharan Africa (1982-1991): Application of a change index based on remotely-sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale. *Remote Sensing of Environment*, 61 (2) : pp 181-200.
- LANDIS J. R. et KOCH G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data *Biometrics*, (33) 159-174, dans le *Kappa de Cohen: un outil de mesure de l'accord inter-juges sur des caractères qualitatifs* Frédéric Santos CNRS, UMR 5199 PACEA ; 2015
- LASSIEUR S. (2006). Utilisation de la télédétection et des techniques SIG pour détecter et prévenir les activités de déforestation illégales, Rapport de Stage Master 2ème Année, SIG et gestion de l'espace, Université JEAN MONNET, France, 45 p.
- LE HOUEROU H.N. (1992). Climatic change and desertification. In: *Science and Society*. UNESCO, Paris, pp.183-201.
- MAESTRIPIERI N. (2012). Dynamiques spatio-temporelles des plantations forestières industrielles dans le sud chilien. De l'analyse diachronique à la modélisation prospective. Thèse de doctorat, Université Toulouse 2 Le Mirail, Toulouse, France. 357 p.
- MAS J.-F. (1998). Suivi et analyse de la déforestation par télédétection multi-date et l'utilisation d'un système d'information géographique : Cas du sud-est du Mexique. Thèse de doctorat, Mexique, 210 p.
- MAYER L. (1990). Introduction to quantitative geomorphology. Édit. PRENTICE HALL, Englewood Cliffs (New Jersey), 380 p.
- MERCIER, J., R. (1991). la Déforestation en Afrique: Situation et Perspectives, Edisud, Opportunities and constraints, *Energy, Environment and Development in Africa*, Vol. 1.
- MERTENS B., SUNDERLIN W. D., NDOYE O. et LAMBINE. F. (2000). Impact of Macroeconomic Change on Deforestation in South Cameroon: Integration of Household Survey and Remotely-Sensed Data in *World Development* (28-6), pp 983-999.
- MERTENS B., FORNI E. et LAMBINE F. (2001). Prediction of the impact of logging activities on forest cover: A case- study in the East province of Cameroon, In *Journal of Environmental Management* (62), pp 21-36.

- MFOPOU M.Y. C., NGOUPAYOU J.R. N., YEMEFACK M. et AGOUME V. (2009). Physico-chimie des pluies du sud Cameroun forestier. *TROPICULTURA*, 2009, 27, 4, 239-245
- MINEF (2002). Rapport annuel du Port de Douala", Ministère de l'économie et des finances, Cameroun.
- MINEF (2014). Le nouveau Code forestier ivoirien, Loi n°2014- 427 du 14 juillet 2014, Abidjan. Côte d'Ivoire
- MOISE T. D. (2002). Caractérisation et suivi de la déforestation en milieu tropical par télédétection : application aux défrichements agricoles en Guyane française et au Brésil. Sciences de l'Homme et Société. Université d'Orléans, 2002. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, Orléans, France. 243 p.
- MOKHTARI N. (2016). Etude de la dynamique de la désertification dans le bassin versant de la Moulouya en intégrant les données issues de la télédétection et les données socio-économiques, Maroc (Thèse de doctorat). Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, 266 p., 108 Tableaux., 143 Figures.
- MONTIER C., LE BISSONNAIS Y., JAMAGNE M., DAROUSSIN J. et KING D. (1998). Aspect cartographique de l'érosion des sols en France, C. R. Acad. Agric., 84 n°7, pp. 125-139.
- MORGAN R. P., HATCH C., ULEIMAN W. et WAN H. (1982). A simple procedure for assessing soil erosion risk; a case study for Malaysia. *Z. Geomorphol. Suppl.* 44, 69-89.
- MOUTON J.A. (1959). *Agronomie Tropicale*, Vol. XIV, N° 2, 225-231.
- MYINT S.W. et WANG L. (2006). Multicriteria decision approach for land use and land cover change using Markov chain analysis and a cellular automata approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32 : 390-404.
- N'DA D. H., N'GUESSAN E. K., WAJDA M. E., KOUADIO A. (2008). Apport de la télédétection au suivi de la déforestation dans le Parc National de la Marahoué (Côte-D'Ivoire). *Bulletin - Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, pp.17-34.
- N'GUESSAN E. et CONDE A. (1989). Utilisation des données des satellites à haute résolution (HRV de SPOT et TM de Landsat) pour l'étude des pressions anthropiques sur

- la forêt classée de Korogho dans le nord de la Côte d'Ivoire. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT), 116 : 18-26.
- N'GUESSAN K. A. (1989). Commentaire du Code Forestier et de la législation forestière de la Côte d'Ivoire. Librairie Générale de Droit et de Jurisprudence, Paris, France, 333 p
- N'GUESSAN K. E. (2004). Utilisation des données satellitaires à haute résolution pour l'étude des ressources végétales en Côte d'Ivoire: Cas des forêts classées de Badenou et du Haut Sassandra. Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse France. 219p.
- N'GUESSAN K. E., N'DA D. H., BELLAN M. F., et BLASCO F. (2006). Pression anthropique sur une réserve forestière en Côte d'Ivoire: Apport de la télédétection. Télédétection, 2006, Vol. 5, n° 4, pp. 307-323.
- N'GUETTIA K.K. (1999). Gestion Participative de la Forêt Ivoirienne : Sensibilisation des Populations Urbaines, Ecoforêt, no 32, 2è trimestre, 15-20.
- NOUFE D. (2011). *Changements hydroclimatiques et transformations de l'agriculture* : Paris1, 375 P.
- OLIVIER D. (2010). Simulation du ruissellement d'eau de pluie sur des surfaces agricoles. Autre [qbio. OT]. Université d'Orléans, 2010. Français. <NNT : 2010ORLE2016>. <tel-00531377v3>
- OSZWALD, J. (2005). Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000) : Suivi par télédétection et développement d'une approche cartographique. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France. 304 p.
- OSZWALD J., KOUACOU A., KERGOMARD J.-M. et ROBIN M. (2007). Représenter l'espace pour structurer le temps : Approche des dynamiques de changements forestiers dans le sud-est de la Côte d'Ivoire par télédétection. Revue Télédétection, 7 (1-2-3-4) : 271-282.
- OUATTARA K., SAVADOGO O. M., OUEDRAOGO I., BARRON J., GORDON L., ENFORS E. et ZOMBRE N. P. (2003). Etats des écosystèmes sahéliens : reverdissement, perte de la diversité et qualité des sols. *Afrique SCIENCE 11(5) (2015) 433 - 446* 433 . ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info>.

- PAEGELOW M., VILLA N., CORNEZ L., FERRATY F., FERRE L. et SARDA P. (2004). Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne. *Cybergeo : European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*. n°295, 20 p. [en ligne] <http://cybergeo.revues.org/2811> (dernière visite : 03/12/2013).
- PAEGELOW, M. et CAMACHO-OLMEDO M. T. (2005). Possibilities and limits of prospective GIS land cover modelling - a compared case study : Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *International Journal of Geographical Information Science*, 19 (6) : 697-722.
- PAIN-ORCET M., LO SEEN D., FAUVET N., TREBUCHON J.-F. et DIPAPOUNDJI B. (1998). Les cartes, la télédétection et les SIG, des outils pour la gestion et l'aménagement des forêts tropicales d'Afrique Centrale. CIRAD-Forêt, Montpellier, France. 27 p.
- PERRAUD A. et DE LA SOUCHERE P. (1971). Carte de l'Esquisse Pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/500 000 (feuille Sud-Est, Ministère de l'Agriculture).
- PIMENTEL D., TORT M., D'ANNA L., KRAWIC A., BERGER J., ROSSMAN J., MUGO F., DOON N., SCHRIBERG M., HOWARD E., LEE S., et TALBOT T. (1998). Ecology and increase disease, population growth and environmental degradation. *Bioscience* vol.48, n°10, p. 817-826.
- PLAN BLEU et FAO (2015). Agents et causes de la déforestation et dégradation dans les sites pilotes du projet, Rapport annuel, *projet : Optimiser la production de biens et services par les écosystèmes boisés méditerranéens dans un contexte de changements globaux*. France, 116 p.
- RAPHIOU M. (2013). Gestion de la fertilité des sols pour une meilleure productivité dans les systèmes de culture à base d'igname au Bénin (Benin, Thèse de Doctorat, 248 p)
- REY F. et BERGER F. (2002). Interactions végétation érosion et génie écologique pour la maîtrise de l'érosion en montagne. Consulté en ligne le 16/03/18, 8p. URL : <https://www.inbo-news.org/IMG/pdf/Rey-Berger-2.pdf>

- RENARD K.G., FOSTER G.R., WEESIES G.A., MCCOOL D.K., YODER D.C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook No. 703, USDA-ARS
- RGPH. (2014). Recensement général de la population et de l'habitat
- RIPLEY P.O., KALBFLEISCH W.M., BOURGET S.J. et COOPER D.J. (1962). Érosion du sol par l'eau: dommages, moyens préventifs et répression. Agriculture Canada, Publication 1 083.
- ROOSE E. (1977). Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en parcelles expérimentales. Document Orstom 78. Paris : Orstom éditions.
- ROOSE E. (1985). Terrasses de diversions et microbarrages perméables? Analyse de leur efficacité en milieu paysan ouest-africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne". IV^e conférence Internationale de conservation des sols. ISCO. Maracay (Venezuela) 3-5 novembre 1985, 15 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: 70, 420 p
- ROOSE E. (1995). Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. ORSTOM ; Laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés Montpellier p87-97.
- ROOSE E., MAZOUR M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., ARABI M. et MORSLI B. (1993). Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES. Cah ORSTOM Pédol 28,2 : 289-308.
- ROOSE E. et SARRAILH J.M., (1990). Erodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles, Cahiers de l'ORSTOM, Série Pédologique, vol. 25, n°12, 24 p.
- ROUET I. (2009). Caractérisation et éléments de quantification d'aléas naturels liés à l'évolution des versants dans les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Thèse de doctorat, Université de la Nouvelle-Calédonie, Nouméa, 218 p.

- ROUGERIE G. (1960). Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière. Mémoire IFAN 58. Dakar : Institut Fondamental d'Afrique Noire (IFAN).
- ROUSE J. W., HAAS R. H., SCHELL J. A., DEERING D. W. et ETHARLAN J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement of natural vegetation, NASA/GSFC Final Report, Greenbelt, 371p.
- SABIR M. (1986). L'érosion hydrique et sa quantification. Ressources en eau et aménagement, Institut français de recherche scientifique Pour le développement en coopération, p 83
- SALAMANI M. et HIRCHE A. (2006). L'état de la désertification en Algérie. In : Actes des journées internationales sur la désertification et le développement durable. CRSTRA-Université, Biskra. p.165-171.
- SHORT N. M. (2000). Remote Sensing Tutorial, edition NASA. [En ligne] [http:// rst. gsfc. nasa. gov/](http://rst.gsfc.nasa.gov/) (Dernière visite, Décembre 2010).
- SONG C., CURTIS E. W., KAREN C. S., MARY P. L., et SCOTT A. M. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sens. Environ.* 75, p. 230-244.
- SOUIDI Z., ABDERRAHMANE H. et FREDERIC D. (2014). Suivi du risque de dégradation des sols par télédétection: application au bassin versant d'oued fergoug dans les monts des Béni-Chougrane en Algérie, in *Imprensa da Universidade de Coimbra; RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança*, en ligne : URI:<http://hdl.handle.net/10316.2/34829>, consulté le 08 Mai 2017, 7p.
- TAGINI B. et BAGARRE E. (1972). Carte géologique de la Côte d'Ivoire, 1/1000000. Sodemi, Côte d'Ivoire, 1972.
- TANKOUANO B. (1992). Cartographie de la dynamique du couvert végétal du Parc National des Deux Balé à l'Ouest du Burkina Faso [Mapping land cover dynamics of Deux Balé National Park, Western Burkina Faso] *JO - International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 16, no. 4, pp. 837–846, June 2016.

