



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2018-2019

N° D'ORDRE : 0245/2020

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI 0412000091

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**SIMULATION DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU
SOL DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE LOBO A NIBEHIBE
(CENTRE-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

LABORATOIRE :
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

KADJO Ettibou Damase

JURY

Président : M. BARIMA Yao Sadaïou Sabas, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé

Encadreur : M. KOUASSI Kouakou Hervé, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé

Examineur : M. MANGOUA Oi Mangoua Jules, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé

Soutenu publiquement
le : 08 / 06 / 2020

TABLE DES MATIERES

	Page
DEDICACES	iii
REMERCIEMENTS	iv
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTES DES FIGURES.....	viii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : GENERALITES.....	4
1.1. PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE.....	5
1.1.1. Situation géographique du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé	5
1.1.2. Caractéristique physique du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé.....	6
1.1.2.1. Climat du bassin	6
1.1.2.2. Relief du bassin	6
1.1.2.3. Réseau hydrographique	7
1.1.3 Activités socio-économiques	8
1.2. GENERALITES SUR QUELQUES CONCEPTS.....	9
1.2.1. Imagerie satellitaire.....	9
1.2.1.1. Définition et description.....	9
1.2.1.2. Domaines d’application.....	10
1.2.2. Modèles et Simulation	10
1.2.2.1. Définition	10
1.2.2.2. Quelques modèles utilisés dans la simulation de l’occupation du sol.....	11
1.2.2.2.1. Cellular Automata (CA) – Markov.....	11
1.2.2.2.2. Land Change Modeler (LCM).....	13
1.2.2.2.3. Dinamica EGO	14
1.2.2.2.4. CLUE-S	15
1.3. TRAVAUX ANTERIEURS SUR LA MODELISATION DE L’OCCUPATION DU SOL.....	15
PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES.....	18
2.1. MATERIEL	19
2.1.1. Données satellitaires et topographiques.....	19
2.1.2. Données agricoles	19
2.1.3. Logiciels.....	20

2.2. METHODES	20
2.2.1. Choix de la période d’acquisition des images satellites.....	20
2.2.2. Prétraitement d’image satellitaire	20
2.2.2.1. Mosaiquage	20
2.2.2.2. Amélioration des contrastes des images.....	21
2.2.2.3. Extraction de la zone d’étude	21
2.2.3. Traitement d’image satellitaire	22
2.2.3.1. Indice de végétation	22
2.2.3.2. Composition colorée et interprétation visuelle d’image	22
2.2.3.3. Classification et évaluation	22
2.2.3.4. Vectorisation et représentation cartographique.....	23
2.2.4. Analyse de la dynamique de l’occupation du sol.....	23
2.2.5. Simulation de la dynamique de l’occupation du sol	24
2.2.5.1. Choix du modèle CA_Markov	24
2.2.5.1. Calibration et validation du modèle	25
PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	27
3.1. RESULTATS.....	28
3.1.1. Traitement d’images satellitaires	28
3.1.1.1. Indice de végétation (NDVI).....	28
3.1.1.2. Composition colorée	29
3.1.1.2. Classification supervisée et évaluation	29
3.1.2. Analyse de la dynamique de l’occupation du sol.....	31
3.1.2.1. Evolution de l’occupation du sol de 1986, 2002 et 2019	31
3.1.3. Simulation de l’état de l’occupation du sol.....	34
3.1.3.1. Calibration et validation du modèle	34
3.1.3.2. Simulation de l’occupation du sol à l’horizon 2050.....	36
3.1.4. Evolution des surfaces de culture d’aubergine et de piment à Vavoua	38
3.2. DISCUSSION.....	39
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	42
REFERENCES.....	44

DEDICACES

Je dédie ce memoire :

A Papa KOFFI Kadjo Blanchard et Maman KOUAKOU Akissi Suzanne, sachez que vos efforts et souffrances pour moi n'ont pas été vains. Que Dieu vous donne une longue vie afin que vous puissiez bénéficier des fruits de cet effort !

A toute ma famille pour son soutien matériel et spirituel.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail,

Il nous est très agréable d'exprimer nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Nous remercions les autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé, avec à leur tête le Professeur TIDOU Abiba Sanogo, Epse KONE, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour leur dévouement dans la formation des étudiants.

Notre reconnaissance va à l'endroit de Monsieur le Directeur de l'UFR Environnement, Docteur KOUASSI Kouakou Lazare, Maître de Conférences. Merci Docteur, pour votre confiance. Nous vous réitérons notre sincère reconnaissance pour nous avoir inculqué l'amour du travail bien fait.

Nous exprimons toute notre reconnaissance au Docteur DIBI Brou, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement (LSTE) de Daloa, pour avoir permis la réalisation de ce travail au sein du laboratoire qu'il dirige.

Nos remerciements vont à l'endroit du Docteur KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences, qui a accepté d'assurer la direction scientifique de ce mémoire.

Nous adressons nos sincères remerciements au Docteur KOUASSI Kouakou Hervé, responsable de parcours Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE) et encadreur de ce mémoire. Cher maître, trouvez ici l'expression de ma très vive et sincère gratitude pour m'avoir initié à la recherche et à la rigueur scientifique.

Nous sommes conscients du travail abattu par notre responsable de parcours, Docteur MANGOUA Oi Mangoua Jules, Maître-Assistant, pour tous les efforts qu'il a déployés pour assurer notre formation dans de bonnes conditions durant toute l'année académique (2018-2019).

Au Docteur KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences, responsable de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE), nous adressons nos remerciements les plus distingués pour son dévouement au travail, ses conseils avisés durant toutes ces années.

Nous exprimons notre reconnaissance au Docteur ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant pour ses remarques portées sur ce travail dans le but de le parfaire.

Au Docteur KOUAME Morton, Assistant, nous adressons nos remerciements pour ses conseils et directives.

Nos remerciements vont également à l'endroit de l'équipe enseignante de la dite filière pour tous les efforts coordonnés afin de nous donner un enseignement de qualité. Recevez chers enseignants nos sincères remerciements.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos aînés du Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement (LSTE) pour leur soutien et encouragement, plus particulièrement le Doctorant KOFFI Bérenger.

Nos remerciements vont également à l'endroit des parents sans exception pour tout le soutien dont nous avons bénéficié durant cette quête du savoir, en particulier Papa KOFFI Kadjo Blanchard, Maman KOUAKOU Akissi Suzanne et grand frère KOFFI Jean. Les mots ne suffiront pas pour exprimer la gratitude. Merci pour tout ! Que vous prospériez à tous égards !

Nous ne saurions terminer sans toutefois dire un très grand merci à ceux qui de façon discrète nous ont aidés pour la réalisation de ce mémoire.

A tous les amis du parcours Génie de l'Eau et de l'Environnement, en particulier M. AFFESSI Affessi Christian Serge qui, depuis ce parcours universitaire ont toujours répondu présents à mes appels. Merci pour tout le service rendu !

Que DIEU vous bénisse en vous donnant une meilleure porte de sortie.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

CA	: Cellular Automata (Automate cellulaire)
CCT	: Centre Canadien de Télédétection
CLUE-S	: Conversion of Land-Use and its Effects at Small regional extent (Conversion de l'utilisation des terres et leurs effets à petite échelle)
EMC	: Evaluation Multi-Critère
FAO	: Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
INS	: Institut National de la Statistique
LANDSAT	: Land Satellite (Satellite d'observation de la terre)
LCM	: Land Change Modeler (Modeleur de changement des sols)
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
SIG	: Système d'Information Géographique
SPOT	: Système Probatoire d'Observation de la Terre
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission (Mission du radar de la navette topographie)
USGS	: United States Geological Survey (Institut d'études géologiques des États Unis d'Amérique)

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I : Exemple de filtre de contiguïté 5x5 utilisé dans l'automate cellulaire.....	13
Tableau II : Caractéristique radiométriques des images Landsat	19
Tableau III : Précision avec le coefficient de Kappa.....	23
Tableau IV : Matrice de confusion de la classification de l'image de 1986.....	30
Tableau V : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2002	30
Tableau VI : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2019.....	31
Tableau VII : Taux de variation des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2019.....	34
Tableau VIII : Matrice de probabilité de transition pour la simulation de 2019	35
Tableau IX : Matrice de confusion entre l'occupation du sol observée et simulée de 2019 ..	36

LISTES DES FIGURES

	Page
Figure 1 : Présentation du bassin de la Lobo à la station hydrométrique de Nibéhibé	5
Figure 2 : Evolution des précipitations et de la température à la station de Daloa (1990-2015)	6
Figure 3 : Relief du bassin versant de la Lobo	7
Figure 4 : Réseau hydrographie de la zone d'étude	8
Figure 5 : Quelques cultures pratiquées sur le bassin : a : cacao ; b : riz irrigué	9
Figure 6 : Mosaïque des bandes de l'image Landsat de 2019	21
Figure 7 : Synthèse de la méthodologie utilisée pour le suivi de l'occupation du sol	26
Figure 8 : Indices de végétation de 1986, 2002 et 2019	28
Figure 9 : Composition colorée OLI 5-6-4 de l'image Landsat de 2019	29
Figure 10 : Cartes d'occupation du sol de 1986, 2002 et 2019	32
Figure 11 : Evolution des superficies des classes d'occupation du sol de 1986, 2002 et 2019...	33
Figure 12 : Cartes d'occupation du sol simulée et observée de 2019	35
Figure 13 : Carte d'occupation du sol simulée de l'année 2050	37
Figure 14 : Evolution des superficies des classes d'occupation du sol entre 2019 et 2050	38
Figure 15 : Évolution des cultures vivrières d'aubergine et de piment.....	39

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les terres dans le monde connaissent de profondes mutations spatiales. En Afrique de l'ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire ces mutations spatiales qui se traduisent par la dégradation du couvert végétal s'accroissent de jour en jour (Yao, 2015).

A l'instar des pays en voie de développement, la Côte d'Ivoire a une économie fortement tributaire du secteur agricole et forestier, entraînant une rapide diminution des surfaces forestières (N'guessan *et al.*, 2006). En outre, des études menées sur l'évolution de cette couverture forestière, il ressort que la Côte d'Ivoire a connu le taux de déforestation le plus élevé des tropiques au XX^{ème} siècle (FAO, 2011). En effet, les surfaces forestières du pays sont passées de 7,85 millions d'hectares en 1986 à 5,09 millions d'hectares en 2000, puis à 3,6 millions d'hectares en 2015 (SEP-REDD+ & FAO, 2017). Par conséquent, le couvert végétal de la zone du Centre-ouest n'a pas échappé à cette déforestation.

Sur le bassin versant de la rivière Lobo, la mise à nu des terres au profit de l'agriculture est la plus importante ces dernières années (Yao, 2015). Les ressources subissent de fortes pressions anthropiques du fait de l'explosion démographique et d'un système cultural purement extensif. L'extension accrue des aires de cultures et des agglomérations engendre une réduction progressive de l'étendue des surfaces boisées et une déstabilisation de la structure des sols (Akognongbé *et al.*, 2014). La rotation des cultures et la jachère ont aussi des perturbations majeures sur ces systèmes écologiques en équilibre précaire. Les changements d'usage des terres ont ainsi des répercussions directes sur l'occupation des terres et sur la configuration du paysage de ce milieu.

Depuis quelques décennies, la modélisation et la projection de changement d'occupation des terres s'imposent comme outil pertinent d'aide à la prise de décision. Elle permet d'analyser les politiques de planification territoriale dans le but d'évaluer et d'anticiper leurs impacts environnementaux (Abdus *et al.*, 2017). L'originalité de cette recherche réside dans le fait que la modélisation de la dynamique de l'occupation des terres permettra de suivre la tendance évolutive du paysage et de trouver des règles acceptables pour préserver les ressources naturelles (Forêt, les ressources en eau). On peut dès lors s'interroger sur la traduction spatiale de cette dégradation des paysages.

C'est dans cette optique qu'a été initiée une étude dont le thème est : «**simulation de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Lobo a Nibéhibé (Centre-Ouest de la Cote d'Ivoire)**». Pour mener à bien une telle étude, il est important d'utiliser des données quantitatives et qualitatives fiables. Dans ces conditions, l'imagerie satellitaire et les systèmes d'informations géographiques (SIG) se présentent comme une opportunité pour cette étude. En effet, l'imagerie satellitaire, grâce à sa vue synoptique, permet de comprendre et de

INTRODUCTION

cartographier des phénomènes dynamiques tels que l'occupation du sol. Quant aux SIG, ils permettent d'organiser et de mieux structurer les informations. Dans la perspective de la prédiction de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Lobo à Nibéhibé, l'utilisation des modèles est nécessaire. Dans ces conditions, les modèles tels que CA_Markov, Dinamica, CLUE-S et Land Change Modeler sont des outils utiles à cette étude.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la dynamique de l'occupation des terres du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé, en vue de prédire leurs changements futurs. Il s'agira, plus spécifiquement, de :

- analyser la dynamique spatio-temporelle du bassin versant de la rivière Lobo à Nibéhibé ;
- simuler les changements d'occupation du sol à l'horizon 2050.

Ce document, qui présente les résultats de l'étude, s'articule autour de trois grandes parties.

La première partie présente les généralités sur le cadre d'étude et sur quelques concepts utilisés. La deuxième partie décrit le matériel et les méthodes utilisés pour atteindre les objectifs de cette étude. Enfin, la troisième partie présente les principaux résultats obtenus qui feront l'objet d'une discussion.

Une conclusion générale comportant des recommandations, achève ce mémoire.

PARTIE 1 : GENERALITES

GENERALITES

1.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1.1.1. Situation géographique du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé

Le bassin versant de la Lobo à Nibéhibé est situé au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire entre 6°15' et 6°55' de longitude Ouest et entre 6°45' et 7°55' de latitude Nord. La rivière Lobo est l'un des principaux affluents du fleuve Sassandra. Elle prend sa source à 400 m d'altitude au sud de Séguéla (Yao, 2015). Le bassin de la Lobo à Nibéhibé a une superficie de 7 280 Km² et couvre en partie les localités de Séguéla, Vavoua, Daloa, Pélézi et Bégafla (Figure 1).

