A solid red square located to the left of the title box.

**Analyse de la dynamique d'occupation du sol à travers
une classification d'images Landsat (1990-2007-2017)
du bassin Mouhoun Supérieur au BURKINA FASO.**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE
OPTION : RESEAU HYDRAULIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 30 juin 2018 par

Soumahila SANKANDE

Travaux dirigés par :

- M. Bouraïma KOUANDA, doctorant, Laboratoire LEAH/2iE
- Dr Dial NIANG, Enseignant Chercheur, Laboratoire LEAH/2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président :

Dr Mahamadou KOITA

Membres et correcteurs :

- M. Sina THIAM
- M. Richard SANOU

Promotion [2017/2018]



REMERCIEMENTS

Grâce au soutien de personnes physiques et morales, j'ai pu suivre avec joie la formation et élaborer le présent document. Aussi, voudrais-je dans un premier temps remercier très sincèrement :

- l'institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), particulièrement le personnel du Département Génie civil et hydraulique pour avoir conduit cette formation ;
- le Directeur général de 2iE ;
- mon directeur de mémoire, M. KOUANDA Bouraïma pour sa disponibilité, ses suggestions et autres contributions qui ont permis d'améliorer le document ;
- Dr Dial NIANG Co-encadreur de ce stage ;
- M. YONABA O. Roland pour ses multiples encouragements et contributions à la réalisation de ce document ;
- Dr Tazen FOE, pour ses conseils et encouragements ;
- le laboratoire LEAH pour avoir rendu ce travail possible, où j'ai travaillé dans un cadre particulièrement agréable ;
- tous les formateurs qui ont animé les cours.

Le plaisir est pour moi de remercier dans un second temps tous ceux qui m'ont apporté une aide précieuse à l'élaboration de ce document, il s'agit de :

- Dr TRAORE Farid ;
- M. NIKIEMA Salam ;
- M. SAWADOGO Abdoulaye SRH de la DGEP ;
- au personnel de la DGEP et de la DGRE ;
- mes amis : OUEDRAOGO Issiaka, TIENDREBEOGO Benjamin, OUEDRAOGO Raouda ;

Dans un dernier temps, je remercie :

- tous les collègues de la promotion merci pour ces moments partagés ;
- tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce document dont les noms n'ont pu être cités ;

Puisse le Dieu tout puissant vous accorder à tous et à toutes sa grâce selon l'immensité de sa bonté.



RESUME

La structure spatiale de l'utilisation des terres du Burkina Faso a été fortement impactée par l'accroissement de la population, le changement climatique et la « mondialisation » au cours des dernières décennies. Cela se traduit par de profonds changements dans l'occupation des terres et une modification notable de la végétation naturelle. Cette étude menée sur le bassin Mouhoun supérieur situé au Burkina Faso entre les latitudes 10°43'N et 14°23'N et les longitudes 02°10'W et 05°27'W vise à évaluer la dynamique d'occupation du sol à partir d'une analyse diachronique des types d'occupation du sol. Elle se base sur l'exploitation des données d'images de Landsat d'octobre 1990 (capteur TM) ; octobre 2007 (capteur ETM+) et octobre 2017 (capteur OLI). Une approche méthodologique basée sur la classification supervisée maximum de vraisemblance a conduit à l'identification des différentes classes d'occupation des sols. Les résultats obtenus indiquent que les classes d'occupation du sol en 1990 se compose comme suit : forêts (77%), savanes (9%), cultures (3%), sols nus (8%) et eau (4%). En 2007, l'occupation du sol se compose de forêts (30%), savanes (51%), cultures (9%), sols nus (5%) et eau (4%). En 2017, les types d'occupation du sol se répartissent en forêts (18.20), savanes (36%) cultures (40%) sols nus (7%) et eau (1%). De l'analyse de ses différentes valeurs, cette situation indique que la structure forestière est profondément et durablement affectée.

Mots Clés : Burkina Faso, Mouhoun Supérieur, Dynamique d'occupation du sol, images Landsat, Analyse diachronique.