- THOMAS T. (1991). Aspects of soil degradation and conservation measures in Agucho catchment, West Hararghe. Soil Conservation Revercha Project Report 19. University of Bern, Switzerland. 125 pp.
- TIESSE BI A., EBOUA N. W. et N'DA D. H. (2017). Apport de la télédétection pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol dans la région montagneuse du Tonkpi (Côte d'Ivoire). In *European Scientific Journal*. Vol.13, N° 15, pp310-329.
- TRA BI Z. A. (2013). Etude d'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par l'utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). Thèse de doctorat unique, Université Félix Houphouët Boigny, 190p.
- TUCKERC J. (1979). Red and photographic in fared linear combinations for monitoring vegetation. Remote tropical rainforest vegetation, in *International Journal of Remote Sensing* (15), pp1595-1610.
- VANESSA R. (2011). Le territoire de l'Union européenne : abus de langage ou nouvelle réalité ? Institut Européen de l'Université de Genève, Collection Euryopa vol. 76-2012
- VAN DER KNIJFF J.M., JONES R.J.A. et MONTANARELLA L. (2000). Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau, Joint Research Center of the European Commission. In press.
- VAN ROMPAEY., KRASA A. et DOSTAL J. (2003). Modelling sediment supply to rivers and reservoirs in Eastern Europe during and after the collectivisation period. 494: 169. <https://doi.org/10.1023/A:1025410230907>, Kluwer Academic Publishers, ISSN 0018-8158
- VIERS G. (1969). Eléments de géomorphologie. In: *Revue de géographie alpine*, tome 57, n°2, pp. 418-419.
- WACHAL D.J. et HUDAK P.F. (2000). Mapping landslide susceptibility in Travis County, *Geojournal Texas, USA* 51: 245. <https://doi.org/10.1023/A:1017524604463>
- WALL G.J., COOTE D.R., PRINGLE E.A. et SHELTON I.J. (2002). RUSLE-CAN — Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada. Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale

- de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, No de la contribution AAC2244F, 117 p.
- WILLIAMS J. R. (1975). Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor, Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, ARS-S-40, USDA, Agricultural Research Service, Washington D. C., 244-252.
- WILSON J. P. et LORANG M. S. (2000). Spatial models of soil erosion and GIS. In Spatial Models and GIS: New Potential and New Models, Fotheringham AS, Wegener M (eds). Taylor et Francis: Philadelphia, PA; pp83–108.
- WISCHMEIER W. H. et SMITH D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A Guide to conservation planning, United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook No. 537. United States Government Printing Office, Washington, DC.
- YASSOGLOU N., MONTANARELLA L., GOVERS G., VAN LYNDEN G., JONES R.J.A., ZDRULI P., KIRKBY M., GIORDANO A., LE BISSONNAIS Y., DAROUSSIN J. et KING D. (1998). Soil Erosion in Europe. European Soil Bureau.
- YOUSSEF EL H., (2013). 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. Maroc.

ANNEXES

Tableau XXX : Caractéristiques de l'occupation du sol en 1990 et 2000

Thèmes	Superficie (ha)		Pourcentage (%)	
	1990	2000	1990	2000
Forêt dense	1 634 427 000	1 345 678 200	11,85%	12,24%
Forêt dégradé	1 995 780 600	1 931 697 900	45,97%	38,84%
Cultures et jachères	6 204 040 200	6 025 872 600	13,05%	13,59%
Sol nu	154 142 100	232 102 800	2,75%	2,75%
Savane arboré	950 522 400	1 368 945 900	26,39%	32,58%
cours d'eau	16 164 000	16 164 000		
Habitat	243 760 500	278 375 400		

Tableau XXXI: Caractéristiques de l'occupation du sol en 2000 et 2011

classes	Superficie (Ha)		Pourcentage(%)	
	2000	2011	2000	2011
Forêt dense	1 345 678 200	1 053 471 600	12,24%	11,84%
Forêt dégradé	1 931 697 900	2 112 972 698	38,84%	51,71%
Cultures et jachères	6 025 872 600	5 699 081 800	13,59%	5,26%
Sol nu	232 102 800	146 637 000	2,75%	2,75%
Savane arboré	1 368 945 900	1 889 033 400	32,58%	28,44%
cours d'eau	16 164 000	16 164 800		
Habitat	278 375 400	281 475 502		

Tableau XXXII : Caractéristiques de l'occupation du sol en 2011 et 2015

Classes	Superficie (ha ²)		Pourcentage (%)	
	2011	2015	2011	2015
Forêt dense	1 053 471 600	872 382 600	11,84%	7,63%
Forêt dégradé	2 112 972 698	2 052 115 096	51,71%	52,92%
Cultures et jachères	5 699 081 800	6 662 051 000	5,26%	7,55%
Sol nu	146 637 000	239 037 300	2,75%	2,75%
Savane arboré	1 889 033 400	1 071 499 500	28,44%	29,15%
cours d'eau	16 164 800	16 165 000		
Habitat	281 475 502	285 586 304		

Tableau XXXIII : Evolution de l'occupation du sol en fonction du temps en basses altitudes

Classes de l'occupation du sol	Superficies des classes (ha)				variation (%) de 1990- 2015
	1990	2000	2011	2015	
Forêts denses	86 543,19	75 396,78	72 698,07	38 671,11	-55,32%
Forêts dégradées	32 519,25	51 445,80	58 181,81	59 877,42	84,13%
Cultures et Jachères	226 932,52	234 595,84	252 670,98	269 157,42	18,61%
sols nus	3 187,53	6 628,65	5 940,36	9 420,01	195,53%
Savane arborée	26 890,67	29 263,59	38 039,58	39 252,49	45,97%
Cours d'eau	1 371,74	1 371,74	1 371,82	1 371,84	0,01%
Habitat	12 785,58	14 569,95	14 732,21	14 947,37	16,91%

Tableau XXXIV : Evolution de l'occupation du sol en moyennes altitudes

Classes de l'occupation du sol	Superficies des classes (ha)				% de variation (1990-2015)
	1990	2000	2011	2015	
Forêts denses	55 516,77	45 493,56	31 012,77	35 525,97	-36,01%
Forêts dégradées	41 182,79	64 199,56	71 956,74	60 372,35	46,60%
Cultures et Jachères	293 855,94	243	233	290 754,74	-1,06%
sols nus	9 327,78	11 332,26	4 831,00	9 125,91	-2,16%
Savane arborée	42 487,38	53 395,43	57 421,97	58 956,12	38,76%
Cours d'eau	139,14	139,14	139,14	139,14	0,00%
Habitat	9 680,41	11 666,82	11 782,33	11 899,21	22,92%

Tableau XXXV : Evolution de l'occupation du sol en hautes altitudes

Classes de l'occupation du sol	Superficies des classes (ha)				% de variation (1990-2015)
	1990	2000	2011	2015	
Forêts denses	21 330,30	13 634,31	9 180,75	19 440,72	-8,86%
Forêts dégradées	125 811,99	77 462,46	81 090,93	84 895,90	-32,52%
Cultures et Jachères	99 416,52	145 988,10	144 576,88	90 079,21	-9,39%
sols nus	2 893,95	5 241,92	3 887,64	5 350,14	84,87%
Savane arborée	25 643,70	32 596,65	27 381,19	24 906,96	-2,87%
Cours d'eau	105,00	105,00	105,00	105,00	0,00%
Habitat	1 902,24	1 591,84	1 623,98	1 702,89	-10,48%

Tableau XXXVI : Quelques points d'observations pour les sites d'entrainement

Départements	Villes	Coloration sur la composition colorée	Projection	x	y	N°
Biankouma	Biankouma	Vert clair	29 N	651 462	856 504	1
Biankouma	Biankouma	Vert foncé	29 N	649 640	856 684	2
Biankouma	Biankouma	Jaune	29 N	651 462	856 782	3
Biankouma	Biankouma	Orange	29 N	652 440	856 118	4
Biankouma	Biankouma	Bleu	29 N	650 349	856 424	5
Biankouma	Gbonné	Vert clair	29 N	674 368	832 705	6
Biankouma	Gbonné	Vert foncé	29 N	677 054	833 140	7
Biankouma	Gbonné	Jaune	29 N	674 321	832 434	8
Biankouma	Gbonné	Orange	29 N	675 358	832 728	9
Biankouma	Gbonné	Bleu	29 N	678 385	832 198	10
Biankouma	Mangouin-yrongouin	Orange	29 N	653 497	844 929	11
Biankouma	Mangouin-yrongouin	Bleu	29 N	654 051	844 910	12
Biankouma	Mangouin-yrongouin	Vert clair	29 N	653 754	845 710	13
Biankouma	Mangouin-yrongouin	Vert foncé	29 N	654 100	845 424	14
Biankouma	dingouin	Jaune	29 N	653 782	847 074	15
Biankouma	dingouin	Vert clair	29 N	653 685	847 561	16
Biankouma	dingouin	Vert foncé	29 N	653 853	847 561	17
Biankouma	dingouin	Jaune	29 N	653 517	847 131	18
Biankouma	dingouin	Orange	29 N	653 690	847 630	19
Biankouma	Fondeville	Vert clair	29 N	653 531	848 649	20
Man	Man	Vert clair	29 N	656 861	819 778	21
Man	Man	Vert foncé	29 N	657 798	819 099	22
Man	Man	Jaune	29 N	658 930	818 383	23
Man	Man	Orange	29 N	658 681	818 963	24

Man	Man	Bleu	29 N	658 740	817 976	25
Man	Sangouiné (Zonlé 1)	Vert clair	29 N	641 342	816 114	26
Man	Sangouiné (Zonlé 1)	Vert foncé	29 N	642 573	814 656	27
Man	Sangouiné (Zonlé 1)	Jaune	29 N	640 013	815 887	28
Man	Sangouiné (Zonlé 1)	Orange	29 N	641 277	815 223	29
Man	Sangouiné (Zonlé 1)	Bleu	29 N	642 691	814 562	30
Man	Krikouma	Vert clair	29 N	665 340	819 056	31
Man	Krikouma	Vert foncé	29 N	665 478	819 856	32
Man	Krikouma	Jaune	29 N	666 348	818 947	33
Man	Krikouma	Orange	29 N	665 804	818 403	34
Man	Kpangouin	Bleu	29 N	663 165	820 934	35
Man	Kpangouin	Orange	29 N	663 837	820 706	36
Man	Kpangouin	Bleu	29 N	663 135	820 311	37
Man	Kpangouin	Vert clair	29 N	663 204	821 991	38
Man	Kpangouin	Vert clair	29 N	664 124	821 932	39
Man	Kpangouin	Vert foncé	29 N	662 868	820 815	40
Danané	Danané (Douapleu)	Vert clair	29 N	595 219	803 617	41
Danané	Danané (Douapleu)	Vert foncé	29 N	595 945	803 765	42
Danané	Danané (Douapleu)	Jaune	29 N	597 645	803 879	43
Danané	Danané (Douapleu)	Orange	29 N	593 883	803 167	44
Danané	Danané (Douapleu)	Bleu	29 N	595 858	803 725	45
Danané	Zouan Hounien	Vert clair	29 N	586 377	763 782	46
Danané	Zouan Hounien	Vert foncé	29 N	594 377	755 782	47
Danané	Zouan Hounien	Jaune	29 N	577 298	788 679	48
Danané	Zouan Hounien	Orange	29 N	587 298	764 67	49
Danané	BLIZREU	Vert clair	29 N	587 617	801 546	50
Danané	BLIZREU	Vert foncé	29 N	587 755	801 429	51