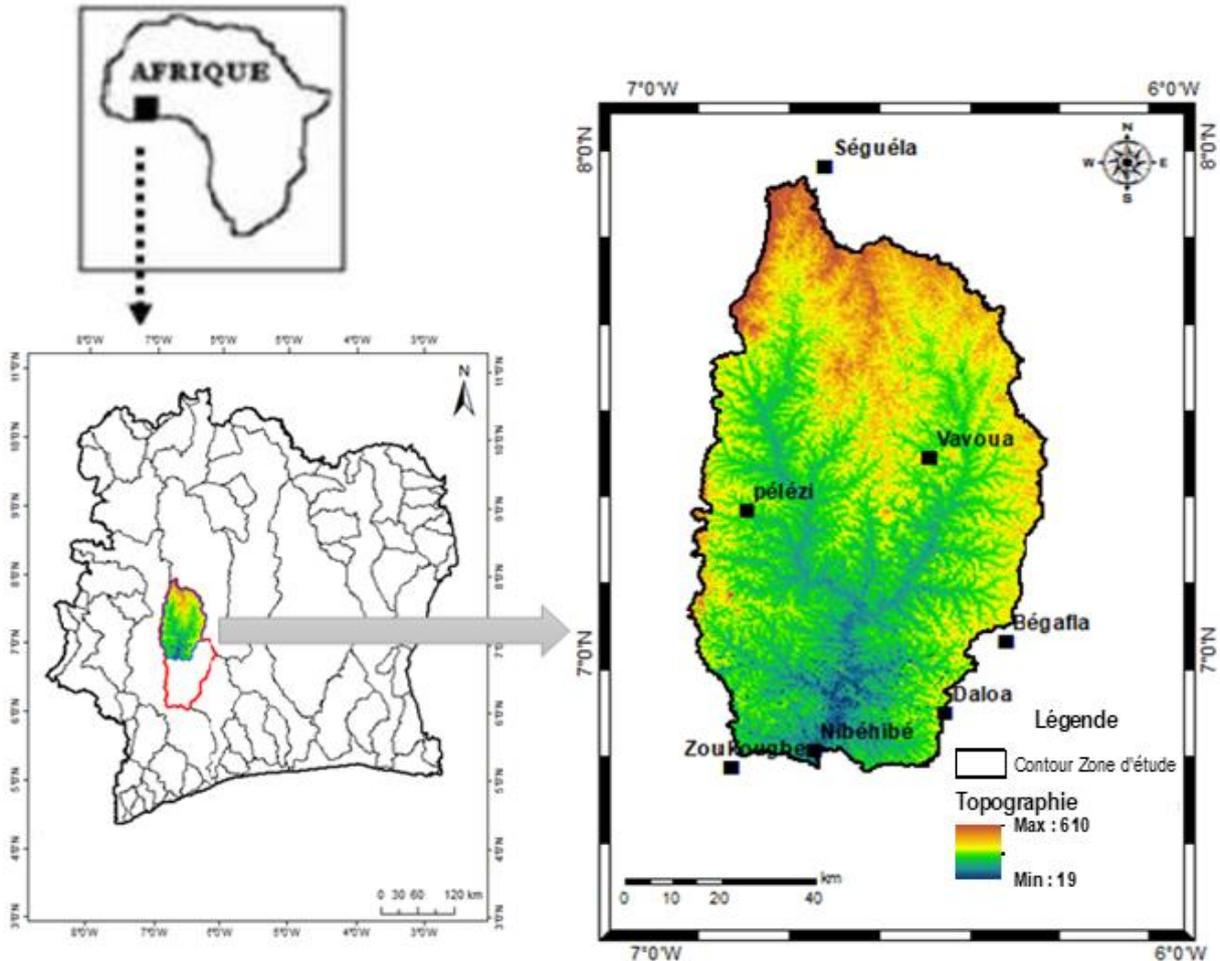


Figure 1 : Présentation du bassin de la Lobo à la station hydrométrique de Nibéhibé

GENERALITES

1.1.2. Caractéristique physique du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé.

1.1.2.1. Climat du bassin

Le bassin versant de la Lobo à Nibéhibé est sous l'influence du climat équatorial de transition atténué (climat baouléen) caractérisé par deux saisons (Figure 2) :

- une saison des pluies de mars à novembre avec un ralentissement des précipitations en juillet-août ;
- une saison sèche très marquée de Novembre à février comportant quelques précipitations isolées.

La pluviométrie moyenne annuelle enregistrée sur la période 1990-2015 vaut 1 238,2 mm. La tendance des températures moyennes mensuelles varie globalement entre 24 °C et 28 °C, soit une amplitude thermique de 4 °C (Yapi, 2018).

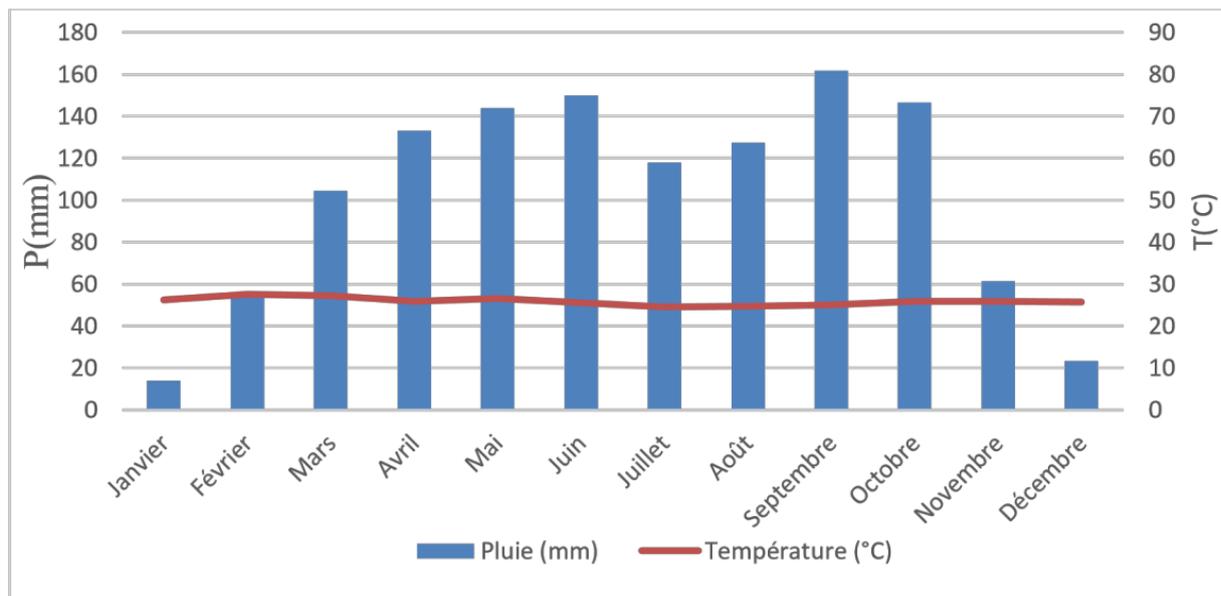


Figure 2 : Evolution de la pluviométrie et de la température à la station de Daloa (1990-2015)

Yapi (2018)

1.1.2.2. Relief du bassin

Le relief du bassin de la Lobo à Nibéhibé est dans son ensemble monotone avec des singularités par endroits. Il se présente comme une pénéplaine dont l'altitude varie entre 160 m et 480 m (Avenard, 1971). Dans l'ensemble, deux grands types de relief se partagent le bassin (Figure 3). Ce sont les plaines et les plateaux.

GENERALITES

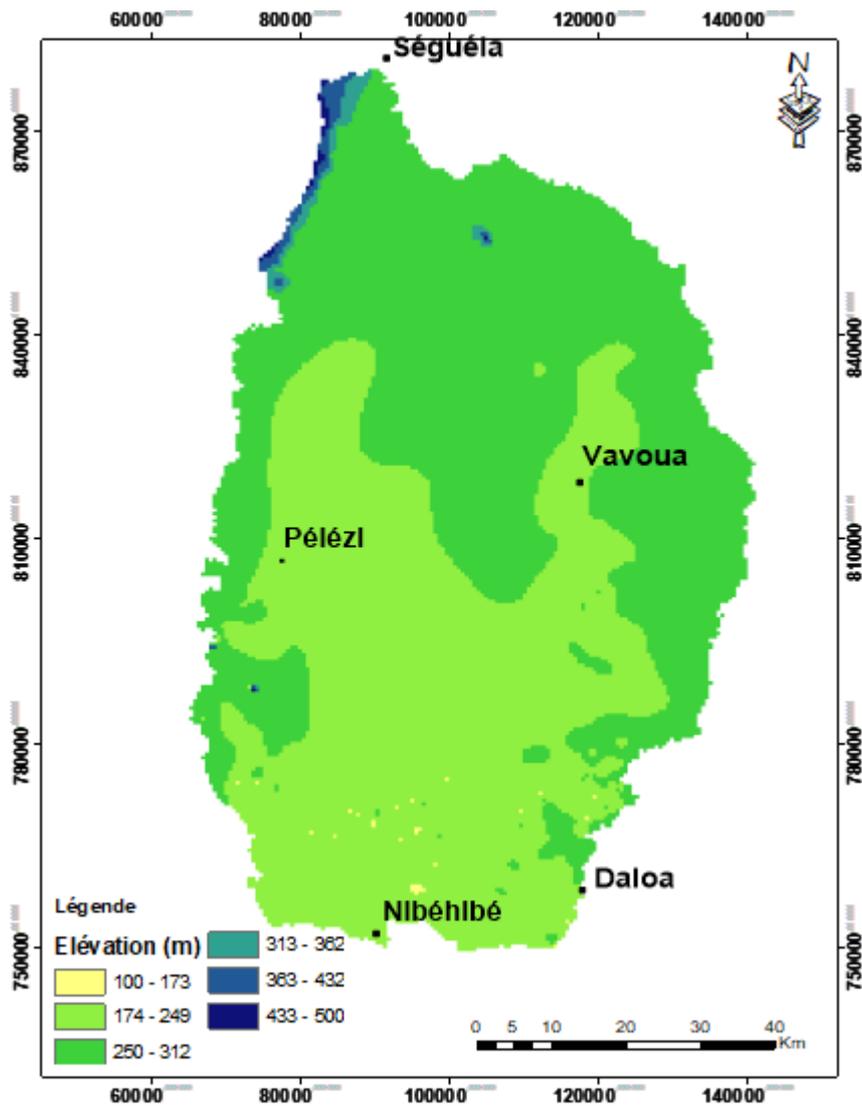


Figure 3 : Relief du bassin versant de la Lobo

1.1.2.3. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la Lobo à Nibéhibé est nettement plus développé sur le cours d'eau principal (Lobo) que ses affluents (Yao, 2015) (Figure 4). Les eaux de la Lobo s'écoulent principalement dans la direction Nord-Sud.

GENERALITES

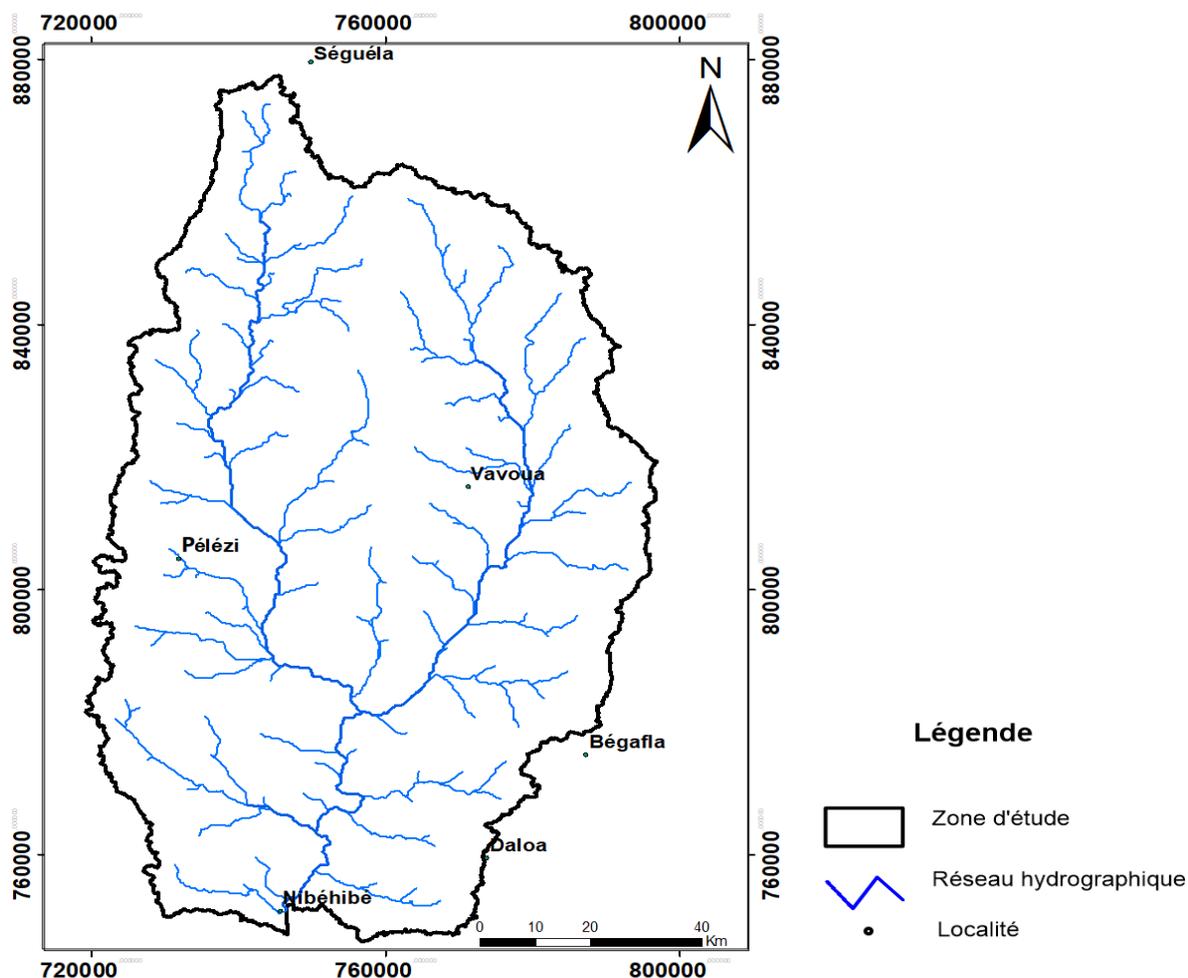


Figure 4 : Réseau hydrographie de la zone d'étude

1.1.3 Activités socio-économiques

Le bassin versant de la Lobo à Nibéhibé est une zone à vocation agricole. L'agriculture est l'activité principale qui occupe la majeure partie de la population active sur le bassin (Koukougnon, 2012). Le milieu rural étant dominé par l'agriculture, on y trouve des cultures de rente telles que le cacao (Figure 5 a), le café, l'hévéa, le coton, l'anacarde et les cultures vivrières. Au niveau des cultures vivrières, le maïs, le riz, l'igname, la banane plantain, le piment, l'aubergine et le manioc constituent les principales cultures de subsistance des populations. Le riz est l'une des principales cultures pratiquées sur toute la surface du bassin. Il existe deux types de riz : le riz irrigué et le riz pluvial. La production de riz irriguée (Figure 5 b), se fait à partir de barrages hydro-agricoles et de bas-fonds humides aménagés. Cependant, les activités économiques sont peu diversifiées sur le bassin de la Lobo. Toutefois, l'agriculture reste la principale activité génératrice de revenus des populations. C'est une agriculture

GENERALITES

extensive, anarchique, pluviale et manuelle, qui compense ses faiblesses par la conquête permanente de terres nouvelles (Koukougnon, 2012 ; Yao, 2015).