ABSTRACT

The spatial pattern of land use in Burkina Faso has been strongly impacted by population growth, climate change and "globalization" in recent decades. This induces into profound changes in land use and a noticeable change in natural vegetation. This study conducted in the Upper Mouhoun Basin located in Burkina Faso between latitudes $10^{\circ} 43'N$ and $14^{\circ} 23'N$ and longitudes $02^{\circ} 10'W$ and $05^{\circ} 27'W$ aims to evaluate the dynamics of land use. from a diachronic analysis of the types of land occupation. It is based on the exploitation of Landsat image data from October 1990 (TM sensor); October 2007 (ETM + sensor) and October 2017 (OLI sensor). A methodology approach based on maximum likelihood supervised classification led to the identification of the different classes of land use. The distribution of land use classes in 1990 is divided into forests (77%), savannas (9%), crops (3%), bare soil (8%) and water (4%). In 2007, the land cover consists of forests (30%), savannas (51%), crops (9%), bare soil (5%) and water (4%). In 2017 the types of land cover are divided into forests (18%), savannas (36%) crops (40%) bare soil (7%) and water (1%). From the analysis of its different values, this situation indicates that the forest structure is deeply and permanently affected.

key words: Burkina Faso, Mouhoun Superior, Dynamics of land use, Landsat images, Diachronic analysis.



LISTE DES ABREVIATIONS

BDOT	: Base de Données de l'occupation des terres
BDOT	: Base Nationale de Données Topographiques
DGRE	: Direction générale des ressources en eau
ESPA	: Earth Science Processing Architecture
ESRI	: Environmental system research institute
FAO	: Food and agriculture organization
IGB	: Institut géographique du Burkina
LANDSAT	: Earth Observation Space Program
MS	: Mouhoun Supérieur
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
OLI	: Operational Land Imager
PNGT 2	: Programme National de Gestion des Terroirs 2
PIR	: Proche infrarouge
R	: Rouge
SAGE	: Schéma d'aménagement de gestion de l'eau
SDAGE	: Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Ressources en Eau
SIG	: Système d'Information Géographique
Sr	: Soil reflectance
TM	: Thematic Mapper
USGS	: United States Geological Survey
UTM	: Universal Tranverse Mercator



SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	I
RESUME	II
ABSTRACT.....	III
LISTE DES ABREVIATIONS	IV
SOMMAIRE.....	V
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES CARTES	IX
LISTES DES FIGURES.....	IX
INTRODUCTION.....	1
II. OBJECTIFS ET HYPOTHESE DE L'ETUDE.....	2
II.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	2
II.2. HYPOTHESES DE RECHERCHE.....	3
II.3. QUESTIONS DE RECHERCHE	3
III. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
III.1. BASE DE LA TÉLÉDÉTECTION	3
<i>III.1.1. Télédétection.....</i>	<i>3</i>
<i>III.1.2. La réflectance solaire</i>	<i>4</i>
<i>III.1.3. Landsat.....</i>	<i>4</i>
III.1.4. Capteurs Landsat.....	4
III. 1.2.2. Images Satellite	5
III.2 CONCEPT DE LA CLASSIFICATION	5
<i>III.2.1. Méthodes de Classification.....</i>	<i>5</i>
III.2.1.1. Classification non supervisée	5
III.2.1.2. Classification supervisée	6
III.2.1.2. Classification par maximum de vraisemblance	6
<i>III.2.3. Evaluation de la qualité d'une classifications</i>	<i>7</i>
III.2.3.1. Le coefficient Kappa.....	8