Danané	BLIZREU	Jaune	29 N	587 373	801 644	52
Danané	BLIZREU	Orange	29 N	587 471	801 518	53
Danané	BLIZREU	Bleu	29 N	587 405	801 443	54
Danané	Dongouine	Orange	29 N	588 581	805 973	55
Danané	Dongouine	Bleu	29 N	588 880	806 116	56
Danané	Dongouine	Vert clair	29 N	588 655	805 708	57
Danané	Dongouine	Vert clair	29 N	588 442	806 369	58
Danané	Dongouine	Vert foncé	29 N	588 993	806 351	59
Danané	Dongouine	Bleu	29 N	589 089	806 088	60
Zouan Hounien	Zouan Hounien	Vert foncé	29 N	589 801	760 345	61
Zouan Hounien	Zouan Hounien	Jaune	29 N	601 400	772 437	62
Zouan Hounien	Zouan Hounien	Orange	29 N	590 792	761 946	63
Zouan Hounien	Zouan Hounien	Bleu	29 N	580 891	761 003	64
Zouan Hounien	Zouan Hounien	Orange	29 N	594 210	751 927	65
Zouan Hounien	Zouan Hounien	Bleu	29 N	588 434	767 486	66
Zouan Hounien	Zouan Hounien	Vert clair	29 N	592 206	772 437	67
Zouan Hounien	Zouan Hounien	Vert foncé	29 N	600 104	765 246	68
Zouan Hounien	Zouan Hounien	Vert foncé	29 N	596 568	784 224	69
Zouan Hounien	Zouan Hounien	Jaune	29 N	606 822	774 323	70
Zouan Hounien	Bin-houyé	Vert clair	29 N	578 533	754 167	71
Zouan Hounien	Bin-houyé	Vert foncé	29 N	585 959	750 984	72
Zouan Hounien	Bin-houyé	Jaune	29 N	590 556	746 505	73
Zouan Hounien	Bin-houyé	Orange	29 N	573 347	745 798	74
Zouan Hounien	Bin-houyé	Bleu	29 N	578 180	744 619	75
Zouan Hounien	Bin-houyé	Vert clair	29 N	584 545	740 258	76
Zouan Hounien	Bin-houyé	Vert foncé	29 N	568 514	740 611	77
Zouan Hounien	Bin-houyé	Jaune	29 N	573 583	736 957	78

Zouan Hounien	Bin-houyé	Orange	29 N	578 651	732 832	79
Zouan Hounien	Bin-houyé	Bleu	29 N	571 815	732 007	80
Sipilou	Sipilou	Vert clair	29 N	610 476	883 589	81
Sipilou	Sipilou	Vert foncé	29 N	620 849	876 870	82
Sipilou	Sipilou	Jaune	29 N	634 640	869 562	83
Sipilou	Sipilou	Orange	29 N	643 716	863 433	84
Sipilou	Sipilou	Bleu	29 N	600 811	873 924	85
Sipilou	Sipilou	Vert clair	29 N	614 013	868 973	86
Sipilou	Sipilou	Vert foncé	29 N	629 807	860 722	87
Sipilou	Sipilou	Jaune	29 N	601 754	866 026	88
Sipilou	Sipilou	Orange	29 N	603 993	857 422	89
Sipilou	Sipilou	Bleu	29 N	620 613	855 182	90
Sipilou	Sipilou	Vert clair	29 N	634 758	849 642	91
Sipilou	YORODOUGOU	Vert foncé	29 N	622 879	860 560	92
Sipilou	YORODOUGOU	Jaune	29 N	623 278	860 405	93
Sipilou	YORODOUGOU	Orange	29 N	623 484	860 914	94
Sipilou	ZOKOMBA	Vert clair	29 N	625 293	861 731	95
Sipilou	ZOKOMBA	Vert foncé	29 N	625 383	861 538	96
Sipilou	ZOKOMBA	Jaune	29 N	625 370	861 519	97
Sipilou	SAMAMPLEU	Orange	29 N	617 224	858 117	98
Sipilou	YALO	Bleu	29 N	626 769	872 985	99
Sipilou	YALO	Vert clair	29 N	627 191	873 123	100

Coloration de la composition colorée et correspondance en classe : Vert clair : Forêt dégradée ; Vert foncé : Forêt dense ; Jaune : cultures et jachères ; Rose : Terrains nus et habitations ; Bleu : cours d'eau et Bas-fond

Tableau XXXVII : Points d'observations de la vérité-terrain

Départements	classes observées sur le terrain	Projection	x	y	N°
Biankouma	savane arborée	29 N	651 462	856 504	1
Biankouma	savane arborée	29 N	649 640	856 684	2
Biankouma	savane arborée	29 N	651 462	856 782	3
Biankouma	savane arborée	29 N	652 440	856 118	4
Biankouma	savane arborée	29 N	650 349	856 424	5
Biankouma	savane arborée	29 N	674 368	832 705	6
Biankouma	savane arborée	29 N	677 054	833 140	7
Biankouma	forêt dense	29 N	674 321	832 434	8
Biankouma	forêt dense	29 N	675 358	832 728	9
Biankouma	forêt dense	29 N	675 357	832 729	10
Biankouma	forêt dense	29 N	675 356	832 730	11
Biankouma	forêt dense	29 N	675 355	832 727	12
Biankouma	forêt dense	29 N	675 354	832 726	13
Biankouma	forêt dense	29 N	675 353	832 725	14
Biankouma	habitat	29 N	675 352	832 724	15
Biankouma	habitat	29 N	675 351	832 723	16
Biankouma	habitat	29 N	675 350	832 722	17
Biankouma	habitat	29 N	675 358	832 728	18
Biankouma	habitat	29 N	675 358	832 728	19
Biankouma	habitat	29 N	675 358	832 728	20
Biankouma	habitat	29 N	675 358	832 728	21
Biankouma	cultures et jachères	29 N	675 358	832 728	22
Biankouma	cultures et jachères	29 N	675 358	832 728	23
Biankouma	cultures et jachères	29 N	675 358	832 728	24

Biankouma	cultures et jachères	29 N	675 358	832 728	25
Biankouma	cultures et jachères	29 N	675 358	832 728	26
Biankouma	cultures et jachères	29 N	675 358	832 728	27
Biankouma	cultures et jachères	29 N	675 358	832 728	28
Biankouma	Sols nus	29 N	675 358	832 728	29
Biankouma	Sols nus	29 N	678 385	832 198	30
Biankouma	Sols nus	29 N	653 497	844 929	31
Biankouma	Sols nus	29 N	654 051	844 910	32
Biankouma	Sols nus	29 N	653 754	845 710	33
Biankouma	Sols nus	29 N	654 100	845 424	34
Biankouma	Sols nus	29 N	653 782	847 074	35
Biankouma	cours d'eau	29 N	653 685	847 561	36
Biankouma	cours d'eau	29 N	653 853	847 561	37
Biankouma	cours d'eau	29 N	653 517	847 131	38
Biankouma	cours d'eau	29 N	653 690	847 630	39
Biankouma	cours d'eau	29 N	653 531	848 649	40
Man	forêt dense	29 N	656 861	819 778	41
Man	forêt dense	29 N	657 798	819 099	42
Man	forêt dense	29 N	658 930	818 383	43
Man	forêt dense	29 N	658 681	818 963	44
Man	forêt dense	29 N	658 740	817 976	45
Man	forêt dense	29 N	641 342	816 114	46
Man	forêt dense	29 N	642 573	814 656	47
Man	cours d'eau	29 N	640 013	815 887	48
Man	cours d'eau	29 N	641 277	815 223	49
Man	cours d'eau	29 N	642 691	814 512	50
Man	cours d'eau	29 N	642 675	814 333	51

Man	cours d'eau	29 N	642 721	814 562	52
Man	cours d'eau	29 N	642 754	814 488	53
Man	cours d'eau	29 N	642 893	814 522	54
Man	Sols nus	29 N	648 851	823 502	55
Man	Sols nus	29 N	648 128	823 555	56
Man	Sols nus	29 N	648 209	823 543	57
Man	Sols nus	29 N	648 248	823 527	58
Man	Sols nus	29 N	648 381	823 519	59
Man	Sols nus	29 N	648 351	823 501	60
Man	Sols nus	29 N	648 293	823 599	61
Man	habitat	29 N	648 025	823 587	62
Man	habitat	29 N	650 111	820 632	63
Man	habitat	29 N	650 124	820 799	64
Man	habitat	29 N	650 259	820 808	65
Man	habitat	29 N	650 351	820 529	66
Man	habitat	29 N	650 409	820 639	67
Man	habitat	29 N	650 519	820 588	68
Man	forêt dégradée	29 N	665 255	819 025	69
Man	forêt dégradée	29 N	665 243	819 492	70
Man	forêt dégradée	29 N	665 340	819 056	71
Man	forêt dégradée	29 N	665 478	819 856	72
Man	forêt dégradée	29 N	666 348	818 947	73
Man	forêt dégradée	29 N	665 804	818 403	74
Man	forêt dégradée	29 N	663 165	820 934	75
Man	cultures et jachères	29 N	663 837	820 706	76
Man	cultures et jachères	29 N	663 135	820 311	77
Man	cultures et jachères	29 N	663 204	821 991	78

Man	cultures et jachères	29 N	664 124	821 932	79
Man	cultures et jachères	29 N	662 868	820 815	80
Danané	Sols nus	29 N	595 219	803 617	81
Danané	Sols nus	29 N	595 945	803 765	82
Danané	Sols nus	29 N	597 645	803 879	83
Danané	Sols nus	29 N	593 883	803 167	84
Danané	Sols nus	29 N	595 858	803 725	85
Danané	Sols nus	29 N	597 641	803 879	86
Danané	Sols nus	29 N	597 642	803 879	87
Danané	cultures et jachères	29 N	597 643	803 870	88
Danané	cultures et jachères	29 N	597 645	803 879	89
Danané	cultures et jachères	29 N	597 646	803 881	90
Danané	cultures et jachères	29 N	597 649	803 875	91
Danané	cultures et jachères	29 N	597 648	803 874	92
Danané	cultures et jachères	29 N	597 645	803 879	93
Danané	cultures et jachères	29 N	586 377	763 782	94
Danané	forêt dense	29 N	820 000	580 100	95
Danané	forêt dense	29 N	820 010	580 109	96
Danané	forêt dense	29 N	820 011	580 108	97
Danané	forêt dense	29 N	820 012	580 105	98
Danané	forêt dense	29 N	820 017	580 101	99
Danané	forêt dense	29 N	820 020	580 111	100
Danané	forêt dense	29 N	820 022	580 130	101
Danané	habitat	29 N	805100	595 210	102
Danané	habitat	29 N	805115	595 208	103
Danané	habitat	29 N	805113	595 204	104
Danané	habitat	29 N	805119	595 203	105