Figure 5 : Quelques cultures pratiquées sur le bassin : a : cacao ; b : riz irrigué (Kadjo, 2019)

1.2. GENERALITES SUR QUELQUES CONCEPTS

1.2.1. Imagerie satellitaire

1.2.1.1. Définition et description

L'image se définit comme la représentation bidimensionnelle d'un objet, produite par la réflexion ou la réfraction de la lumière, ou plus simplement une matrice (Wiederkehr, 2013). L'imagerie satellite (ou satellitaire) qualifie une imagerie de télédétection recueillie par les satellites artificiels (Spot, Landsat, Ikonos, Terra, etc.) en orbite autour de la terre ou d'autres planètes. Les images existent dans certaines longueurs d'onde (ultra-violet, visible, infrarouge, etc.) qui peuvent être combinées en vue de différentes interprétations. Elles intègrent tout le processus de télédétection consistant à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information sous forme d'image, pour ensuite mettre en application cette information (Robin, 1995 ; CCT, 1999). L'imagerie satellitaire utilise, comme outils, les vecteurs et les capteurs. Les vecteurs (ou plateformes) sont des appareils (grues, avions, satellites, navettes spatiales, etc.) porteurs de dispositifs de détection que sont les capteurs (caméras, radars, etc.). On distingue les capteurs passifs des capteurs actifs. Les premiers renvoient à la télédétection passive et mesurent des rayonnements réfléchis ou retransmis par un objet illuminé par une source d'énergie naturelle, comme le soleil. Pour la télédétection active, les capteurs produisent leur propre énergie. Il s'agit notamment des satellites radars mesurant un rayonnement d'origine artificielle réfléchi par une cible (Robin, 1995).

GENERALITES

Les images satellitaires présentent quatre caractéristiques essentielles (Wiederkehr, 2013) à savoir :

- la résolution spatiale indiquant la taille du plus petit objet perceptible dans une image, appelé pixel ;
- la résolution spectrale indiquant l'ensemble des fréquences des rayonnements électromagnétiques captées par le capteur ;
- la résolution radiométrique correspondant à la gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible ;
- la résolution temporelle correspondant à la fréquence d'acquisition des images par le vecteur au-dessus d'une zone donnée.

1.2.1.2. Domaines d'application

Les images satellitaires, grâce à leur vue synoptique, sont un outil important dans l'analyse et la cartographie des phénomènes dynamiques tels que l'occupation du sol, les incendies ainsi que dans la planification et la gestion des ressources naturelles. Selon Robin (1995), le CCT (1999), Girard & Girard (1999), les applications de l'imagerie satellitaire couplée aux SIG sont très diverses. Ils peuvent s'utiliser dans les domaines de :

- la météorologie et la climatologie, pour l'étude de la nébulosité, la mesure des températures, etc. ;
- l'océanographie, dans l'analyse de la couleur des océans, dans l'étude de la dynamique des océans, pour la mesure des températures de surface de la mer, etc. ;
- l'agriculture, dans la classification des types de cultures, pour la surveillance des cultures et l'évaluation des dommages, l'estimation de la production totale d'une récolte, la cartographie des caractéristiques du sol, etc. ;
- la foresterie, pour l'observation de la dynamique du couvert forestier, pour la surveillance de l'état sanitaire, de la qualité et de la stratification des forêts, la mesure de la biomasse, l'évaluation des puits de carbone, la détection des feux actifs, etc.

1.2.2. Modèles et Simulation

1.2.2.1. Définition

Un modèle représente un idéal ou un prototype donné, qui peut soit servir de référence, soit être reproduit. Il est aussi défini comme une représentation « simplifiée » de l'objet réel (processus, ensemble de phénomènes, etc.). Il se focalise uniquement sur l'intérêt de l'objet, ignore les détails et sélectionne l'espace et le temps adéquats (Coquillard & Hill, 1997).

GENERALITES

La modélisation est la conception d'un modèle. Il a pour objectifs de (i) expliquer (comprendre), (ii) décrire (résumer) les données et (iii) prédire (ou simuler) le fonctionnement d'un phénomène. La simulation, quant à elle, consiste en la mise en action du modèle (Coquillard & Hill, 1997).

Cependant, par simple commodité, nous utilisons les termes modélisation et simulation l'un pour l'autre, en nous référant à un usage fréquent du terme simulation qui sous-entend l'immersion du modèle dans le temps.

Dans cette étude, nous simulerons l'occupation du sol, notre variable étudiée.

1.2.2.2. Quelques modèles utilisés dans la simulation de l'occupation du sol

Pour simuler l'occupation du sol, plusieurs modèles sont utilisés. Parmi les plus utilisés et/ou diffusés, on peut citer : CA_MARKOV sur IDRISI, Land Change Modeler (disponible sur IDRISI et comme extension de ArcGIS), DINAMICA EGO et CLUE-S.

1.2.2.2.1. Cellular Automata (CA) – Markov

CA_Markov est un outil puissant pour la description et la spatialisation des phénomènes dynamiques. Il permet de simuler les états futurs d'un phénomène en fonction des règles de transition de l'état passé à l'état présent, de l'état présent et de la proximité spatiale des états du phénomène. Ce modèle se déroule en trois phases, à savoir :

- l'analyse des chaînes de Markov ;
- l'évaluation multicritère ;
- l'application des automates cellulaires (*Cellular Automata*).

• Analyse des chaînes de Markov

Les chaînes de Markov, processus stochastiques, prédisent l'avenir des modes d'utilisation des terres en se basant sur l'observation des évolutions du passé et l'état présent (Eastman, 2006). L'algorithme se base sur l'état de la variable modélisée aux instants d'apprentissage $t-1$ et t et calcule les sorties suivantes :

- une matrice de probabilités de transition ;
- une matrice de surfaces de transition ;
- un ensemble d'images de probabilités conditionnelles (une image par état de la variable).

Les probabilités conditionnelles finales sont obtenues par multiplication des probabilités conditionnelles avec le résultat de la soustraction ($1 -$ l'erreur proportionnelle). L'erreur

GENERALITES

proportionnelle exprime la probabilité que l'état de la variable dans les cartes d'entrée soit vrai. Une erreur proportionnelle égale à zéro exprimerait la confiance totale dans les événements de la phase d'apprentissage.

La matrice de probabilités de transition de sortie est le résultat de la matrice des deux images d'entrée ajustée par leur erreur proportionnelle. Elle permet de décrire les tendances de changement sous forme de probabilité de transition d'un état d'occupation du sol à un autre. La matrice de surfaces de transition est obtenue par multiplication de chaque colonne de la matrice de probabilités de transition par le nombre de pixels correspondant dans l'image d'entrée à la date t .

Les limites de l'analyse markovienne sont caractérisées par la non-spatialisation de ces transitions (Paegelow *et al.*, 2004 ; Paegelow & Olmedo, 2005 ; Eastman, 2006).

• **Evaluation multicritère (EMC)**

L'analyse multicritère est une méthode qui permet d'orienter un choix sur la base de plusieurs critères communs. Cette méthode est essentiellement destinée à la compréhension et à la résolution de problèmes de décision. Les critères sont l'élément de base décisionnel. Ils peuvent être évalués ou mesurés. Ils se composent de deux types de variables : les facteurs et les contraintes.

Les contraintes peuvent s'appliquer à tous les états de la variable modélisée (occupation du sol) ou être spécifiques à certains états. Elles agissent de manière booléenne sur la possibilité de la réalisation des états dans l'espace : "vrai" ou "faux". Les pixels codés "faux" auront la probabilité d'état zéro.

Les facteurs, quant à eux, regroupent les variables environnementales agissant de manière nuancée sur la probabilité de réalisation d'un état de la variable étudiée (occupation du sol). Pour chaque facteur, la probabilité par état varie entre 0 et 255 dans la matrice des pixels. L'objectif de l'EMC est de fournir des cartes d'aide à la décision pour chaque état de la variable. Pour cet usage de l'espace, la procédure générera une carte d'aptitude ou de probabilité que l'on peut qualifier de carte décisionnelle.

• **Application des automates cellulaires**

Un automate cellulaire consiste en une grille régulière de "cellules" contenant chacune un "état" choisi parmi un ensemble fini et qui peut évoluer au cours du temps. L'état d'une cellule au temps $t+1$ est fonction de l'état au temps t d'un nombre fini de cellules appelé son "voisinage". À chaque nouvelle unité de temps, les mêmes règles sont appliquées simultanément à toutes les cellules de la grille, produisant une nouvelle "génération" de

GENERALITES

cellules dépendant entièrement de la génération précédente (Coquillard & Hill, 1997). Ils permettent de prendre en compte l'interaction spatiale dans les processus de simulations. Ils traitent la variable étudiée comme un système dynamique dans lequel l'espace, le temps et les états de ce système sont discrets (Paegelow *et al.*, 2004 ; Eastman, 2006).

Un filtrage par application d'un filtre classique de contiguïté 5x5 aux règles de transition issues de l'analyse markovienne permettant d'éliminer les occurrences isolées (Eastman, 2006). Le tableau I présente le filtre appliqué dans l'automate cellulaire.

Tableau I : Exemple de filtre de contiguïté 5x5 utilisé dans l'automate cellulaire

0	0	1	0	0
0	1	1	1	0
1	1	1	1	1
0	1	1	1	0
0	0	1	0	0

Les valeurs de sortie sont des nombres réels entre 0 et 1. On applique le filtre sur des images booléennes de chaque état (catégorie d'occupation du sol) prédit par l'analyse de Markov. On obtient alors des images de probabilité pondérées qui sont multipliées avec les images d'aptitude produites par EMC et qui matérialisent la base de connaissances. Le résultat obtenu (image réelle) est converti en nombres entiers 0-255. En résumé, le CA favorise des pixels dont l'état est à la fois probable et qui sont proches des pixels / zones ayant une probabilité élevée pour le même état.

1.2.2.2. Land Change Modeler (LCM)

Le modèle LCM a été développé par IDRISI afin d'étudier l'occupation du sol, de projeter leur dynamique dans le futur et d'en évaluer l'impact sur la biodiversité (Eastman, 2006). Une première estimation des changements (pertes, gains, changements nets, constance) est réalisée par la création de graphiques et de cartes de changements. Cette phase d'analyse permet la mise en place de sous-modèles de transition potentielle entre plusieurs catégories d'occupation du sol, tout en tenant compte des variables statiques ou dynamiques. Les variables, qui sont intégrées à chaque sous-modèle, sont préalablement évaluées avec le coefficient V de Cramer, afin de connaître leur pouvoir explicatif. Pour modéliser les changements d'occupation et d'utilisation des sols, LCM utilise soit la technique des réseaux

GENERALITES

neuronaux artificiels multicouches (*Multi-Layer Perceptron* ou MLP), soit une régression logistique. Le réseau neuronal est recommandé, car il est plus performant que le modèle de régression multiple, notamment dans les systèmes complexes et non linéaires (Coquillard & Hill, 1997), mais peut conduire à « un sur-ajustement de la relation probabilité de changement / variables explicatives et du poids respectif des variables aux caractéristiques de la période de calibrage » (Eastman, 2006).

Un réseau neuronal de type perceptron multicouche est constitué d'unités (ou nœuds) interconnectées de manière hiérarchique, avec une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées qui jouent le rôle d'une boîte noire, et la couche de sortie. La procédure de spatialisation des changements d'utilisation et d'occupation du sol se fait par affectation multi-objectif (MOLA), qui se couple à l'estimation de la quantité de changement effectuée par des chaînes de Markov. L'évaluation multi-objectif permet de prendre en compte la totalité des conversions afin de lister les catégories d'occupation du perdant en surface et celles en gagnant sur les premières. Le résultat est une carte de transition potentielle pour chaque transition (Eastman, 2006).

1.2.2.2.3. Dinamica EGO

Dinamica EGO est un modèle de simulation de la dynamique de l'environnement mis au point par le Laboratoire de Télédétection de l'Université fédérale de Minas Gerais (Brésil). C'est un logiciel libre qui regroupe les outils SIG traditionnels avec plusieurs opérateurs pour simuler les phénomènes spatiaux. Le modèle, du calibrage à la validation, suit un flux de données sous forme de diagramme permettant de créer des modèles en connectant des algorithmes via leurs ports.

Comme dans CA_Markov et LCM, la quantité de changement dans Dinamica est calculée à l'aide de chaînes de Markov, synthétisée sous forme d'une matrice de transition, généralement obtenue par la comparaison de cartes d'occupation et d'utilisation des sols à deux dates différentes. La matrice de transition entre la date de t et $t-1$ obtenue en superposant les deux cartes d'occupation des sols, indique la surface (ou le nombre de pixels) pour chaque transition. La matrice de transition est transformée en taux de transition annuel pour projeter les changements sur une base annuelle en multipliant les matrices des vecteurs propres, leurs inverses et les valeurs propres entre elles.

Cette matrice peut être transformée en une matrice de probabilité de transition qui permet de réaliser des projections pour une ou plusieurs dates futures (dates $t+1$).

GENERALITES

Dinamica calcule une carte de probabilité en utilisant la méthode des poids d'évidence. Ces poids peuvent éventuellement être modifiés en utilisant un algorithme générique pour améliorer la concordance entre les cartes de probabilité de changement et les cartes d'occupation et d'utilisation des sols utilisées pour le calibrage du modèle (Soares-Filho *et al.*, 2002).

1.2.2.2.4. CLUE-S

CLUE-S (*Conversion of Land-Use and its Effects at Small regional extent*) (Verburg *et al.*, 2002) permet de simuler un ensemble de scénarii hypothétiques relatifs aux changements dans l'utilisation des terres. Les paramètres de départ les plus importants sont un ensemble de forces motrices spatialement explicites pour le changement de l'occupation des terres, quelques règles de conversion, les restrictions spatiales et les changements attendus dans les différentes catégories d'utilisation des terres.

Pour modéliser les changements futurs dans l'utilisation des terres, il est indispensable de connaître les paramètres qui déterminent la répartition spatiale des différents types d'utilisation des sols.

Avec CLUE-S, pour quantifier les changements, l'utilisateur doit fournir les quantités (nombre de pixels) des catégories d'occupation des sols pour chaque année de simulation. Pour l'évaluation de la probabilité de changement, CLUE-S utilise des cartes qui expriment l'aptitude pour chacune des catégories d'occupation et d'utilisation des sols. CLUE-S requiert d'utiliser une méthode statistique (régression logistique multi-variée) provenant de programmes informatiques indépendants (Verburg *et al.*, 2002).

1.3. TRAVAUX ANTERIEURS SUR LA MODELISATION DE L'OCCUPATION DU SOL

L'imagerie satellitaire a fortement contribué à la gestion des forêts des pays tropicaux depuis son avènement. En effet, plusieurs études ont montré l'importance des outils spatiaux pour mesurer les changements du couvert forestier.