Danané	habitat	29 N	805122	595 202	106
Danané	habitat	29 N	594 377	755 782	107
Danané	habitat	29 N	577 298	788 679	108
Danané	cours d'eau	29 N	587 298	764 67	109
Danané	cours d'eau	29 N	587 617	801 546	110
Danané	cours d'eau	29 N	587 755	801 429	111
Danané	cours d'eau	29 N	587 373	801 644	112
Danané	cours d'eau	29 N	587 471	801 518	113
Danané	cours d'eau	29 N	587 405	801 443	114
Danané	cours d'eau	29 N	588 581	805 973	115
Danané	forêt dégradée	29 N	588 880	806 116	116
Danané	forêt dégradée	29 N	588 655	805 708	117
Danané	forêt dégradée	29 N	588 442	806 369	118
Danané	forêt dégradée	29 N	588 993	806 351	119
Danané	forêt dégradée	29 N	589 089	806 088	120
Zouan Hounien	Sols nus	29 N	589 801	760 345	121
Zouan Hounien	Sols nus	29 N	601 400	772 437	122
Zouan Hounien	Sols nus	29 N	590 792	761 946	123
Zouan Hounien	Sols nus	29 N	580 891	761 003	124
Zouan Hounien	Sols nus	29 N	594 210	751 927	125
Zouan Hounien	Sols nus	29 N	594 225	751 933	126
Zouan Hounien	Sols nus	29 N	594 246	751 929	127
Zouan Hounien	cultures et jachères	29 N	540 111	750210	128
Zouan Hounien	cultures et jachères	29 N	540 212	750209	129
Zouan Hounien	cultures et jachères	29 N	540 179	750299	130
Zouan Hounien	cultures et jachères	29 N	540 109	750239	131
Zouan Hounien	cultures et jachères	29 N	540 245	750219	132

Zouan Hounien	cultures et jachères	29 N	540 301	750251	133
Zouan Hounien	cultures et jachères	29 N	540 483	750266	134
Zouan Hounien	forêt dense	29 N	600 099	780 122	135
Zouan Hounien	forêt dense	29 N	600 112	780 325	136
Zouan Hounien	forêt dense	29 N	600 109	780 348	137
Zouan Hounien	forêt dense	29 N	600 219	780 297	138
Zouan Hounien	forêt dense	29 N	600 325	780 218	139
Zouan Hounien	forêt dense	29 N	600 249	780 099	140
Zouan Hounien	forêt dense	29 N	600 541	780 124	141
Zouan Hounien	habitat	29 N	590 230	790 110	142
Zouan Hounien	habitat	29 N	590 248	790 289	143
Zouan Hounien	habitat	29 N	590 299	790 220	144
Zouan Hounien	habitat	29 N	590 198	790 159	145
Zouan Hounien	habitat	29 N	588 434	767 486	146
Zouan Hounien	habitat	29 N	592 206	772 437	147
Zouan Hounien	habitat	29 N	600 104	765 246	148
Zouan Hounien	cours d'eau	29 N	596 568	784 224	149
Zouan Hounien	cours d'eau	29 N	606 822	774 323	150
Zouan Hounien	cours d'eau	29 N	578 533	754 167	151
Zouan Hounien	cours d'eau	29 N	585 959	750 984	152
Zouan Hounien	cours d'eau	29 N	590 556	746 505	153
Zouan Hounien	cours d'eau	29 N	573 347	745 798	154
Zouan Hounien	cours d'eau	29 N	578 180	744 619	155
Zouan Hounien	forêt dégradée	29 N	584 545	740 258	156
Zouan Hounien	forêt dégradée	29 N	568 514	740 611	157
Zouan Hounien	forêt dégradée	29 N	573 583	736 957	158
Zouan Hounien	forêt dégradée	29 N	578 651	732 832	159

Zouan Hounien	forêt dégradée	29 N	571 815	732 007	160
Sipilou	savane arborée	29 N	620 111	820 309	161
Sipilou	savane arborée	29 N	620 125	820 332	162
Sipilou	savane arborée	29 N	620 148	820 299	163
Sipilou	savane arborée	29 N	620 129	820 287	164
Sipilou	savane arborée	29 N	620 133	820 275	165
Sipilou	savane arborée	29 N	620 143	820 256	166
Sipilou	savane arborée	29 N	620 153	820 232	167
Sipilou	forêt dense	29 N	615 102	839 943	168
Sipilou	forêt dense	29 N	615 102	839 725	169
Sipilou	forêt dense	29 N	615 102	839 619	170
Sipilou	forêt dense	29 N	615 102	839 601	171
Sipilou	forêt dense	29 N	615 102	839 599	172
Sipilou	forêt dense	29 N	615 102	839 735	173
Sipilou	forêt dense	29 N	615 102	839 745	174
Sipilou	habitat	29 N	615 102	839 725	175
Sipilou	habitat	29 N	615 100	850 926	176
Sipilou	habitat	29 N	615 125	850 921	177
Sipilou	habitat	29 N	615 140	850 958	178
Sipilou	habitat	29 N	615 154	850 977	179
Sipilou	habitat	29 N	615 162	850 982	180
Sipilou	habitat	29 N	615 169	850 935	181
Sipilou	cultures et jachères	29 N	620 849	876 870	182
Sipilou	cultures et jachères	29 N	634 640	869 562	183
Sipilou	cultures et jachères	29 N	643 716	863 433	184
Sipilou	cultures et jachères	29 N	600 811	873 924	185
Sipilou	cultures et jachères	29 N	614 013	868 973	186

Sipilou	cultures et jachères	29 N	629 807	860 722	187
Sipilou	cultures et jachères	29 N	601 754	866 026	188
Sipilou	Sols nus	29 N	603 993	857 422	189
Sipilou	Sols nus	29 N	620 613	855 182	190
Sipilou	Sols nus	29 N	634 758	849 642	191
Sipilou	Sols nus	29 N	622 879	860 560	192
Sipilou	Sols nus	29 N	623 278	860 405	193
Sipilou	Sols nus	29 N	623 484	860 914	194
Sipilou	Sols nus	29 N	625 293	861 731	195
Sipilou	cours d'eau	29 N	625 383	861 538	196
Sipilou	cours d'eau	29 N	625 370	861 519	197
Sipilou	cours d'eau	29 N	617 224	858 117	198
Sipilou	cours d'eau	29 N	626 769	872 985	199
Sipilou	cours d'eau	29 N	627 191	873 123	200



ISSN: 0975-833X

Available online at <http://www.journalcra.com>

International Journal of Current Research
Vol. 10, Issue, 10, pp.74778-74787, October, 2018

DOI: <https://doi.org/10.24941/ijcr.31944.10.2018>

INTERNATIONAL JOURNAL
OF CURRENT RESEARCH

RESEARCH ARTICLE

EROSION SENSITIVITY MAPPING IN THE TONKPI REGION (WESTERN CÔTE D'IVOIRE)

*¹Atté Cyrille Bi Tiéssé, ²Eboua Narcisse Wandan and ³Zamblé Armand Bi Tra

¹EDP, INP-HB Yamoussoukro, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

²UMRI Sciences Agronomiques et Génie Rural, Laboratoire Sciences, Société, Environnement & Gestion des Ressources naturelles, INP-HB, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

³Université Alassane Ouattara de Bouaké, UFR Communication, Milieu et Société, Département de Géographie, Laboratoire de Géographie Physique, 01 BP V18 Bouaké 01, Côte d'Ivoire

ARTICLE INFO

Article History:

Received 29th July, 2018

Received in revised form

12th August, 2018

Accepted 07th September, 2018

Published online 31st October, 2018

Key words:

Côte d'Ivoire, Erosion sensitivity, GIS, MEDALUS, Remote sensing.

ABSTRACT

Soil erosion is at the root of serious economic, social, and environmental problems in many countries around the world. It is therefore essential to spatially evaluate its effects in order to face them and to be able to propose the best strategies of fight, conservation and planning of land. The objective of this study was to qualitatively evaluate the vulnerability of soils to water erosion through an approach based on the Mediterranean Desertification and Land Use (MEDALUS) model across the Tonkpi Region (Western Cote d'Ivoire). It enabled rational choices of sites where to implement anti-erosive works in priority. Coupling remote sensing and by considering relevant factors known to influence the processes of erosion, such climate, vegetation, soil, and demography, map of the sensitivity to erosion was designed. The erosion risk map obtained showed that 43% of the study area was exposed to a high vulnerability to erosion. On top, the results showed a strong influence of the vegetation quality index (65%) in the risk of erosion. This map will be a tool for decision-makers in allocating crop areas and socio-economic infrastructure sites in the region.

*Corresponding author

Copyright©2018, Atté Cyrille Bi Tiéssé. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Citation: Atté Cyrille Bi Tiéssé, Eboua Narcisse Wandan and Zamblé Armand Bi Tra. 2018. "Erosion sensitivity mapping in the tonkpi region (western côte d'ivoire)", *International Journal of Current Research*, 9, (10), 74778-74787.

INTRODUCTION

Soil erosion is still the biggest environmental problem in the world; 65% of soils on earth are confronted with degradation phenomena including erosion and desertification. Erosion threatening not only developed countries, but even more developing countries. In Africa, 12500 million ha of soils are being threatened by water and wind erosion (Pushpam and Vuola, 2015). In the long term, it results in a loss of fertility and a decline in soil biodiversity while soil is an essential element of agricultural production which is in turn crucial for the development of the livelihoods of the majority of people who depend on this natural resource (Kali *et al.*, 2016). In Côte d'Ivoire, the first work on land erosion was carried out by Rougerie (1958, 1960) in the forest region. These studies analyzed the various erosion processes, factors and anti-erosion methods. Roose (1967, 1977, 1985), spent several years measuring runoff and erosion; he helped characterize erosion in its quantitative aspect. More recent studies have attempted to model erosive risks (Boyossoro *et al.*, 2007; N'dri, 2007; Georges, 2008; Aké *et al.*, 2012).

Concerning the mountainous region of the Tonkpi Region, it presents features favorable to erosion due to its relief and high rainfall (greater than 1500 mm per year). These particular conditions contribute to floods, landslides, and especially soil erosion (Boyossoro *et al.*, 2007). In addition, human activities such as deforestation and agriculture have helped strip most of the mountain slopes, which has aggravated erosion (N'guessan, 1989, Bakayoko *et al.*, 2013) causing the erosion, and outcrop and boulders. This leads to material damage in crops and constitutes civil protection risks. In addition, erosion causes degradation of natural soil fertility and decrease in productivity (Raphiou, 2013). Many efforts are needed to address this issue. In the Tonkpi region, the Mountain Hills Reforestation Project (PRFM) was initiated in order to reforest about 400 ha of land in the vast region of the Tonkpi, covering 1,228,400 ha. Effective implementation of such soil conservation and restoration measures must first be preceded by an assessment of erosion risk spatial distribution. Erosion resulting from the combination of several factors, remote sensing and GIS are powerful tools that can be used to collect and combine data. Today, they are essential tools in interactive decision support systems.