Au niveau mondial, Mas (1998) et Tsayem (2002) ont utilisé les images satellitaires multi dates dans le suivi et l'analyse de la déforestation des forêts tropicales respectivement au Mexique et au Brésil, et en Guyane. Ils ont montré que le traitement de ces images permettait le suivi et la modélisation de la déforestation à l'aide d'un SIG. En outre, Kouassi *et al.* (2016) ont utilisé les images satellitaires pour étudié la dynamique spatio-temporelle des habitats naturels du site Ramsar du complexe Sassandra-Dagbego. Ils ont montré que la réalisation indices, de compositions colorées et de classification supervisée permettait de cartographier

GENERALITES

l'occupation du sol et d'analyser la dynamique des habitats naturels. Paegelow *et al.* (2004) et Paegelow & 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). Ces études ont montré 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.

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 montré que les changements d'occupation et d'utilisation des terres pouvaient être modélés 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 & Wang (2006) ont montré que 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 en utilisant l'approche d'aide à la décision. 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). Au niveau continental, Lambin & 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.

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 trouve 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 montre une régression des forêts au profit des cultures.

GENERALITES

En Côte d'Ivoire, N'guessan & Condé (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.

Aussi, Coulibaly *et al.* (2016) ont analysé le processus de savanisation du nord de la Côte d'Ivoire dans le département de Ferkessédougou à l'aide des images satellites. Ils ont montré que La matrice du paysage, initialement constituée par les forêts claires (57,18% du paysage), s'est dégradée au profit des savanes (qui ont conquis 25,21 % des forêts claires), des jachères et cultures. Oszwald (2005) ; Koné *et al.* (2006) et Oszwald *et al.* (2007) ont utilisé également ces images de télédétection pour le suivi diachronique de la dynamique des formations végétales forestières et agroforestières ivoiriennes. Ces études ont montré que la déforestation et la dégradation des forêts ivoiriennes s'expliquent par l'expansion de l'agriculture sustentée par une forte croissance démographique.

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1. MATERIEL

2.1.1. Données satellitaires et topographiques

Les données utilisées dans cette étude sont des données satellitaires de moyenne résolution (30m). Les images obtenues sont acquises à partir du portail de l’US *Geological Survey* (USGS). Il s’agit des capteurs TM (*Thematic Mapper*), ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) et OLI (*Operational Land Imager*) des satellites Landsat 5, 7 et 8 respectivement. Le secteur d’étude est à cheval entre les scènes 197-55 et 198-55. Les caractéristiques radiométriques des images sont données dans le tableau II.

Tableau II : Caractéristiques radiométriques des images Landsat

Satellite	Capteur	Résolution spectrale utilisée (µm)	Canal	Résolution spatiale (m)
Landsat 4-5	TM	Band 3: 0,63-0,69 Band 4: 0,76-0,90 Band 5: 1,55-1,75	Rouge Proche IR Moyen IR	30 30 30
Landsat 7	ETM+	Band 3: 0,63-0,69 Band 4: 0,76-0,90 Band 5: 1,55-1,75	Rouge Proche IR Moyen IR	30 30 30
Landsat 8	OLI	Band 4: 0,636-0,673 Band 5: 0,851-0,879 Band 6: 1,566-1,651	Rouge Proche IR Moyen IR	30 30 30

TM : Thematic Mapper,

ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus,

OLI : Operational Land Imager,

IR : Proche Infrarouge.

Au niveau des données topographiques, nous avons utilisé un Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu de la base de données Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de résolution 90 m, pour extraire notre bassin versant.

2.1.2. Données agricoles

Les données agricoles utilisées dans cette étude concernent les statistiques, les rendements de production par hectare et le nombre d’exploitant. Ces données sont fournies par la direction régionale du ministère de l’agriculture du Haut Sassandra.

2.1.3. Logiciels

Les logiciels utilisés dans le cadre de cette étude sont :

- ENVI 5.3 pour les traitements des images satellitaires ;
- IDRISI 17.0 pour la détection des changements et la modélisation de l'occupation du sol ;
- ArcGIS Desktop 10.4 pour la réalisation des cartes ;
- Excel pour la réalisation des graphes.

2.2. METHODES

2.2.1. Choix de la période d'acquisition des images satellites

La date d'acquisition des images est très importante dans l'étude des changements du paysage à partir de données satellitaires (Girard & Girard, 1999 ; Oszwald *et al.*, 2007 ; Daoudi *et al.*, 2009). Pour cela, nos données ont été sélectionnées pendant la grande saison sèche (décembre à février), période pendant laquelle les taux de couverture nuageuse sont les plus faibles. Par ailleurs, ce choix contribue à diminuer d'éventuels effets saisonniers (Barima *et al.*, 2009). Les différentes dates choisies sont : ETM le 09/01/1986 et le 16/01/1986 ; ETM+ le 20/01/2002 et 13/12/2002 ; OLI le 12/02/2019 et le 02/01/2019.

2.2.2. Prétraitement d'image satellitaire

2.2.2.1. Mosaïquage

La zone d'étude est couverte par deux scènes d'images Landsat. Il s'agit des scènes 197-55, et 198-55. Avant le traitement de ces images, elles ont été mosaïquées (figure 6). Le mosaïquage consiste à juxtaposer les différentes bandes identiques des scènes entre elles pour en former une de plus grande.

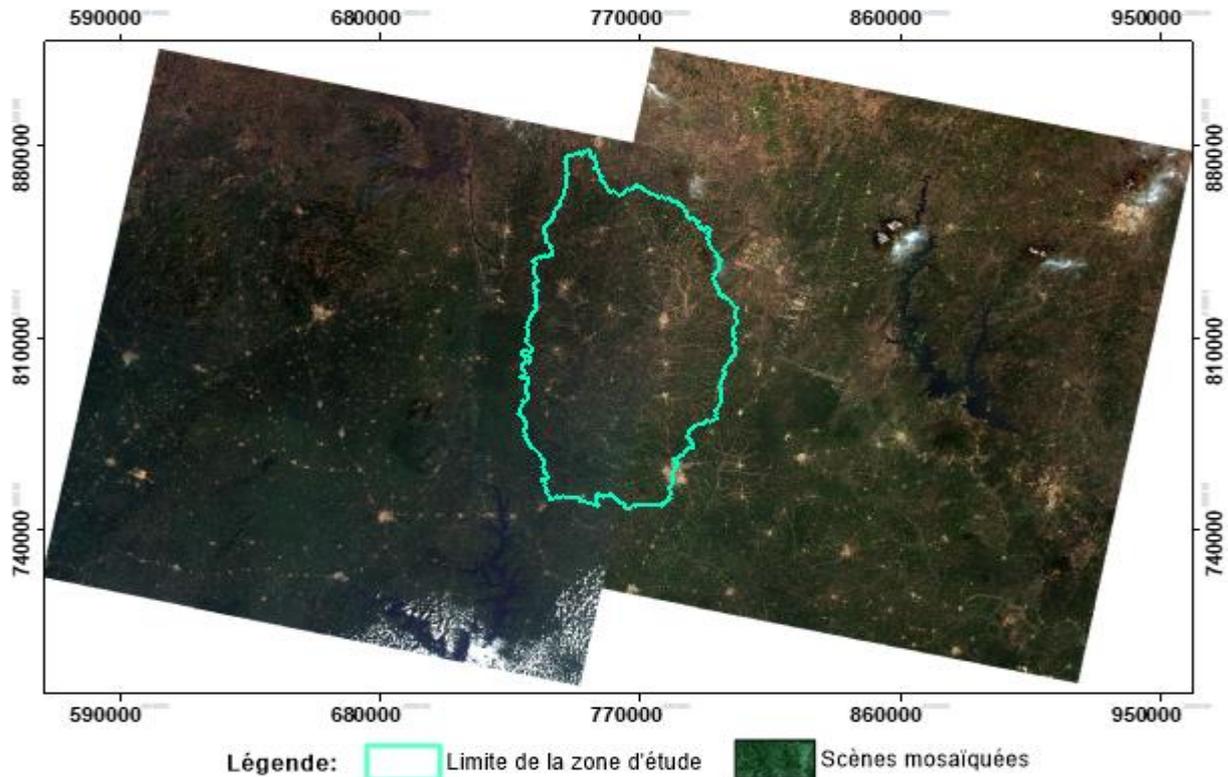


Figure 6 : Mosaique des bandes de l'image Landsat de 2019

2.2.2.2. Amélioration des contrastes des images

D'abord, les images ont été rehaussées dans le but d'uniformiser les teintes des bandes spectrales des différentes images. Par ailleurs, bien que les images soient issues du même satellite, il n'est pas rare que deux images adjacentes (scènes) n'aient pas la même luminosité, faisant apparaître un fort contraste. Pour pallier ce problème d'écarts de luminosité entre les images, nous avons procédé à une amélioration locale du contraste suivant les étapes suivantes:

- Une calibration radiométrique pour normalisée l'intensité du signal afin de faire une analyse multi temporelle et de comparer les images,
- Une correction atmosphérique pour réduire les effets dus aux composants atmosphériques (la quantité de vapeur d'eau, la distribution des aérosols...) sur le rayonnement électromagnétique.

2.2.2.3. Extraction de la zone d'étude

La zone d'étude a été délimitée à partir des images mosaïquées, suivant les limites du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé. En effet, la zone contenue à l'intérieur des limites administratives a été extraite à l'aide du logiciel ArcGIS 10.4.

2.2.3. Traitement d'image satellitaire

2.2.3.1. Indice de végétation

L'indice de végétation Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a été réalisé dans le but d'aider à l'interprétation des résultats.

Le NDVI utilise les canaux, rouge et proche infrarouge d'une image optiques dans le but de faire ressortir l'intensité de la verdure d'une région. L'indice a été accompli grâce à la fonction de calcul du NDVI dans le logiciel ENVI 5.3 grâce à l'équation 1.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Proche infrarouge} - \text{rouge}}{\text{Proche infrarouge} + \text{rouge}} \quad (1)$$

L'indice donne une valeur entre 1 et -1 où 1 est une végétation très intense et -1 aucune trace de végétation.

2.2.3.2. Composition colorée et interprétation visuelle d'image

La composition colorée a consisté à combiner des informations que contiennent trois bandes en les affichant simultanément dans les trois couleurs primaires (rouge, vert et bleu). L'objectif de cette opération est d'avoir une synthèse d'informations en vue de faire une bonne discrimination des types de formations végétales.

Au terme de plusieurs combinaisons, la composition colorée TM et ETM+ 4-5-3 et OLI 5-6-4 a été choisie, car elle présente les meilleures discriminations des types d'occupation du sol (Girard & Girard, 1999 ; Oszwald, 2005).

2.2.3.3. Classification et évaluation

La connaissance de la zone d'étude nous a permis d'opter pour une classification supervisée. Elle consiste à appliquer le même traitement à chaque pixel, indépendamment des pixels voisins.

L'algorithme Maximum de Vraisemblance (*Maximum Likelihood*) a été choisi pour la classification des bandes TM 4-5-3, ETM+ 4-5-3 et OLI 5-6-4 de la composition colorée. Cette méthode calcule la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée. Le pixel sera affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte. Cependant, si cette probabilité n'atteint pas le seuil escompté, le pixel est classé "inconnu".

Ensuite, la qualité de la classification obtenue a été évaluée à l'aide des paramètres calculés par la matrice de confusion que sont la précision globale et le coefficient Kappa (Congalton, 1991 ; Girard & Girard, 1999)(Tableau III). Appelée aussi tableau de contingence, 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. Elle est calculée avec les valeurs exprimées en pixels et en pourcentage.

Tableau III : Précision avec le coefficient de Kappa

Coefficient de Kappa	Commentaires
0,00 à 0,20	Accord léger
0,21 à 0,40	Accord juste
0,41 à 0,60	Accord modéré
0,61 à 0,81	Accord considérable
0,81 à 1,00	Accord parfait

2.2.3.4. Vectorisation et représentation cartographique

La vectorisation constitue la dernière étape du traitement des images. Elle a consisté à convertir les images classifiées du mode raster en mode vecteur (polygones) dans le but de faciliter leur gestion dans le logiciel d'analyses SIG, ArcGIS 10.4. La rédaction cartographique a consisté à réaliser les cartes d'occupation du sol de 1986, 2002 et 2019, en ajoutant les localités, le nord géographique, la légende et l'échelle.

2.2.4. Analyse de la dynamique de l'occupation du sol

L'analyse des changements survenus sur toute la période d'étude a été faite par une comparaison post-classification. Elle produit une matrice de détection des changements issue de la comparaison entre les pixels de deux classifications entre deux dates (Girard & Girard, 1999). A partir de cette situation, le taux de changement global (Tg) et le taux moyen annuel d'expansion spatiale (Tc) ont été calculés.

Les changements à l'échelle globale ont été déterminés en ressortant les superficies des différentes unités d'occupation du sol pour chaque année. Les changements ont été déterminés sur trois(3) périodes qui sont : la période allant de 1986 à 2002, la période allant de 2002 à 2019 et la période allant de 1986 à 2019. Cela a consisté à effectuer le rapport entre la différence des superficies et les superficies initiales pour chaque période.

Dans un second temps, nous sommes passés à une analyse approfondie, en évaluant les changements intervenus au sein de chaque unité d'occupation du sol prise isolément. Cette

analyse se fait par le calcul du taux de changement (Tc) ou taux moyen annuel d'expansion spatiale, couramment utilisé dans les études sur le changement d'occupation du sol (FAO, 1996 ; Hadjadj, 2011).

Ces taux de changement s'évaluent à partir des formules des équations 2 et 3 suivantes :

$$Tg = [(S2 - S1) / S1] \times 100 \quad (2)$$

$$Tc = [(S2 / S1)^{1/t} - 1] \times 100 \quad (3)$$

Où :

Tg = taux de changement global (%)

Tc = taux de changement (%)

S1 = superficie de la classe à la date t1

S2 = superficie de la classe à la date t2 (t2 > t1)

t = nombre d'années entre les deux dates.

L'analyse des valeurs du taux de changement montre que les valeurs positives indiquent une "progression" et les valeurs négatives, une "régression" des classes d'occupation du sol. Les valeurs proches de zéro indiquent que la classe est relativement "stable"

2.2.5. Simulation de la dynamique de l'occupation du sol

2.2.5.1. Choix du modèle CA_Markov

Le modèle CA_Markov a été choisi pour sa performance et le fait qu'il ait été appliqué de multiples fois avec succès dans les régions tropicales. Selon les travaux de Mas *et al.* (2011) et Maestriperi (2012), le modèle CA_Markov a donné des résultats meilleurs dans la simulation de l'occupation du sol comparativement aux autres modèles (LCM, Dinamica et CLUE-S).

Ce modèle combine les chaînes de Markov, l'EMC et les automates cellulaires. La méthode mise en place est une chaîne de traitement composée de deux étapes, de la construction des données jusqu'à la modélisation.