In general, there are two approaches to water erosion risk assessment: the modeling approach and the expertise approach. The expertise-based approach has been designed for temperate zones whereas modeling approach has no territorial limitation and is therefore better suited for this study. Among the existing models, the most used are the USLE model and its variants: RUSLE and MUSLE which are applied to sheet erosion and not to linear and mass erosion. In this study, MEDALUS model coupled with a GIS was used for a qualitative assessment of erosion risks in the Tonkpi region of Côte d'Ivoire. MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use) uses a qualitative approach based on a multi-criteria method allowing to draw up index maps. This model takes into account linear erosion, which is the type of erosion encountered in the Tonkpi region and is also applicable on a regional scale (Hussein, 2011). The result obtained by the model was a vulnerability map of the region that takes into account the physico-climatic factors responsible for water erosion. As such, this document is a decision support tool in terms of management and protection of natural resources.

Location of the study site

The study was conducted in the Tonkpi Region, located in the far west of the Mountain District in Côte d'Ivoire. This region belongs to the mountainous sector of the Guinean domain (Guillaumet and Adjanohoun, 1971) and covers an area of 12,284 km². It lies between longitudes 5°24' and 7°3' West and latitudes 8°4' and 6°34' North (Figure 1).

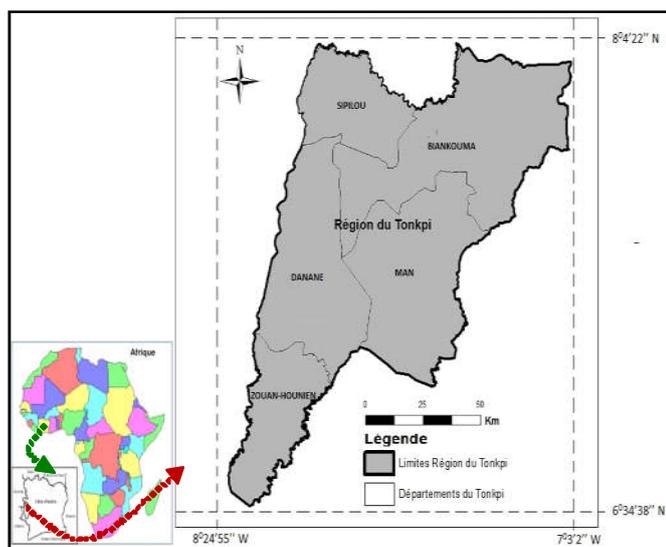


Figure 1. Localization of the region of Tonkpi

Population was estimated at 435,196 (RGPH, 2014) with an average density of 85 inhabitants/km² with a maximum of 150 for the department of Man which is the regional capital. The region is one of the most watered in the country; rainfall amount oscillates between 1300 and 2400 mm per year. Temperatures remain high with an average of 24 °C and hygrometry oscillates between 80 and 85%. The Sassandra and Cavally with many tributaries, are the major rivers that water this region (CNRA, 2009). Vegetation consists of 80% of humid forest. However, this forest has been converted to fallows or is exploited for perennial crops such as coffee, cocoa or rubber plantations. Topography is marked by a series of lowlands (Bakayoko *et al.*, 2013). These elementary forms are linked in places with very rugged lands with contours

varying between medium and concave slopes with altitudes sometimes exceeding 1000 m. The highest peaks were Mount Tonkpi (1189 m), Mount Mia (1077 m), and Mount Glas (1175 m). Most of the mountain slopes, steep and fractured, and valleys are at high risk of erosion. Ferralitic soils with medium chemical fertility are dominant. There are also soils developed on basic rocks, ferralitic soils on granite rock, mountain-type ferrisols, hydromorphic soils in lowlands and mineral soils in mountainous areas (CNRA, 2009). This region also presents a great diversity of production systems related to three main factors namely: (1) agro-climatic conditions that favor a wide range of agricultural speculations, (2) ecosystems specific to the mountainous morphology distributed on slopes or granitic mountain slopes, low slopes, and shallows, and (3) a high level of land saturation, forcing farmers to optimize the area, especially by growing the associated food crops. This land pressure factors the advent of soil vulnerability to erosion.

MATERIALS AND METHODS

Inventory and data processing

Three types of data were used in this study; these were satellite images, cartographic and demographic data. The satellite imagery consisted of EVI (Enhance Vegetation Index) vegetation images from the MODIS satellite from December 1 to 15 of year 2001 to 2017, four Landsat 8 images from February 11 results from the 198-55 scene in 2016, ASTER SRTM images and rainfall simulation images from Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). MODIS images with medium spatial resolution (250 m) were used to define the index of vegetation quality through land use and the coefficient of variation of vegetation. They are of particular interest through their EVI vegetation index resulting from a synthesis of 15 days observation. These images were taken in the last two weeks of December (dry season), when clouds are the most dissipated. They have the advantage of a very high temporal resolution which facilitates regular follow-up of the state of the vegetation. Landsat 8 imagery, with a spatial resolution of 30 m, obtained from its sensor 10 monitors soil surface temperature data which is an important bioclimatic parameters of the phenological state of the vegetation. ASTER SRTM images are Digital Terrain Models (DTMs) that allow the representation of terrain and thus topography. Slope classes were generated from this DTM. Cartographic data are composed of soil map from Dabin *et al* (1960) and georeferenced map layers of the boundaries of the Tonkpi region, road network, administrative division, and human settlements (villages). Alphanumeric data consist of demographic data of the Tonkpi region, derived from the 2014 General Population and Housing Census (RGPH), obtained from the National Institute of Statistics (INS).

Evaluation of MEDALUS model parameters

The methodology used in this study was based on the MEDALUS model, which identifies the sensitivity to erosion from the geometric mean of quality indices derived from the environment and human activities (soil, climate, vegetation and land use planning) (Tra Bi, 2013). These parameters are likely to act on soil degradation (Floret et Le Floc'h, 1975; Le Houérou, 1992; Aidoud and Touffet, 1996; Khelil, 1997; Jauffret, 2001; Escadafal, 2002; Salamani and Hirche, 2006; Chakroun *et al.*, 2006; Hirche *et al.*, 2007).

Table 1. Vulnerability of fields to erosion as a function of slope

Slope	Classe
< 5 %	Extremely low
5 à 15 %	Low
15 à 25 %	Medium
>25 %	steep

Table 2. Classification of land vulnerability factors to water erosion in the Tonkpi Mountain region

Index	Erosion factors	Classes	Description	Code	
Index of soil quality	Soil texture	1	balanced	1	
		2	Fine	1,33	
		3	coarse	1,66	
		4	coarse	2	
	Slope	1	<5	1	
		2	15-May	1,33	
		3	15-25	1,66	
		4	>25	2	
Anthropic quality index	Population density	1	<40	1	
		2	40-100	1,33	
		3	100-200	1,66	
		4	>200	2	
	Density of settlements	1	<8	1	
		2	16-Aug	1,5	
		3	>16	2	
	Road density	1	<8	1	
		2	20-Aug	1,5	
		3	>20	2	
	Index of the quality of vegetation	Variation coefficient	1	4,5	1
			2	20-Oct	1,5
3			20-75	2	
Land cover		1	Forest and water eau	1	
		2	Degraded forests	1,5	
		3	Savannah, cultivation, and soil	2	
Climate quality index	Rainfall	1	<200	1	
		2	1200-1500	1,5	
		3	>1500	2	
	Temperature	1	<24	1	
		2	24-30	1,5	
		3	>30	2	

The evaluation of soil vulnerability was based on the analysis of four main factors: soil quality, human quality, vegetation quality, and climatic quality.

Soil quality Index: The influence of soil quality on soil erosion sensitivity is governed by soil texture (T) and soil slope (SI) as described by equation 1. It was derived from the digitization of soil map of Perraud and Souchère (1968) relying on field assessment to obtain classified units (Table 1). The slope map generated from the Digital Terrain Model (DTM) was reclassified based on the classification of Mayer L (1990), and converted into land erosion vulnerability map (Table 1).

$$IQS = (T \times P_s)^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

Classification criterion was, in the absence of an adequate test, soil cultivation suitability. Thus, four classes of soils were determined: very good cultivation suitability (index 2), average to good cultivation suitability (index 1.66), poor cultivation suitability (index 1.33) and poor cultivation suitability (index 1). The combination of the two maps generated soil quality index map.

Anthropic Quality Index (AQI): Anthropogenic quality index was a combination of three factors: population density (P_d), road density (R_d), of localities density (L_d) (equation 2).

$$AQI = (P_d \times R_d \times L_d)^{1/3} \dots\dots\dots(2)$$

Population density index, as measured by the average density per sub-prefecture, was extracted from 2014 General Population and Housing Census (RGPH) that was further coded (Table 2). Settlement density map was made by applying a regular grid of 20 km² on the map of the region and by approximate counting of localities. For the map of road densities, it was done by applying a regular grid of 20 km² on the map of the region and by approximate counting of the intersections of roads in each grid.

Vegetation Quality Index (VQI): VQI was derived as the geometric mean of the Coefficient of Variation of Plant Coverage (CV) with the current land use data of the study area (CLU) (Equation 3).

$$VQI = (CV \times CLU)^{1/2} \dots\dots\dots(3)$$

The map of the Coefficient of variation of vegetation cover was obtained using MODIS satellite images acquired from 2000 to 2016 and having a spatial resolution of 30 meters (15 m for the panchromatic band) in UTM projection and ortho rectified. These images were compiled to obtain a single image that was used to calculate the coefficient of variation of vegetation cover. Land cover map was derived from LANDSAT TM (2016) image classification of the Tonkpi

region. This georeferenced image was combined with other vector layers (terrain maps, raster map), into a GIS allowed the production of land cover map. The procedure used is a classification by visual analysis of the various calculated remote sensing indices (NDVI) and color compositions (TM 5-4-3 ETM + 5-4-3 and OLI 6-5-4). Then, manual extraction of cartographic themes (hydrographic network, roads, habitat, etc.) and delimitation of classes. Subsequently, terrain visits were done in order to validate this classification.

Climate Quality Index: The climate quality index (CQI) was obtained by crossing total precipitation layer (PP) and surface temperature layer (T) using equation 4:

$$CQI = (PP \times T)^{1/2} \dots\dots\dots(4)$$

Climate which is one of the main factors influencing soil degradation, is evaluated by considering the parameters that influence the availability of water: quantity of precipitation, and soil temperature (Mostephaoui, 2013). The map of soil surface temperature (T) was derived from the thermal bands (bands 10 and 11) of LANDSAT 8 images and three classes were set: (1) Below 24 °C, (2) From 24 - 30 °C, Greater than 30 °C. Rainfall is actively involved in the degradation of bare soils and soil erosion from sheet runoff. It detaches soil particles from runoff but also by the effect "splash" or the strength of water droplets erosivity. Rainfall data used was the annual average for the period 2000 to 2014 of the Region. Three classes were set: rainfall less than 1200 mm (low), between 1200 and 1500 mm (average), and higher than 1500 mm (strong).

Elaboration of the sensitivity map to water erosion: Figure 2 summarizes the general procedure applied for mapping the multifactorial vulnerability to water erosion of soils in the Tonkpi region.

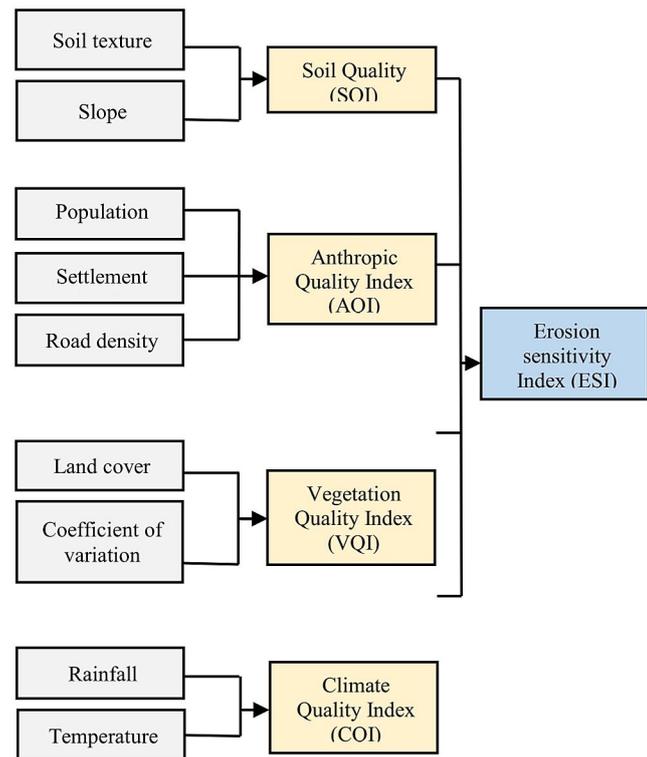


Figure 2. Methodology framework for erosion sensitivity index (ISE) determination

The MEDALUS model used identifies ecologically sensitive areas (Kosmas *et al.*, 1999) taking into account soil, vegetation, climatic and management factors (Benabderrahmane and Chenchouni, 2010). Each factor was represented by an index that was calculated by the logical combination of sub-index in a GIS. The output map represented the sensitivity to erosion zones. Based on current knowledge of the different types of erosive processes, the factors selected were: soil quality, human quality, vegetation quality, and climatic quality accord (Equation 5). The validation of the final map was obtained by comparing the obtained results with field observations using GPS.

RESULTS

The computation of each index was done using algebraic combination of maps in matrix format (raster mode) and by a multitude of spatial analysis function.

Climate Quality Index (CQI)

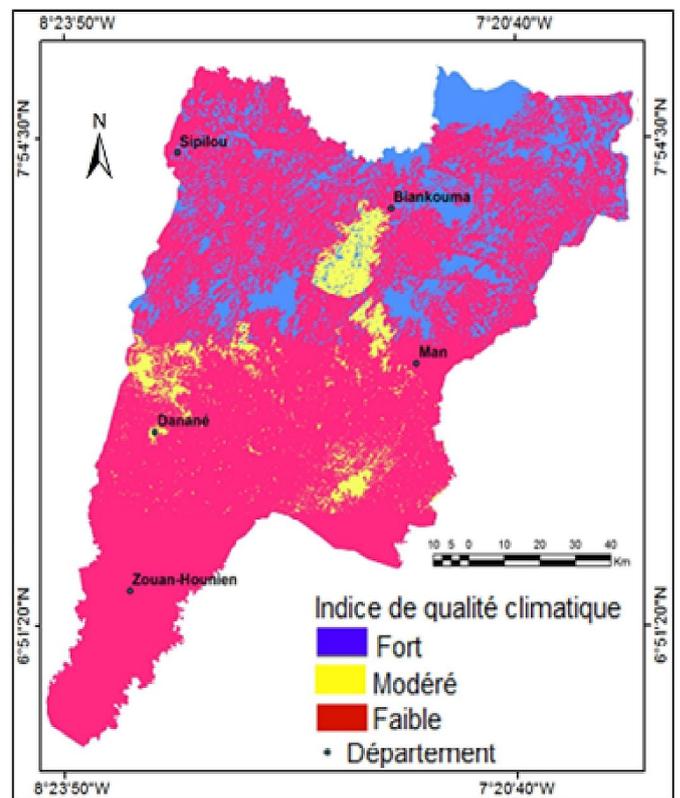


Figure 3. Map of climate quality index in the Tonkpi Region

Figure 3 indicated a medium vulnerability to erosion due to climatic factors (rainfall, temperature). The effect of climatic factors is strong in only 8% of the territory, in a band below Danané and east of Blankouma. Most of the region (66%) was weakly sensitive to erosion due to climatic factors.

Table 3. Climate quality index in the Tonkpi Region

IQC Classes	Area (Ha)	Percentage (%)
Low	291 403	26,02
Moderate	737 370	65,85
High	90 979	8,12

Soil Quality Index (IQS): Figure 4 indicated that soils which are moderately susceptible to erosion, consisting mainly of moderately leached ferralitic soils and ferralitic to granitic soils are dominant in the region. They represented 74.25% of the surface of the Tonkpi region and occupied 836 664.56 ha (Table 4). These soils are found in the departments of Zouan-hounien and Man. In the extreme north of the territory, in the departments of Biankouma and Sipilou, soils were most vulnerable to erosion due to the presence of very steep slopes. These soils represented 3.17% of the region and were mainly composed of mountain type ferrisols. Soils with low sensitivity to erosion, about 22.6% of the territory, were ferralitic soils on granites. These soils are found scarcely in the departments of Sipilou, Biankouma and Danané.

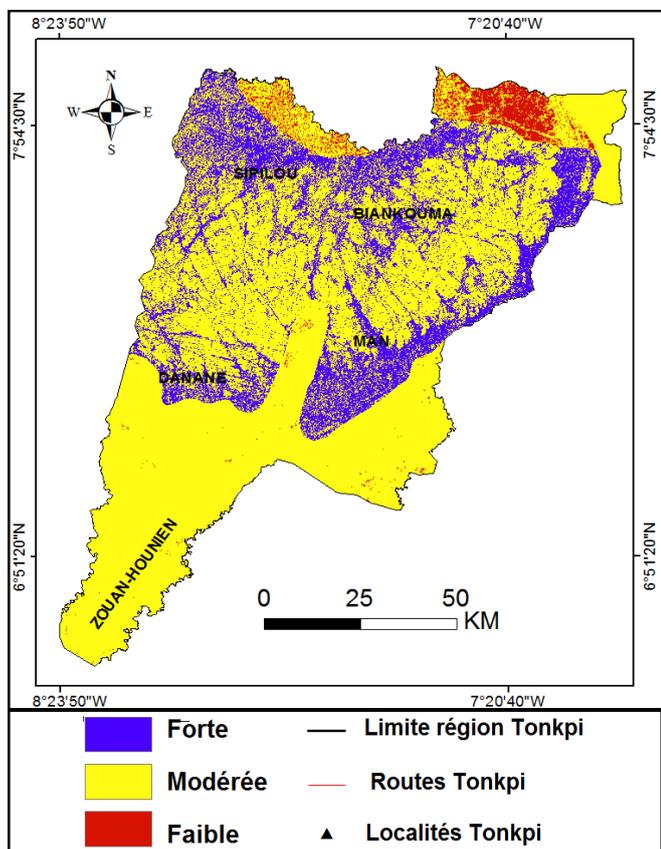


Figure 4. Map of soil quality index in the Tonkpi Region

Table 4. Soil quality index in the Tonkpi Region

IQS Class	Area (Ha)	Percentage (%)
Low	254 331,25	22,57
Moderate	836 664,56	74,25
High	35 740,19	3,17

Anthropogenic Quality Index (AQI): Demographic pressure and the density of the roads in a given area are anthropic factors that favor the erosion of the ground. Figure 6 shows that the far north-west (Mid North of Biankouma Department)

and the North-East (Sipilou Department) of the region appear less vulnerable to erosion compared to the center.



Figure 5. Image of eroded soil due to steep slopes

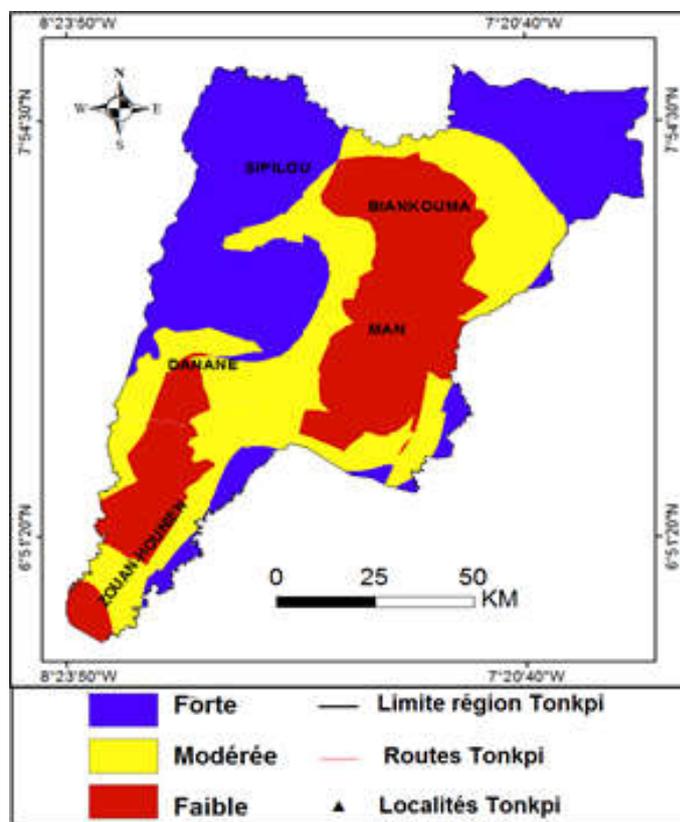


Figure 6. Map of the Human Quality Index (AQI)

Table 5. Geographical Distribution of the Human Quality Index

IQA Classes	Area (Ha)	Proportion (%)
Low	190 411,09	17,1
Moderate	461 243,12	41,2
High	467 222,59	41,7

Table 5 indicated that there are as many moderately erodible zones (41.2%) as highly erodible zones (41.73%). Only 17.1% of the region has a low vulnerability due to anthropogenic factors. Anthropogenic activities that influence soil erosion are the crushing of granite boulders around cities such as Man and Biankouma. Once the granite boulders are crushed, the soil is stripped by the rains, leaving the reddish parental rock (Figure 7).



Figure 7. Crushing and excavation of granite blocks contributing to erosion

Vegetation Quality Index (VQI): Figure 8 showed that 65.31% of the Tonkpi region has a low vegetation quality, therefore it has a high sensitivity to water erosion. Much of the North of the region and in the southern tip are the most concerned. This can be explained by the strong deforestation observed in these areas (Tiesse et al., 2017). In contrast, Central West (Danané) (30.69% of the region) and North-East (Man and Biankouma) (3.38%) zones presented moderate erosion capacity due to the quality of the vegetation.