La première étape concerne l'EMC (Evaluation Multicritère) : les variables de l'environnement (réseau routier, pentes, altitude) susceptibles d'avoir un effet sur la dynamique de l'occupation du sol sont identifiées et pondérées dans le but d'obtenir des cartes d'aide à la décision en intégrant un ensemble de critères mesurables et cartographiables. Ces cartes ont été produites et regroupées dans un fichier.

MATERIEL ET METHODES

La deuxième étape a consisté à ouvrir le module CA-Markov dans le logiciel IDRISI. Le processus a consisté dans un premier temps à entrer l'image de couverture du sol de base qui est la dernière image de la couverture terrestre utilisée avec MARKOV (l'image de 2002). Puis le nom de fichier des zones de transition de Markov, créé par MARKOV, a été inséré. Ensuite le nom du fichier de groupe qui répertorie les images de compatibilité de la transition a été inséré (fichier regroupant les cartes d'aptitudes). Enfin un nom pour la projection de couverture terrestre en sortie et l'indication du nombre d'année de la projection ont été établis. La valeur 5 x 5 a été utilisée comme filtre de contiguïté.

2.2.5.1. Calibration et validation du modèle

Afin de simuler la dynamique de l'occupation du sol à une date ultérieure (2050), il convient au préalable de calibrer le modèle sur des données connues. L'image de 2019 étant la plus récente, elle fera l'objet d'une première simulation-test, calibrée par deux dates antérieures (1986 et 2002). Les images de 1986 et 2002 servent de base pour extrapoler les quantités de la future occupation du sol. Il s'agit d'une extrapolation linéaire, car la simulation se base sur deux points dans le temps afin de calibrer le modèle. D'après Pontius (2010), la calibration est l'estimation et l'ajustement des paramètres et des contraintes du modèle afin d'améliorer l'adéquation entre les sorties du modèle et un ensemble de données. Cette étape est fondamentale, car la qualité des résultats obtenus dépendra du bon paramétrage du modèle. Pour la validation, le résultat de la simulation de l'occupation du sol de 2019 est comparé à la carte d'occupation du sol de 2019 issue de la classification.

La méthodologie adoptée dans cette étude a été résumée et présentée dans la figure 7.

MATERIEL ET METHODES

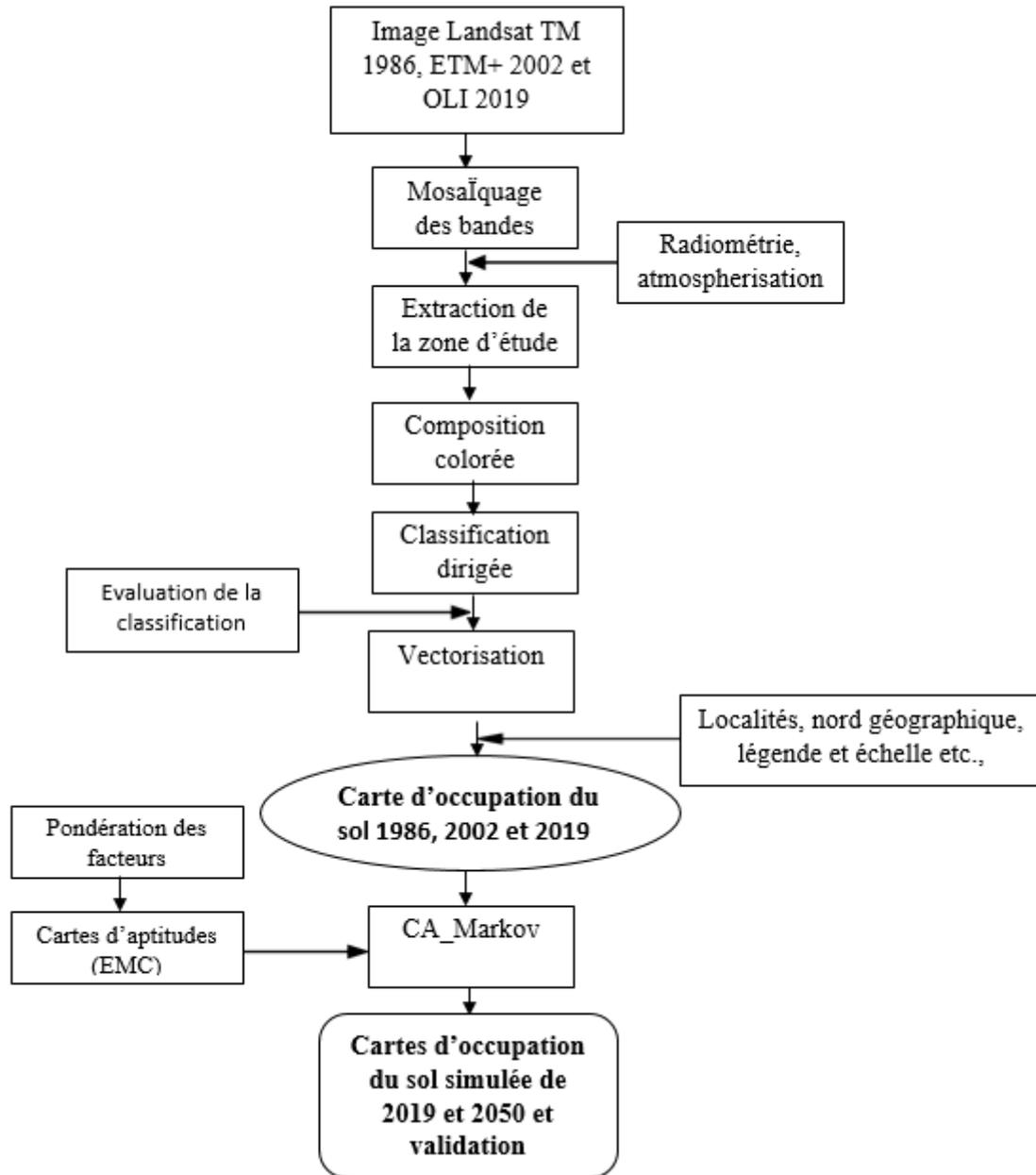


Figure 7 : Synthèse de la méthodologie utilisée pour le suivi de l'occupation du sol

PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. RESULTATS

3.1.1. Traitement d'images satellitaires

3.1.1.1. Indice de végétation (NDVI)

La réalisation de l'indice de végétation (Figure 8) met en évidence la présence de végétation sur le bassin versant de la rivière Lobo à Nibéhibé des années 1986, 2002 et 2019. Les zones de forte végétation apparaissent dans une teinte verte, tandis que les zones sans végétation apparaissent dans une teinte grise. On constate une diminution progressive de la végétation de 1986 à 2019.

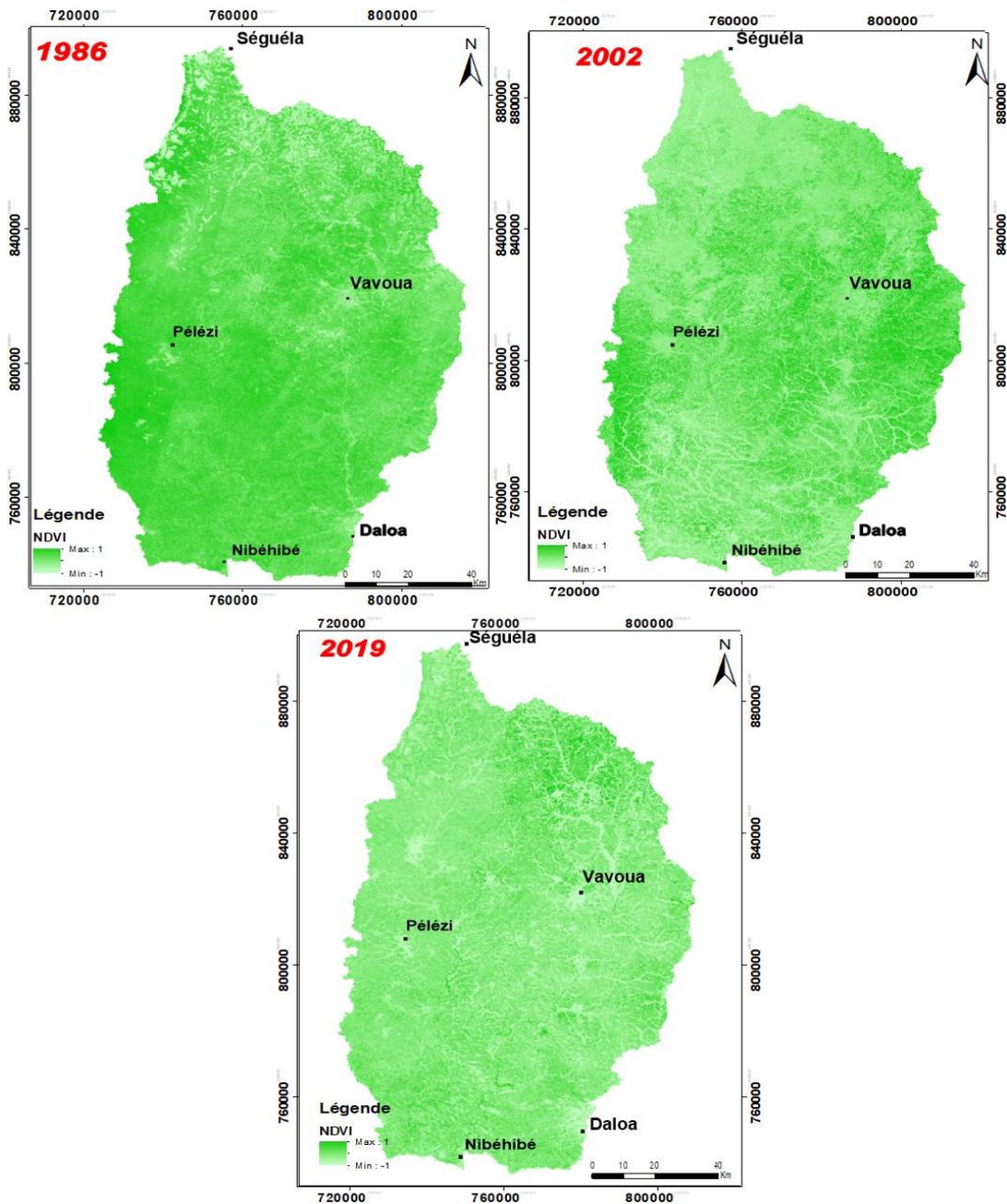


Figure 8 : Indices de végétation (NDVI) de 1986, 2002 et 2019

3.1.1.2. Composition colorée

Les compositions colorées TM, ETM+ 4-5-3 et OLI 5-6-4 obtenues à l'issue du traitement des images et l'interprétation visuelle ont permis d'avoir cinq (5) type d'occupation du sol. Il s'agit de (i) l'eau, (ii) la forêt, (iii) la forêt dégradée, (iv) les bâtis-sols nus, et (v) les cultures et jachères (figure 9).

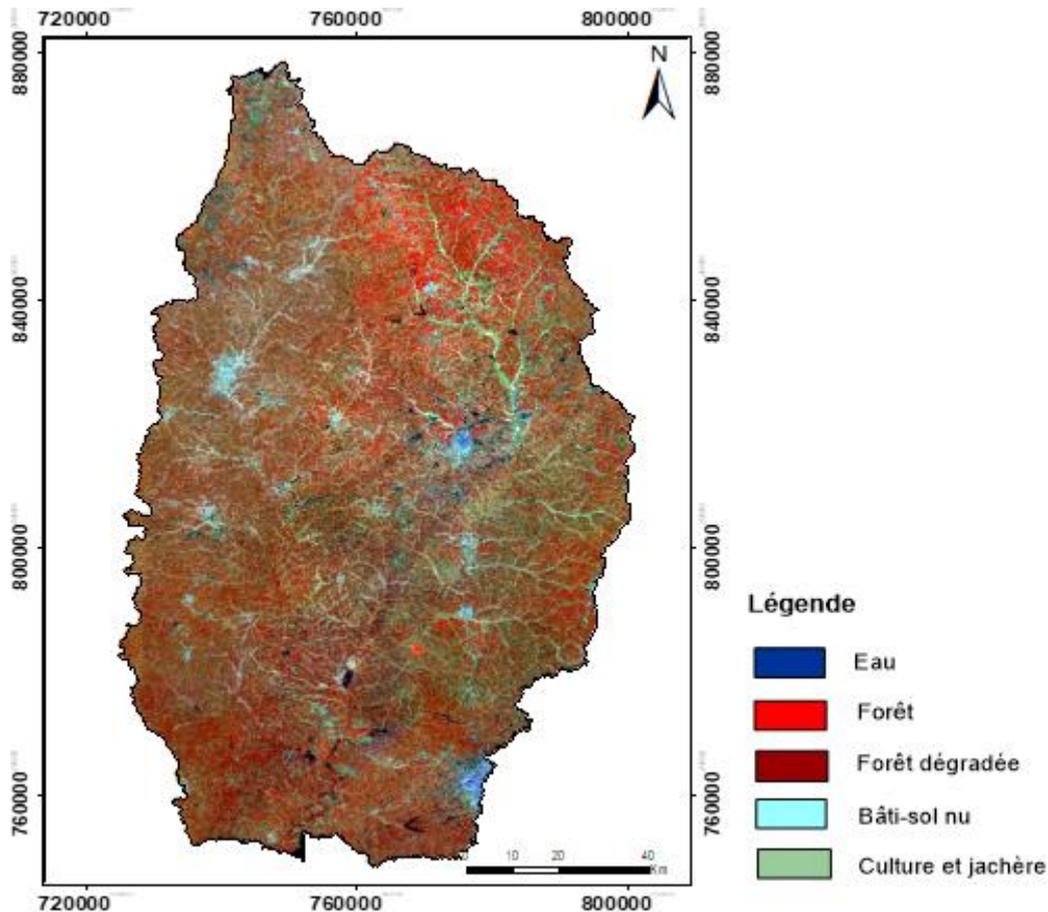


Figure 9 : Composition colorée OLI 5-6-4 de l'image Landsat de 2019. (Fausse couleur)

La figure 9 montre que les forêts sont caractérisées par une mosaïque de couleur du rouge à l'orangé. Les Forêts dégradées sont caractérisées par la coloration rouge foncé. Les cours d'eau apparaissent en bleu foncé. Les Bâti-sols nus en bleu cyan. Les cultures et jachère apparaissent dans des colorations allant du gris-verdâtre au bleuâtre.

3.1.1.2. Classification supervisée et évaluation

Les classifications des images Landsat TM et ETM+ réalisées à partir de la composition des bandes spectrales 4-5-3 et OLI à partir de la composition des bandes spectrales 5-6-4, ont été évaluées par les matrices de confusion représentées par les tableaux IV, V et VI à travers le

RESULTATS ET DISCUSSION

calcul de la précision globale de classification et du coefficient de Kappa. Ces tableaux affichent dans la diagonale, le pourcentage de pixels bien classés et hors diagonale, le pourcentage de pixels mal classés.

Tableau IV : Matrice de confusion de la classification de l'image de 1986

Classes	Eaux	Forêts	Forêts dégradées	Bâtis-sols nus	Cultures et jachères
Eaux	97,02	0	0,6	0	0
Forêts	1,82	96,2	9,81	0,53	1,57
Forêts dégradées	1,16	3,2	89,59	0	6,09
Bâtis-sols nus	0	0	0	98,57	0
Cultures et jachères	0	0,6	0	0	92,57
Total	100	100	100	100	100

Précision globale : 94,74 % ; Coefficient Kappa : 0,87

La matrice de confusion montre une bonne classification de l'image. Cependant, quelques confusions se sont produites. Les plus importantes de ces confusions sont les cas suivants :

- 9,81 % des forêts confondus aux forêts dégradées ;
- 6,09 % des forêts dégradées confondus aux cultures et jachères.

Tableau V : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2002

Classes	Eaux	Forêts	Forêts dégradées	Bâtis-sols nus	Cultures et jachères
Eaux	94,14	0	0,7	0	0
Forêts	1,03	96,52	1,2	0	1,83
Forêts dégradées	2,15	2,69	93	0	0,61
Bâtis-sols nus	1,8	0	0	100	0
Cultures et jachères	0,88	0,79	5,1	0	97,56
Total	100	100	100	100	100

Précision globale : 96,04 % ; Coefficient Kappa : 0,93

L'analyse de ce tableau montre que des confusions se sont produites d'une part entre les forêts dégradées et l'eau, d'autre part entre les forêts dégradées et les forêts. En outre, 5,1 % des cultures et jachères ont été confondus aux forêts dégradées.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau VI : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2019

Classes	Eaux	Forêts	Forêts dégradées	Bâtis-sols nus	Cultures et jachères
Eaux	98,64	0	2,01	0	0
Forêts	0	100	0	0	0
Forêts dégradées	1,05	0	89,13	0	4,44
Bâtis-sols nus	0,31	0	0,02	98,16	0
Cultures et jachères	0	0	8,84	1,84	95,56
Total	100	100	100	100	100

Précision globale : 94,10 % ; Coefficient Kappa : 0,90

Le tableau VI montre que la classe forêts dégradées présente des confusions avec la classe cultures et jachères. Il s'agit de :

- 8,84 % des cultures et jachères qui ont été confondus aux forêts dégradées ;
- 4,44 % des forêts dégradées qui ont été confondus aux cultures et jachères.

3.1.2. Analyse de la dynamique de l'occupation du sol

3.1.2.1. Evolution de l'occupation du sol de 1986, 2002 et 2019

La figure 10 présente les cartes obtenues après les classifications supervisées des images Landsat de 1986 et de 2002. Au total, cinq classes d'occupation du sol ont été identifiées. Ces classes sont entre autre : l'eau, les forêts, les forêts dégradées, les bâtis-sols nus et les cultures et jachères. L'analyse de cette figure montre qu'en 1986, le paysage était dominé par la forêt. En 2002, la domination du paysage forestier n'a pas tellement changé. Les surfaces cultivées prennent formes. En 2019, les surfaces cultivées se sont intensifiées et les bâtis-sols nus connaissent aussi une augmentation.

RESULTATS ET DISCUSSION

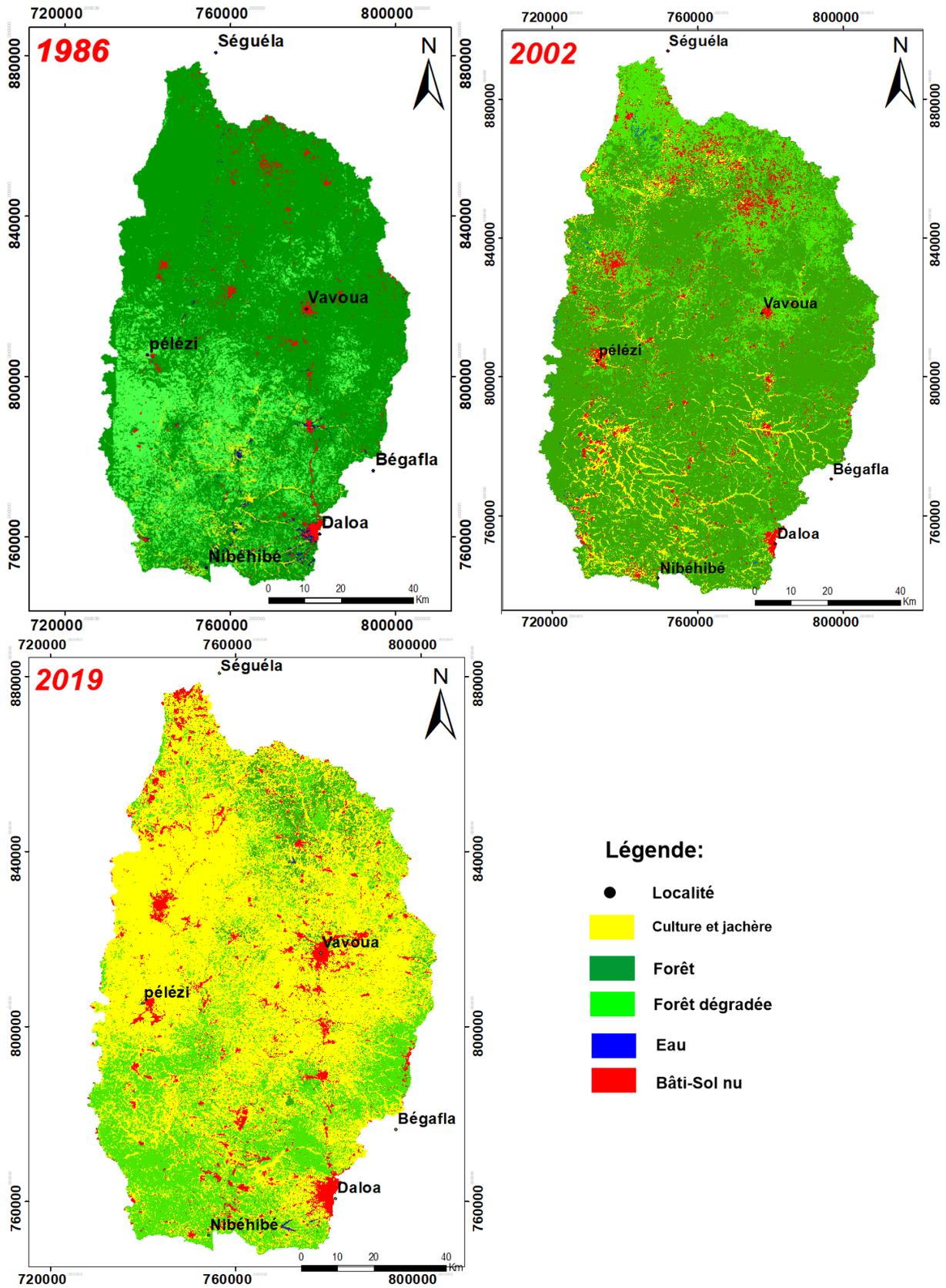


Figure 10 : Cartes d'occupation du sol de 1986, 2002 et 2019

RESULTATS ET DISCUSSION

L'évolution des superficies des différents types d'occupation du sol est représentée par la figure 11. Cette figure indique deux tendances d'évolutions.

Entre 1986 et 2002, on note d'une part, une diminution des superficies de l'eau et des forêts qui passent respectivement de 0,63% de la superficie totale du bassin à 0,59% de 76,22% à 43,88%. D'autre part, on observe une augmentation des superficies occupées par les forêts dégradées, les bâtis-sols nus et les cultures et jachères qui passent respectivement de 18,73% à 30,85%, de 1,87% à 7,59% et de 2,56% à 17,09%.

Durant la période de 2002 à 2019, on note une tendance de diminution des superficies en eau, des forêts et des forêts dégradées qui passent respectivement de 0,59% à 0,29% ; de 43,88% à 6,73% et de 30,85 % à 26,27 %.

On constate aussi une augmentation des surfaces bâtis-sols nus qui passent de 7,59 % à 7,95 % ainsi qu'une forte augmentation des cultures et jachères qui passent de 17,09 % à 55,84 %.

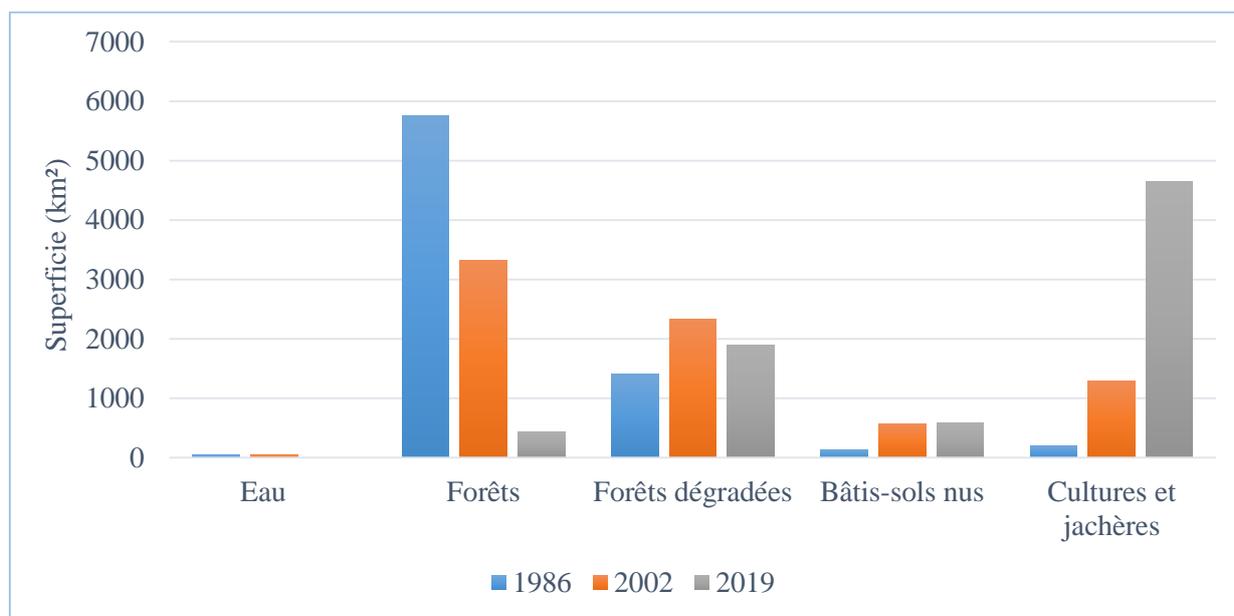


Figure 11: Evolution des superficies des classes d'occupation du sol de 1986, 2002 et 2019

Les taux de variation des différentes classes d'occupations du sol observés sur l'ensemble de la période d'étude (1986-2019) sont représentés par le tableau VII.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau VII : Taux de variation des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2019

Classes d'Occupation du sol	Tg (%)	Tc (%)
Eaux	-88,27	-12,53
Forêts	-92,48	-14,93
Forêts dégradées	+33,85	+1,83
Bâtis-sols nus	+310,15	+9,48
Cultures et jachères	+2303,65	+21,98

Tg : Taux de changement global

Tc : Taux de changement moyen annuel

L'analyse de ce tableau montre que des diminutions annuelles de 12,53 % et 14,93 %, ont été observées respectivement pour les surfaces en eau et les surfaces forestières. On note également une augmentation moyenne annuelle de 1,83 % et de 9,48 % respectivement des superficies des forêts dégradée et des bâtis-sols nus ainsi qu'une forte augmentation moyenne annuelle de 21,98 % des superficies des cultures et jachères de la zone d'étude.

En somme, on observe trois grands processus qui se sont déroulés dans le paysage en 33 ans. Il s'agit de :

- la dégradation de l'écosystème forestier, surtout des forêts et des forêts dégradées qui ont été transformées en d'autres classes d'occupation du sol ;
- la régénération naturelle ou anthropique du couvert forestier qui a abouti à la restauration et à la formation de forêts dégradées;
- l'ensablement et l'eutrophisation des plans d'eau.

3.1.3. Simulation de l'état de l'occupation du sol

3.1.3.1. Calibration et validation du modèle

Pour la calibration, une matrice de probabilité de transition a été produite à l'aide des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2002 afin de l'utiliser comme base dans la projection de l'occupation du sol en 2019 (Tableau VIII). La matrice indique la probabilité dont dispose chaque catégorie en 2002 de migrer vers une autre catégorie ou de rester stable en 2019.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau VIII : Matrice de probabilité de transition pour la simulation de 2019

Classes 2002 Classes 1986	Eaux	Forêts	Forêts dégradées	Bâtis-sols nus	Cultures et jachères
Eaux	0,3496	0,0410	0,2086	0,1043	0,2966
Forêts	0,0011	0,3452	0,3042	0,0104	0,2392
Forêts dégradées	0,0052	0,0045	0,5452	0,1367	0,3085
Bâtis-sols nus	0,0081	0,0077	0,0172	0,6230	0,3441
Cultures et jachères	0,008	0,0071	0,0305	0,1303	0,8314

De l'analyse de ce tableau, on remarque une stabilité globale avec un maximum pour les bâtis-sols nus et les cultures et jachères.

Pour la calibration du modèle, la carte d'occupation du sol simulée en 2019 a été validée en la comparant à la carte d'occupation du sol de 2019 issue de la classification comme l'indique la figure 12.