Table 6. Vegetation quality index

IQV Classes	Area (Ha)	Percentage (%)
Low	37 958,76	3,38
Moderate	343 704,75	30,69
High	738 085,70	65,31



Figure 9. Erosion under reforested Teak trees on the steep of mountains

Map of Erosion Sensitivity Index (ISE): Figure 10 represented the map determining the susceptibility to erosion for any area of the Tonkpi region. Table 7 showed that almost half (43.45%) of the Tonkpi region was highly susceptible to erosion. Only one fifth of the territory has a low sensitivity to erosion; the remaining 34.82% was moderately susceptible to erosion.

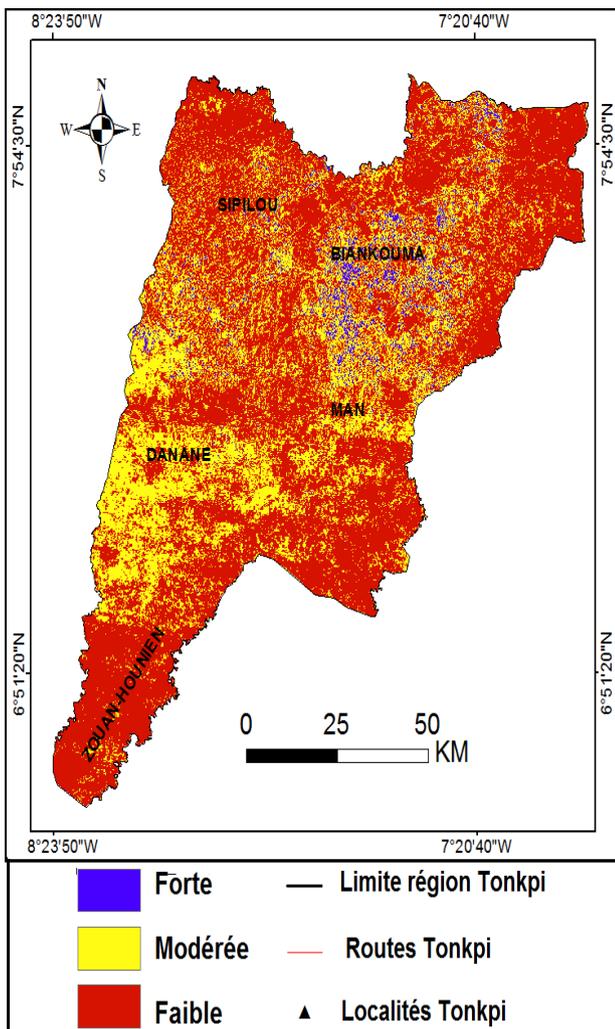


Figure 8. Map of the vegetation quality index

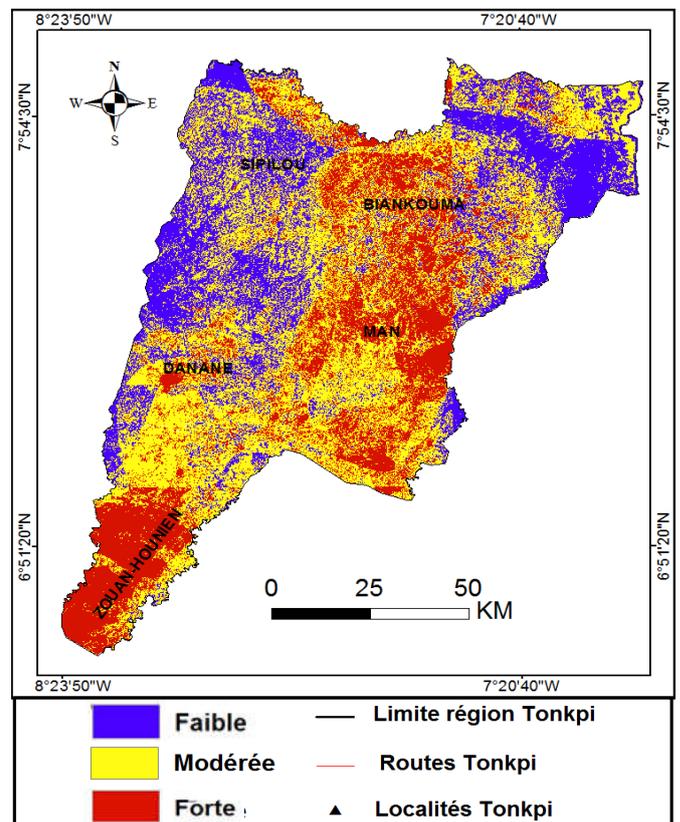
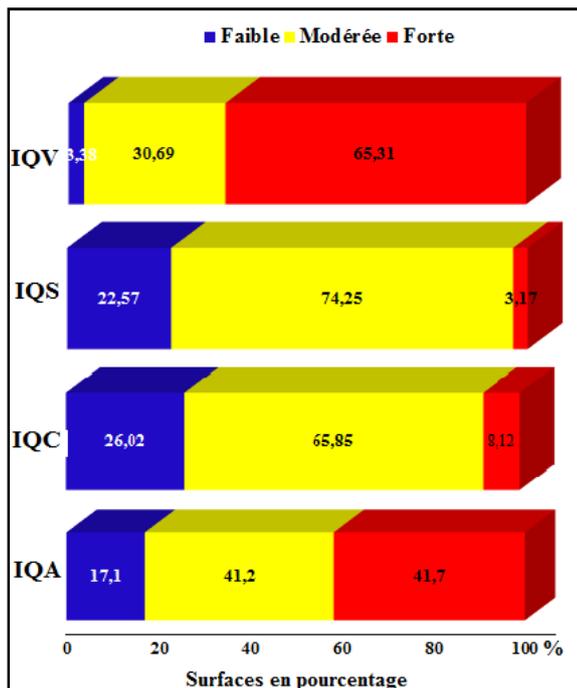


Figure 10. Map of erosion sensitivity in Tonkpi Region

Table 7. Erosion sensitivity index (ISE)

ISE Classes	Area (Ha)	Proportion (%)
Low	242 855,39	21,71
Moderate	389 470,63	34,82
High	486 004,84	43,45

**Figure 11. Pictures of eroded land in the city of Danané****Figure 12. Contribution of each quality index to the erosion sensitivity**

Areas highly erodible are located in the Departments of Biankouma, Man and Zouan-Hounien. The result indicated that urbanization was one of the main factors of erosion; this is depicted by figure 11 showing the highly eroded surrounding of the city of Danané. Moderately erodible soils are scattered throughout the region, especially south of Danané and Man. The less erodible soils were found mainly in the Northeast (Sipilou) and Northwest (Biankouma) of the Region. Overall results indicated that more than 65% of the region has a moderate to high sensitivity to soil erosion therefore it can be stated that the Tonkpi Region presented a high sensitivity to erosion. Figure 12 summarized the impact of the different indices contributing to soil susceptibility to erosion in the Tonkpi region. It allowed an explicit comparison of the erosion sensitivity levels for each index. Thus, it appears that the vegetation quality index (65.31%) and the anthropogenic quality index (41.7%) were the most important contributor to the soil erosion sensitivity in the region.

DISCUSSION

The results indicated that 66% of the Tonkpi region is moderately sensitive to erosion due to climatic factors. Like all regions of Côte d'Ivoire, the Tonkpi Region has experienced a drought but since 1991, rain has become regular with rainfall between 1200 and 2100 mm/year with a southwest gradient. This occurrence of rainfall these years may explain the moderate influence of climatic factors on erosion sensitivity in the region. The Soil Quality Index (SQI), which expresses the influence of soil texture and slope on soil erosion sensitivity, was moderate in 74% of the territory. The topography of the Tonkpi region is represented by high altitudes and a rugged landscape. The sharp slopes affect the rate of soil erosion through its morphological characteristics such as gradient and slope length (Wischmeier and Smith, 1978). Slope maps derived from the DEM showed that sharp slopes observed in 32% of the territory and located in the center of the region, were very vulnerable to erosion. The remaining of the territory, whose slopes are very low (<5%) to weak (5-15%) occupying 69% of the territory, is slightly or less vulnerable to erosion. Soils of the region are ferralitic partly coarse (61%) and fine (25%) which affect soil degradation differently. Ferralitic soils on granitic rocks have a poor cultural aptitude; when they are cultivated, they are vulnerable to erosion because of their shallow depth.

Human quality index was moderate for 41% of the territory and strong for 42% of the territory. Therefore, anthropogenic factors were important in the sensitivity to soil erosion in the Tonkpi region. The area devoted to settlements and road network are considered highly favorable to erosion vulnerability because human activities increase soil erodability. Indeed, the anthropogenic impact increases with the increase of population density and human pressure. It was shown by Thomas (1991) that of all the factors influencing erosion in the Left Basin in Kenya, 81% were caused by human factors including deforestation, agricultural practices such as overgrazing and overexploitation of land. As people do not have enough resources and because of the scarcity of land, farmers no longer practice soil protection techniques. Fallows has traditionally been used for soil fertility management, but because of the high pressure on land, fallow has been reduced or no more exist, leading to continuous cultivation of land. In the Tonkpi, where rains are often heavy, during the long rainy season, fallows established on the mountainsides cannot stop

erosion. In addition, although livestock breeding is not a tradition in the region, the few existing animals graze along the mountainsides where grass is available and fresh. Which is a complementary contribution for erosion. Tiesse *et al* (2017) showed that in the Tonkpi region, forests were severely destroyed whereas they were the least vulnerable to erosion (Pimentel *et al.*, 1998). Forest cover was reduced from 145,565.40 ha in 1990 to only 93,745.95 ha in 2015, a reduction of 36% over 25 years. In the same period, lands extremely vulnerable to erosion, degraded forests and settlements increased by 15% and 11%, respectively. Land devoted to crops and fallows, located on arable land around cities, although sensitive to erosion were replaced by housing, which are very vulnerable to erosion. This change in land cover/use lead to the increased to erosion due to vegetation loss, overgrazing and plowing. In fact, the foliage above the ground slows down the speed of water flowing over the ground, which reduces the amount of water and soil lost through runoff. Similarly, plant roots physically bind the particles and also improve water retention by creating pores in the soil, which stabilizes soil and increases its resistance to erosion. In addition, cutting trees for firewood or coal without replacement is a serious problem that contributes to the loss of vegetation and thus to increased soil erosion. The increase in the human population has reduced land availability and created pressure on land in this semi-mountainous area where farmland is limited. The erosion risk map showed that areas with high risk of erosion occupy about 43% of the Tonkpi region, on sharp mountain slopes and in deep valleys. These results were consistent with those of Boyossoro *et al* (2007) who showed that 40% of the territory of the Department of Man presented high risks to erosion. This map showed that the slopes undergo erosion stronger than the upstream parts of the mountains whereas on the plateaus, erosion was less. The results also indicated that there is a scattered spatial distribution of erosion sensitivity in the territory of the region, which clearly shows the cumulative impact of the various factors determining erosion (Chandoul, 2014). In fact, the areas highly exposed to erosion (33% of the territory) were those where Soil Quality Index (SQI) represented 32% and the vegetation quality index was 25%. Similarly, these results showed a strong influence of the vegetation quality index (VQI = 65%) in the risk of erosion.