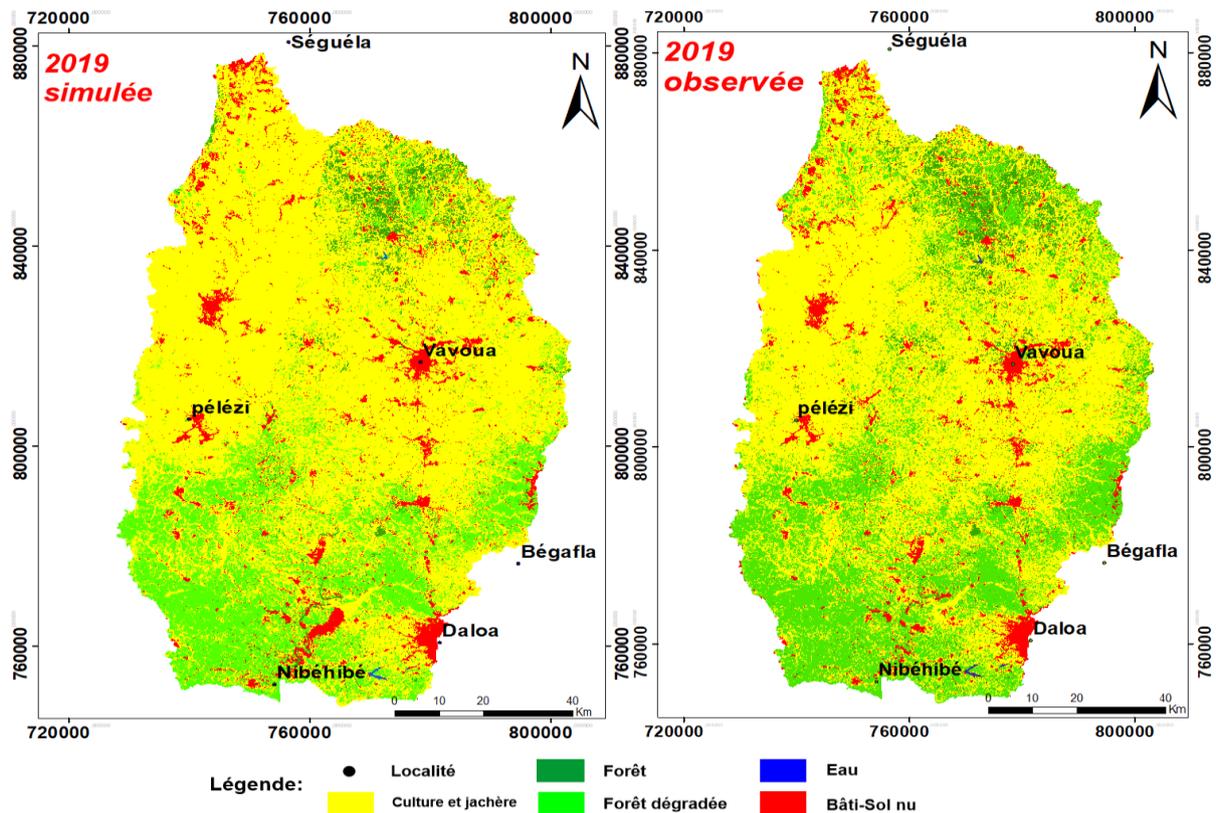


Figure 12 : Cartes d'occupation du sol simulée et observée de 2019

L'analyse comparative de l'occupation du sol simulée et celle observée de 2019 a permis d'élaborer la matrice de confusion représentée par le tableau IX.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau IX : Matrice de confusion entre l'occupation du sol observée et simulée de 2019

2019 Simulée 2019 Observée	Eaux	Forêts	Forêts dégradées	Bâtis-sols nus	Cultures et jachères
Eaux	2,299	0,01	0,05	1,23	0,81
Forêts	0,1	238,18	3,82	3,82	173,91
Forêts dégradées	0,03	54,49	1318,10	20,30	425,62
Bâtis-sols nus	0,01	0,18	0,68	511,04	46,94
Cultures et jachères	0,01	4,75	53,04	86,58	4254,15
Prédiction (%)	0,19	6,09	25,89	7,96	59,87

Précision globale : 87,11 % ; Coefficient Kappa : 0,75

Cette analyse montre que la simulation a prédit 0,19 % des surfaces en eau, 6,09 % des surfaces forestières, 25,89 % des surfaces des forêts dégradées, 7,96 % des surfaces des bâtis-sols nus et 59,87 % des surfaces des cultures et jachères.

3.1.3.2. Simulation de l'occupation du sol à l'horizon 2050

Après le calibrage du modèle et l'évaluation de sa validité, il était intéressant d'examiner la structure et la tendance du changement à une date ultérieure (2050). La prédiction de l'occupation du sol en 2050 a été faite sur la base de la transition entre les occupations du sol de 2002 et 2019. Le résultat de la prévision de l'occupation du sol pour l'année 2050 est illustré par la figure 13.

RESULTATS ET DISCUSSION

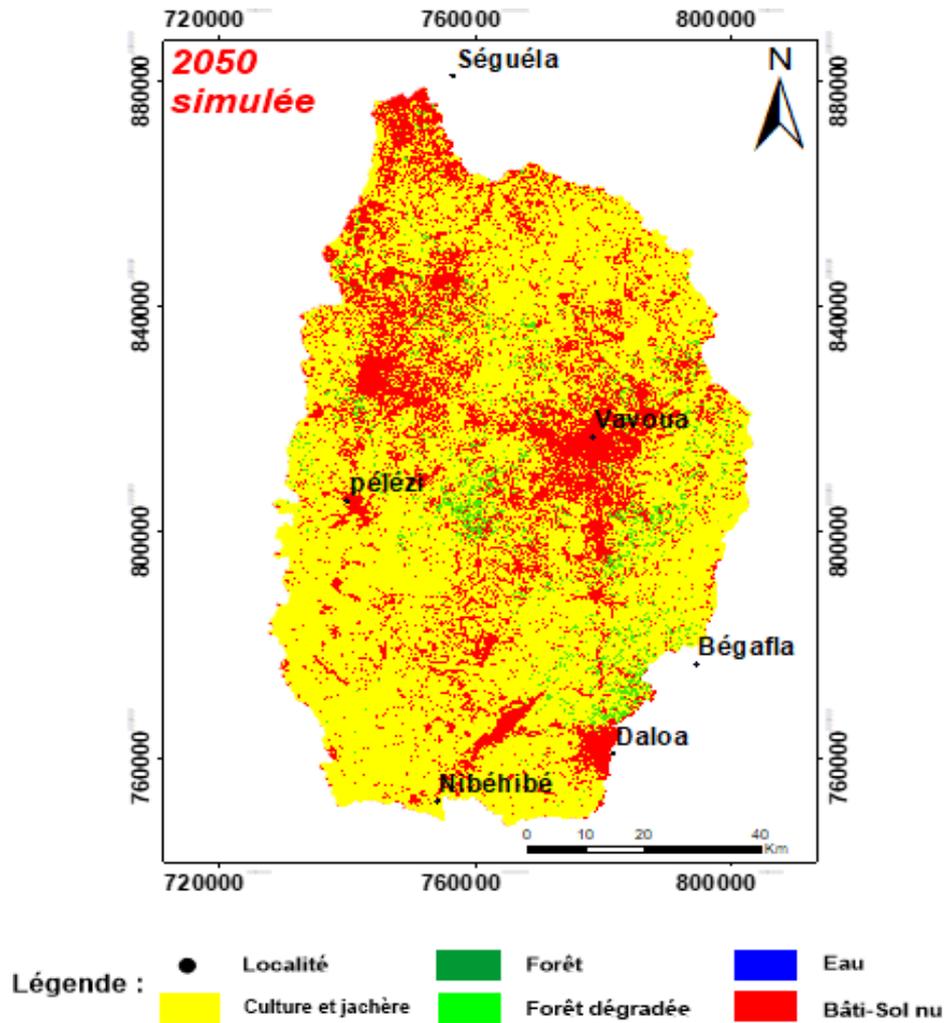


Figure 13 : Carte d'occupation du sol simulée de l'année 2050

L'analyse visuelle du résultat de cette simulation indique que les cultures et jachères et les bâtis sols nus auront un taux de croissance très élevé. Les forêts dégradées connaîtront une forte décroissance allant vers leurs disparitions. Les forêts et l'eau seront en disparitions comme l'indique la figure 14.

La simulation de l'occupation des sols indique une augmentation des zones bâtis-sols nus et des zones de cultures et jachères respectivement de 7,95 % à 30,27 % et 58,76 % à 61,50 % sur la période allant de 2019 à 2050, tandis que les eaux, les forêts et les forêts dégradées connaîtront respectivement une diminution jusqu'à 0,05 % ; 1,01 % et 7,17 % sur la même période.

RESULTATS ET DISCUSSION

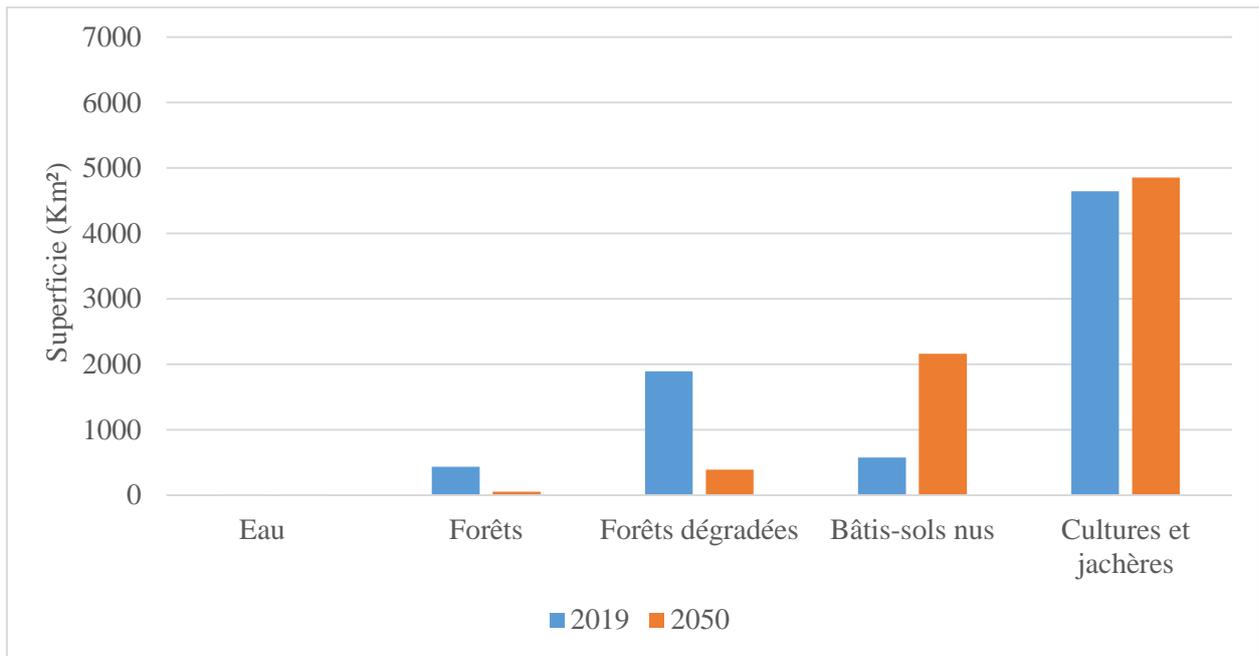


Figure 14 : Evolution des superficies des classes d'occupation du sol entre 2019 et 2050

Pour mieux comprendre cette forte augmentation des superficies des cultures et jachères, nous avons évalué la dynamique de ces cultures dans une des zones fortement dominée par les surfaces cultivées.

3.1.4. Evolution des surfaces de culture d'aubergine et de piment à Vavoua

Après analyse visuelle de la figure 11 l'évolution des cultures, la zone de Vavoua dominées par les cultures et jachère est évalué.

La figure 15 montre la dynamique de quelques cultures vivrières (aubergine et piment) pratiquées dans la zone de Vavoua sur trois(3) années (2014, 2015 et 2016). On note d'une part, au niveau de l'aubergine, sur 303,91 hectares cultivés en trois(3) ans : 21,72 % de la superficie total utilisée en 2014, de 32,90 % utilisée en 2015 et de 45,38 % utilisée en 2016. D'autre part, au niveau du piment, sur 4013,07 hectares cultivés en trois(3) ans, on a : 10,17 % de la superficie total utilisée en 2014, de 21,79 % utilisée en 2015 et de 68,04 % utilisée en 2016.

RESULTATS ET DISCUSSION

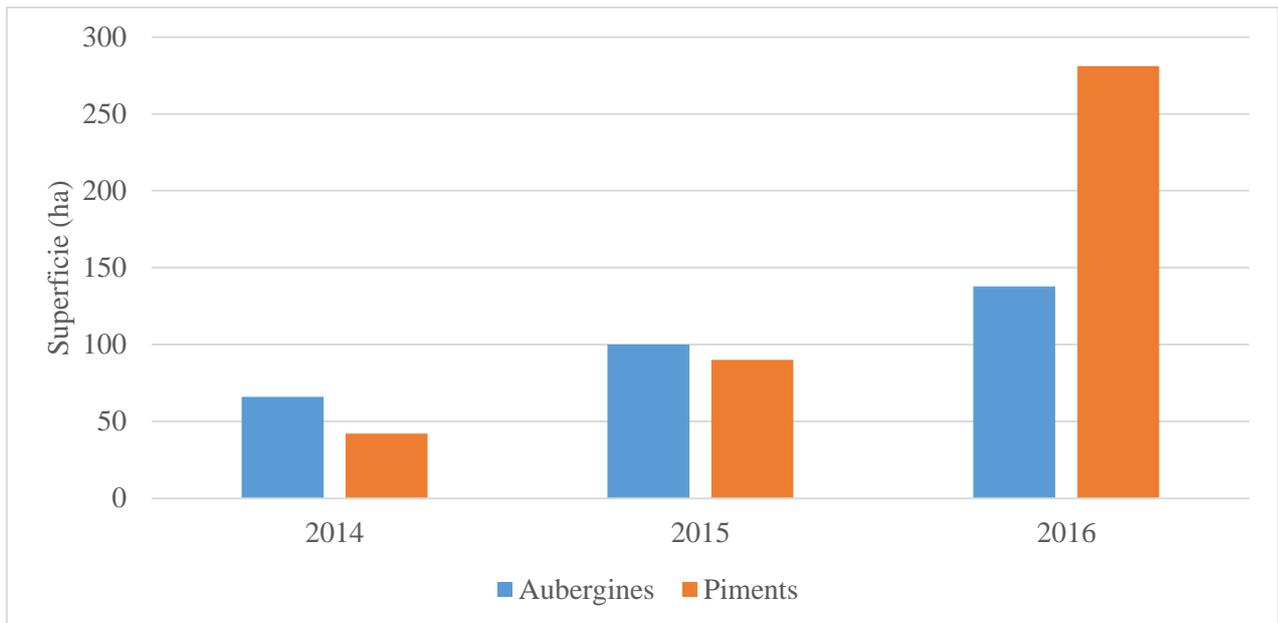


Figure 15 : Evolution des cultures vivrières d'aubergine et de piment

3.2. DISCUSSION

Les précisions globales des classifications des images du bassin versant de la rivière Lobo à Nibéhibé sont respectivement de 94,74 % pour 1986 ; 96,04 % pour 2002 et 94,10 % pour 2019. Plusieurs confusions se sont opérées lors de la classification des images. Malgré ces confusions, nous pouvons affirmer que la classification obtenue est bonne dans la mesure où une classification est jugée acceptable lorsque la précision globale avoisine 80 % (Congalton, 1991 ; Girard & Girard, 1999). Ces valeurs corroborent celles de N'Guessan *et al.* (2003) et Oszwald (2005) qui ont travaillé dans la forêt classée du haut sassandra. En effet, N'Guessan *et al.* (2003) ont obtenu des précisions cartographiques de 92,75 % et 93,25 % en classifiant respectivement des images Spot de 1988 et 2001. De même, Oszwald (2005) a obtenu une précision cartographique de 96 % avec un Kappa de 0,92 en classifiant une image Landsat TM acquise en janvier 1986. Les plus grandes confusions ont été notées, d'une part, entre les classes forêts et les classes forêts dégradées et d'autre part, entre les classes forêts dégradées et les classes cultures et jachères. Ces confusions peuvent s'expliquer par le fait que les cultures et jachères sont très hétérogènes et sont constituées de plantations d'hévéa, d'anacardiens et de cacaoyers que par des défrichements agricoles et des surfaces ayant servi aux cultures vivrières des années précédentes (jachère). Aussi, les plantations de cacaoyers sont généralement cultivées sous forêts. Ce qui peut rendre difficile la discrimination des différentes formations. Ce même constat avait été fait par N'guessan *et al.* (2003) dans l'étude sur le suivi

RESULTATS ET DISCUSSION

par télédétection spatiale d'une forêt tropicale humide protégée soumise à des pressions anthropiques au niveau de la forêt classée du Haut Sassandra en Côte d'Ivoire.

La dynamique observée dans l'occupation du sol entre 1986 et 2019 indique une diminution de la superficie forestière et une augmentation des cultures et jachères. Sur le bassin de la rivière Lobo à Nibéhibé, la pluviométrie connaît une diminution à l'instar des zones tropicales humides africaines depuis 1960 comme constatée par Lambin & Ehrlich (1997). Cette diminution pluviométrique pourrait expliquer la diminution des surfaces d'eau constatée dans la zone d'étude, qui passe de 0,63 % en 1986 à 0,29 % en 2019. L'augmentation de la superficie des forêts dégradées qui passe de 18,73% en 1986 à 26,27 % en 2019, proviendrait du déboisement des forêts. L'agriculture et les feux de brousse, pratiqués de manière anarchique dans la zone, entraînent une forte augmentation des zones de culture et jachère qui passe de 2,56 % en 1986 à 58,76 % en 2019 et contribuent largement à la réduction des surfaces forestières. La réduction des forêts sur le bassin s'explique par le fait qu'elle est détruite au profit de la mise en place des cultures tel que montré par les travaux de Kouakou *et al.* (2015). En effet, les différents peuples, allogènes et autochtones en particulier considèrent la forêt comme un lieu offrant les terres les plus propices à l'agriculture. La mise en jachère permet une reconstitution des propriétés du sol, augmentant ainsi les rendements agricoles au détriment des forêts (Oszwald, 2005). On a également une augmentation des surfaces bâtis-sols nus qui passe de 1,87 % en 1986 à 7,95 % en 2019, du fait de l'augmentation de la population (Kouassi *et al.*, 2016).

L'évaluation des données de cultures sur trois(3) années (2014, 2015 et 2016) dans la zone de Vavoua, à montrer que les surfaces cultivées augmentent chaque année. Les résultats obtenus de cette évaluation confirment ceux obtenus dans notre travail. Le fait que la zone de Vavoua soit fortement dominée par les cultures peut s'expliquer par la forte pression anthropique dans la production des cultures vivrières avec une méthode culturale extensive (N'Guessan *et al.*, 2003).

Les résultats des simulations de 2019 et 2050 montrent les mêmes tendances dans l'évolution de l'occupation du sol. Les zones bâtis-sols nus et les cultures et jachères ont augmenté considérablement au détriment des forêts.

Avant de simuler l'occupation du sol en 2050, la précision de la simulation a été testée en comparant à la fois par interprétation visuelle et l'indice de Kappa de la carte d'occupation du sol simulée de l'année 2019, à la carte de référence de la même date. L'indice de Kappa à donner 0,75. En effet, selon Pontius (2000), les valeurs de Kappa supérieures à 0,50 indiquent un bon accord entre le réel et la carte simulée ; les résultats sont bons et exploitables.

RESULTATS ET DISCUSSION

L'occupation du sol simulée de 2050 indique une tendance d'augmentation des surfaces bâtis-sols nus, cultures et jachères et une diminution des surfaces forestières. Cela induit une augmentation des terres agricoles et une perte de végétation naturelle. Cette tendance pourrait s'expliquer par les pressions anthropiques et l'augmentation de la population (Kouassi *et al*, 2016). Dans les régions à forte densité de population, tout l'espace disponible sera converti à l'agriculture dans un futur proche. Cela aboutira à un fort taux de déforestation dans ces régions et, les petites forêts seront certainement converties en terres agricoles (N'guessan *et al*, 2006). Cependant, la meilleure manière de ralentir les modifications rapides de l'occupation des sols est de proposer une méthode de gestion des feux de brousse et une intensification adaptée de la production agricole, c'est-à-dire une augmentation dans le rendement par unité de terre, accompagnée d'une planification durable de l'utilisation des sols (FAO, 2017).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le traitement des images a permis d'analyser la dynamique de l'occupation du sol entre les années 1986, 2002 et 2019 et de prédire l'état de l'occupation du sol en 2050 sur le bassin versant de la rivière Lobo à Nibéhibé.

Les résultats ont montré que le bassin versant comporte des milieux dynamiques en forte mutation. L'équilibre écologique des massifs forestiers a fortement été perturbé par les activités anthropiques. Les résultats cartographiques ont indiqué une forte diminution des superficies forestières qui passe de 76,22 % en 1986 à 6,73 % en 2019. Cette diminution des superficies forestières s'est faite au profit des cultures et jachères qui ne cessent de conquérir de nouvelles terres forestières et passe de 2,56 % en 1986 à 58,76 % en 2019. La simulation de l'occupation du sol par CA_Markov a permis de prédire l'occupation du sol pour les années 2019 et 2050 avec une précision de 87,11 %. Elle montre que les tendances actuelles de décroissance des surfaces forestières et d'expansion des cultures se poursuivront à l'avenir.

Sur la base des résultats et des limites de cette étude, des recommandations méritent d'être faites à l'endroit des gestionnaires, décideurs et organisations non gouvernementales (ONG) dans l'optique d'utiliser durablement les ressources naturelles disponibles sur le bassin versant de rivière Lobo à Nibéhibé.

En effet, nous recommandons de :

- effectuer une évaluation et une surveillance périodiques des ressources forestières à petite échelle avec l'utilisation d'images satellitaires de haute résolution spatiale ;
- sensibiliser les planteurs à la pratique de l'agroforesterie au sein des exploitations agricoles (le long des cloisonnements des champs) ;
- sensibiliser à l'utilisation des sources énergétiques solaires et gazeuses comme combustibles afin de réduire les pressions sur la ressource ligneuse aux voisinages des centres urbains.

REFERENCES

REFERENCES

- Abdus S., Xiangzheng D., Siqi J. & Dongdong C. (2017). Scenario-Based Simulation on Dynamics of Land-Use-Land-Cover Change in Punjab Province, Pakistan. *Sustainability*, 1285(9) : 1-17.
- Akognongbé A., Abdoulaye D., Vissin E.W. & Boko M. (2014). Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oueme à l'exutoire de Bétérou, Bénin. *Afrique Science*, 10(2) : 228-242.
- Avenard J.M. (1971). Aspects de la géomorphologie. In : *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*. Editions IRD, Paris : 1-70.
- Barima Y.S., Barbier N., Bamba I., Traoré D., Lejoly J. & Bogaert J. (2009). Dynamique paysagère en milieu de transition forêt-savane ivoirienne. *Bois et Forêts des Tropiques*, 299(1) : 15-25.
- Behera M.D., Borate S.N., Panda S.N., Behera P.R. & Roy P.S. (2012). Modelling and analyzing the watershed dynamics using Cellular Automata (CA) - Markov model : Ageoinformation based approach. *Earth System Sciences*, 121(4) : 1011-1024.
- CCT (1999). Notions Fondamentales de Télédétection. Ressources naturelles, Canada, 266 p.
http://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca.earthsciences/files/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_f.pdf.
- Congalton G.R. (1991). A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 46 : 35-37.
- Coquillard P. & Hill D. (1997). Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets. Masson, Paris(France), 273 p.
- Coulibaly L., Kouassi K.H., Soro G.E., & Savane I. (2016). Analyse du processus de savanisation du nord de la Côte d'Ivoire par télédétection: Cas du département de Ferkessédougou. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 17 : 136-143.
- Eastman J.R. (2006). IDRISI Andes guide to GIS and image processing. Clark University, Worcester(États-Unis), 328 p.
- 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.

REFERENCES

- 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, 152 p. <http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.htm>.
- FAO (2011). Situation des forêts du monde. Rapport principal de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie, 193 p.
- FAO (2017). Directives volontaires pour une gestion durable des sols, Rome, Italie, 27 p.
- Girard M.C. & Girard C.M. (1999). Traitement des données de télédétection. Dunod, Paris, 529 p.
- Hadjadj M.F. (2011). Apport des SIG et des images satellites pour la cartographie numérique de la forêt du Chettabah (Wilaya de Constantine) : Modélisation climatique et classification. Mémoire de fin d'études, Université El-Hadj Lakhdar Batna, Constantine, Algérie, 178 p.
- INS (1998). Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 1998. Institut National de la Statistique (INS), Abidjan, Côte d'Ivoire, 296 p. <http://www.gazetteer>.
- Koné M., Aman A., Yao A.C., Coulibaly L. & N'Guessan K.E. (2007). Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Revue Télédétection*, 7(4) : 433-446.
- Kouakou A.T.M., Barima Y.S.S., Kouakou K.A., Kouamé N.F., Bogaert J., Kouadio J.Y. (2015). Forest dynamics in the North of the Classified Forest of Haut-Sassandra during the period of armed conflicts in Ivory Coast. *Am. J. Life Sci*, 3(5) : 375-382.
- Kouassi K.H., N'go Y.A & Zro F.G.B. (2016). Dynamique spatio-temporelle des habitats naturels du site Ramsar du complexe Sassandra-Dagbego par télédétection. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 27 : 243-249.
- Koukougnon W.G. (2012). Milieu urbain et accès à l'eau potable : Cas de Daloa (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 323 p.
- Lambin E.F. & 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) : 181-200.

REFERENCES

- Maestriperi 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.
- Mas J.F., Kolb M., Houet T., Paegelow M. & Olmedo M.T.C. (2011). Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. *Géomatique et occupation des sols*, 21(3) : 405-430.
- Myint S.W. & 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'guessan E. & 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.E., Bellan M.F. & Blasco F. (2003). Suivi par télédétection spatiale d'une forêt tropicale humide protégée soumise à des pressions anthropiques. *Télédétection* 2003, 3(5) : 443-456.
- N'guessan E., Dibi N.H., Bellan M.F. & Blasco F. (2006). Pression anthropique sur une réserve forestière en Côte d'Ivoire : Apport de la télédétection. *Revue Télédétection*, 5(4) : 307-323.
- 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, France, 304 p.
- Oszwald J., Kouacou A.J.M., Kergomard C. & 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(4) : 271-282.

REFERENCES

- Paegelow M., Villa N., Cornez L., Ferraty F., Ferré L. & Sarda P. (2004). Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne. *Cybergeo* : European Journal of Geography, 20 p. <http://cybergeo.revues.org/2811>.
- Paegelow M. & Olmedo M.T.C. (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 S.D., Fauvet N., Trebuchon J.F. & 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.
- Pontius R.G. (2000). Quantification error versus location in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(8) : 1011-1016.
- Pontius R.G. (2010). Workshop Land Change Modeling Methods : calibration, validation and extrapolation. SAGEO'10 - Spatial Analysis and Geomatics, Toulouse, 3 p. http://halemse.ccsd.cnrs.fr/docs/00/35/63/42/PDF/OPDE08_MBH_FP.pdf.
- Robin M. (1995). La télédétection. Nathan, Paris, France, 318 p.
- SEP-REDD+ & FAO. (2017). Données de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire. Cartographie de la dynamique forestière de 1986 à 2015. Abidjan, Côte d'Ivoire, 76 p.
- Soares-Filho B.S., Pennachin C.L. & Cerqueira G. (2002). DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3) : 217-235.
- Tsayem D.M. (2002). Caractérisation et suivi de la déforestation en milieu tropical par télédétection application aux défrichements agricoles en Guyane française et au Brésil. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France, 243 p.
- Verburg P.H., Soepboer W., Veldkamp A., Limpiada R., Espaldon V. & Sharifah M.S.A. (2002). Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: the CLUE-S Model. *Environmental Management*, 30(3) : 391-405.
- Wiederkehr E. (2013). Apports de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques : Élaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône. Thèse de doctorat, Université de Lyon, France, 287 p.

REFERENCES

- Yao A.B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat de l'Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Yapi A.R.C. (2018). Simulation de la demande en eau du bassin de la Lobo à Nibéhibé (CentreOuest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de master en Génie de l'eau et de l'Environnement, UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon Guédé Daloa, Côte d'Ivoire, 63 p.

RESUME

A partir des images satellitaires à moyenne résolution (Landsat TM, ETM+ OLI), il est mis en évidence la dynamique spatiale de l'occupation du sol. L'objectif de cette étude est de suivre l'évolution de l'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Lobo à Nibéhibé de 1986 à 2019 et de prédire l'occupation du sol pour des dates ultérieures, afin de la gérer durablement. La méthode de l'étude s'est basée, d'une part, sur le traitement des images satellitaires, pour l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol et d'autre part, sur le modèle CA_Markov, pour la prédiction de l'occupation du sol à l'horizon 2050. Il est ressorti de cette étude que les cartes d'occupation du sol réalisées à l'issue des traitements d'images ont permis de mettre en évidence la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol sur le bassin. Pour la période de 1986 à 2019, on note une diminution des superficies des forêts, de 76,22 % en 1986 à 6,73 % en 2019 au profit des cultures et jachères, de 2,56 % en 1986 à 58,76 % en 2019. Un scénario d'occupation du sol pour les années 2019 et 2050 a été simulé avec une précision de 87,11 %. La tendance régressive des forêts semble continuer dans le futur avec les pratiques actuelles d'utilisation des terres.

Mots-clés : Image satellitaire, occupation du sol, modélisation spatio-temporelle, Lobo.

ABSTRACT

From medium resolution satellite images (Landsat TM, ETM + OLI), the spatial dynamics of land use are highlighted. The objective of this study is to follow the evolution of land use on the Lobo river watershed in Nibéhibé from 1986 to 2019 and to predict land use for future dates, in order to manage it sustainably. The study method was based, on the one hand, on the processing of satellite images, for the analysis of the dynamics of land use and on the other hand, on the CA_Markov model, for prediction of land use by 2050. It emerged from this study that the land use maps produced after image processing made it possible to highlight the spatio-temporal dynamics of land use on the basin. For the period from 1986 to 2019, there is a decrease in the area of forests, from 76.22% in 1986 to 6.73% in 2019 in favor of crops and fallows, from 2.56% in 1986 to 58.76% in 2019. A land use scenario for the years 2019 and 2050 was simulated with an accuracy of 87.11%. The regressive trend in forests seems to continue in the future with current land use practices.

Keywords: Satellite image, land use, space-time modeling, Lobo.