The results indicated that, apart from the intrinsic properties of soils, parameters such as vegetation and slope contributed to a greater extent, to the modification of the sensibility to soil erosion. Vegetation protects soils against erosive agents, soil fixation and sediment trapping. It also helps to improve rainwater infiltration and promotes a less contrasting microclimate under trees due to shading. These conditions then favor more active fauna and flora and modify soil properties (Rey and Berger, 2002). Similarly, because soils in some parts of the territory are stony, the sensitivity to erosion was lower than that of a soil composed of fine or sandy materials (Roose and Sarraïlh, 1990). The slope also conditions the property and the structure of the soil. So on flat land, soils are often thicker than on slop terrain around large cities such as Man, Duekoué and Biankouma where soils are generally thinner. This can be explained by product transportation from alteration of humification or mineralization (Duchaufour, 2001).

The comparison of our results with those obtained by Boyossoro *et al* (2007) showed a concordance. Indeed, with the USLE model, they found that 40% of the Tonkpi region was at risk of erosion. In general, no single index can explain

the vulnerability of soils to erosion. However, vegetation quality index alone seems to capture to a larger extend, the sensitivity to soil erosion. Overall, the results indicated that the method used makes a very good integration of the different indices to produce the erosion sensitivity map.

Conclusion

Erosion is an irreversible process of soil degradation that is caused by both human and natural factors. It is manifested by the degradation of land suitability for agriculture and livestock and the stability of housing. It is therefore a phenomenon that threatens the sustainability of natural resources and the resilience of people to climate change. The methodology used in this study was based on the MEDALUS model. The rate of erosion sensitivity is generally considered high in the southern tip of the region, in the Department of Zouen Houein and in the central axis Man-Biankouma, and around large cities.

Acknowledgement

We would like to thank The Mountain Hills Reforestation Project for their financial support for this study. We would also extend our acknowledgement to the ITTO for its fellowship.

REFERENCES

- Aidoud, A. and Touffet, J. 1996. "La régression de l'Alfa (*Stipa tenacissima*) graminée pérenne, un indicateur de désertification des steppes algériennes". *Sécheresse*, 7:187-193.
- Ake G.E., Boyossoro, H.K, Miessan G.A., Ettien J.-B., Kokoh R. E. et Biemi, J., 2012. «Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)», *Physio-Géo* [En ligne], Volume 6 | 2012, mis en ligne le 06 avril 2012, consulté le 09 mars 2018. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/2285>; DOI: 10.4000/physio-geo.2285
- Bakayoko S., Soro D., Kouadio K.K.H., Konan-W. A.B., Angui P. (2013), « Characteristics of Tonkpi Mountain soils and plateaus soils in West Côte d'Ivoire » [archive], sur www.heraldjournals.org, (consulté le 22 juin 2014)
- Benabderrahmane, M.C.; Chenchouni, H. (2010). Assessing Environmental Sensitivity Areas to Desertification in Eastern Algeria using Mediterranean Desertification and Land Use "MEDALUS" Model. *Int. J. Sustain. Water Environ. Syst.* 2010, 1, 5–10.
- Boyossoro H. K., Koffi F. K., Bachir M. S., Biemi J. et Traore I. (2007), "Insécurité climatique et géorisques en Côte d'Ivoire : étude du risque d'érosion hydrique des sols dans la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)", *Sécheresse*, 18 (1), 29-37
- Chakroun H., Nouri M., Vacca A. et Rejeb M. N. (2006), "Modélisation de la Désertification par l'Adaptation de la Méthode MEDALUS à un Bassin Versant du Centre de la Tunisie", 14th International Soil Conservation Organization Conference, Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environment, 4p.
- Chandoul I.R., Bouaziz S., Dhia H.B., (2014). "Utilisation des SIG pour l'évaluation de la sensibilité à la désertification par l'approche MEDALUS Application à la région de Gabès" *.Geosp.net.* ([https : www.researchgate.net/publication/ 306401427](https://www.researchgate.net/publication/306401427)), 13p.

- CNRA (2009), La Direction Régionale CNRA de Man en quelques mots et chiffres, 12p
- Domigo E. (1996). "Pression agricole et risques d'érosion dans le bassin versant du LOMON, affluent du Mono (Département du Mono-BENIN)", Université Nationale du Bénin, Cotonou, *Bulletin-Réseau Erosion, Vol 16*, 14p : p181-194.
- Duchauffour, P. (2001). "Introduction à la science du sol: Sol, végétation, environnement". 6ème édition. Editions Dunod, Paris. 331 p.
- Escadafal R. (2002). "CAMELEO: Changes in arid Mediterranean ecosystems on the long term and earth observation". Final report. INCO contract: ERBIC18CT970155, Ispra (Italie): Joint Research Center (JRC). Ispra, Italie, 116 p.
- Floret C. et Le Floc'h E. (1975). "L'évaluation de la production des parcours et de la sensibilité de la végétation naturelle, éléments de l'aménagement rationnel des zones présahariennes de la Tunisie". *Options méditerranéennes*, 26: p.9-51.
- Georges Y. (2008). "Evaluation de l'Erosion dans le bassin versant de la rivière Grise (Haïti)". En ligne, consulté le 16/03/2018 : URL : https://www.memoireonline.com/06/09/2109/m_Evaluation-de-lErosion-dans-le-bassin-versant-de-la-riviere-Grise-Haïti.html
- Guillaumet J. L. et Adjanohoun E. (1971). La végétation de Côte d'Ivoire. In : Avenard J.M., Eldin E., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J. L., Adjanohoun E. and Perraud A. (eds). Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. 159-263. O.R.S.T.O.M., Paris.
- Hirche A., Salamani M. Boughani M., Nedjraoui D. and Abdellaoui A. (2007). "Contribution à l'étude de la désertification dans le sud Oranais". *Revue Française de photogrammétrie et de Télédétection*, vol 3/4 : pp187-188.
- Hussein E. H. H. (2011). "Les apports d'un S.I.G. dans la connaissance des évolutions de l'occupation du sol et de la limitation du risque érosif dans la plaine de la Bekaa (LIBAN)". Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France, pp1-16
- Jauffret, S. (2001). "Validation et comparaison de divers indicateurs de changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides. Application au suivi de la désertification dans le sud tunisien". Thèse de Doctorat, Université de Marseille III, France, 360 p.
- Khali, I., Ben H. K.L-H., Raissouni, A. and El Arrim A. (2016), "Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par approche SIG/USLE au niveau du bassin versant Kalaya (Maroc Nord Occidental)". *J. Mater. Environ. Sci.*, Vol 7 N°8: p2778-2795.
- Khelil A., (1997), "L'écosystème steppique : Quel avenir?". Édition Dahleb, Alger. 228 p.
- Kosmas, C., Ferrara, A., Briasouli, H., Imeson, A. (1999). "Methodology for Mapping Environmentally Sensitive Areas (ESAs) to Desertification". In: The Medalus Project Mediterranean Desertification and Land Use. Manual on Key Indicators of Desertification and Mapping Environmentally Sensitive Areas to Desertification; Kosmas, C., Kirkby, M., Geeson, N., Eds.; EU: Brussels, Belgium, 1999; pp. 31-47.
- Le Houerou. H.N. (1992). "Climatic change and desertification". In: Science and Society. UNESCO, Paris, pp.183-201.
- Mayer L. (1990). "Introduction to quantitative geomorphology". Edition Prentice Hall, Englewood cliffs (New jersey), 380 p
- Mostephaoui T. (2013). "Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle des pertes en sol à l'aide d'un Système d'Information Géographique dans le bassin Versant d'El Hamel (Boussaâda)". *Journal Algerien des Régions Arides*, N° Spécial 11
- N'dri B.E. (2007). "Analyse des facteurs et quantification du ruissellement et de l'érosion hydrique par les outils de télédétection et SIG dans la commune d'Attécoubé (Abidjan, sud de la Côte d'Ivoire)". Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, 150p
- N'guessan K.A. (1989). Commentaire du Code Forestier et de la législation forestière de la Côte d'Ivoire. Librairie Générale de Droit et de Jurisprudence, Paris, France, 333 p.
- Organisation Météorologie Mondiale (OMM) (1997), Météorologie et hydrologie urbaine. Actes de la journée météorologie mondiale de l'année.
- Pimentel D., Tort M., D'anna L., Krawic A., Berger J, Rossman J., Mugo F., Doon, N. Schriberg M., Howard E., Lee S., and Talbot T. (1998). "Ecology and increase disease, population growth and environmental degradation". *Bioscience* vol.48, n°10, p. 817-826.
- Pushpam K. et Vuola A. (2015). "L'économie de la dégradation des terres en Afrique: les bénéfices de l'action l'emportent sur ses frais"; disponible sur www.eld-initiative.org. Rapport du Directeur : Pushpam Kumar, PNUE. Coordinateur et Editeur Technique: Aaron Vuola, PNUE. ELD Initiative & UNEP, 160 p.
- Raphiou M., (2013). "Gestion de la fertilité des sols pour une meilleure productivité dans les systèmes de culture à base d'igname au Bénin (Benin)", Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, 253 p
- Rey F. and Berger F. (2002). "Interactions végétation érosion et génie écologique pour la maîtrise de l'érosion en montagne". Consulté en ligne le 16/03/18, 8p. URL : <https://www.inbo-news.org/IMG/pdf/Rey-Berger-2.pdf>
- RGPH, (2014) : Recensement général de la population et de l'habitat, Résultats Globaux, Institut National de Statistiques, Côte d'Ivoire. 12 p.
- Roose E. (1967). "Dix années de mesure du ruissellement et de l'érosion à Sefa au Sénégal". *Agro Trop*, vol 22. Pp 123 – 152.
- Roose E. (1977). "Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en parcelles expérimentales". Document Orstom 78. Paris : Orstom éditions. 107 p.
- Roose E. and Sarrailh J.M., 1990, "Erodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles", *Cahiers de l'ORSTOM*, Série Pédologique, vol. 25, n° 12, 24 p.
- Roose E., 1985. "Terrasses de diversions et microbarrages perméables ? Analyse de leur efficacité en milieu paysan ouest-africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne". IVe conférence Internationale de conservation des sols. ISCO. Maracay (Venezuela) 3-5 novembre 1985, 15 p
- Rougerie G. (1960), "Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière". Mémoire IFAN 58. Dakar: Institut Fondamental d'Afrique Noire (IFAN). 542 p.
- Rougerie, G. (1958). "Modalité du ruissellement sous forêt dense de Côte d'Ivoire". *CR Acad Sci Paris*, vol 246 : pp290- 292.

- Salamani M. and Hirche A. (2006). "L'état de la désertification en Algérie. In : Actes des journées internationales sur la désertification et le développement durable". CRSTRA-Université, Biskra. Pp 165-171.
- Thomas, T. (1991). "Aspects of soil degradation and conservation measures in Agucho catchment, West Hararghe". Soil Conservation Research Project Report 19. University of Bern, Switzerland. 125 pp.
- Tiesse B.A., Wandan E. N., N'Da D. H., (2017), "Apport de la télédétection pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol dans la région montagneuse du Tonkpi (Côte d'Ivoire)". *European Scientific Journal*. Vol.13, N° 15, pp 310-329.
- Tra Bi Z. A. (2013). "Etude d'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par l'utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc)". Thèse de doctorat unique, Université Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, Université d'Artois, France 190p.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning". US Department of Agriculture, Agriculture Handbook N° 537 The Universal soil Loss Equation. *Prepared By Sciences and Education Administration*. 69 p