III.2.3.2. La précision globale de la carte	8
III.2.3. Principe de la cartographie des changements d'occupation des sols.....	8
III.2.4. Indice de télédétection	9
III.2.5. Considérations pratiques pour la cartographie thématique.....	9
III.3. DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DE L'ESPACE	10
III.3.1. Occupation des terres	10
III. 3 .2. Conséquences de l'occupation des terres	10
IV. MATERIELS ET METHODES.....	11
IV.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	11
IV.1.1. Généralités sur le complexe Mouhoun-Sourou.....	11
IV.1.2. Contexte climatique.....	12
IV.1.3. Hydrographique et régime hydrologie.....	13
IV.1.4. Caractéristiques pédologiques.....	13
IV.1.5. Caractéristiques Géologiques et Hydrogéologiques	15
IV.1.6. La végétation.....	16
IV.1.7. Occupation des Sols et Utilisation des Terres	17
IV.2. DONNEES D'ETUDES	18
IV.2.1. Images satellitaires	18
IV.2. 1.1. Critères du choix des images	18
IV.2. 1.2. Images d'étude.....	19
IV.2.2. Données Exogènes	20
IV.2.2.1. Zones d'entraînements.....	20
IV.2.2.1. Critique des zones d'entraînements	21
IV.3. OUTILS DE L'ETUDE	21
IV.3.1. Google Earth pro	21
IV.3.2. Envi 5.1	21
IV.3.2. ArcGIS 10.4.1.....	22
IV.4. MÉTHODES D'ÉTUDES	22
IV. 4.1. Prétraitements des images	22
IV. 4.1.1. Assemblage des bandes	22
IV. 4.1.1. Mosaique des scènes.....	22
IV. 4.1.2. Enregistrement image à image.....	22



IV. 4.1.3. Délimitation de la zone d'étude	22
IV. 4.1.4. Classification de la composition colorée des images	23
IV. 4.2. Traitements des images (classification maximum de vraisemblance)	25
IV. 4.2.1. Rétro ajustement des parcelles d'apprentissage	25
IV. 4.3. Post-traitements	26
IV. 4.5. Validation externe	27
V. RESULTATS.....	27
V.1. ÉTAT D'OCCUPATION DU SOL DU BASSIN COMPLEXE MOUHOUN SUPERIEUR-	27
IV.1.1. État de l'occupation du sol en octobre 1990	27
V.1.2. État de l'occupation du sol en octobre 2007.....	29
V.1.3. État de l'occupation du sol en octobre 2017.....	31
V.2. MATRICE DE CONFUSION.....	32
V.3. STATISTIQUE DES CHANGEMENTS PAR CLASSE	33
V.3.1. Conversion de l'occupation des sols entre 1990-2007.....	34
V.3.2. Conversion de l'occupation des sols entre 2007-2017.....	35
V.3.3 Conversion de l'occupation des sols entre 1990-2017.....	36
V.3.4 Taux moyen annuel d'évolution	37
VI. ANALYSES ET DISCUSSION	37
CONCLUSION	43
RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES.....	44
BLIOGRAPHIE.....	45
ANNEXES	I



LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1:CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES BANDES SPECTRALES DES CAPTEURS LANDSAT	5
TABLEAU 2:PRINCIPALES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DU BASSIN	12
TABLEAU 3:VOLUMES ANNUELS ECOULES SOURCE : SDAGE MOUHOUN.....	13
TABLEAU 4:TYPES DE SOLS ET LEURS PROPRIETES MECANIQUES	15
TABLEAU 5:CARACTERISTIQUES DES IMAGES DE L'ETUDE	19
TABLEAU 6:CARACTERISTIQUES DES DONNEES EXOGENES	20
TABLEAU 7:REPRESENTATIVITE DES ZONES D'ENTRAINEMENT.....	21
TABLEAU 8:CLASSES THEMATIQUES UTILISEES SOURCE : BDOT 2015	24
TABLEAU 9: MATRICE DE CONFUSION DE 1990/BDOT-1992	32
TABLEAU 10:MATRICE DE CONFUSION DE 2007/BDOT-2002	33
TABLEAU 11:MATRICE DE CONFUSION DE 2017/BDOT-2015	33
TABLEAU 12:MATRICE DE CONFUSION DE 2017/GOOGLE EARTH.....	33
TABLEAU 13: CONVERSIONS DES CLASSES D'OCCUPATION DES SOLS ENTRE 1990 ET 2007	34
TABLEAU 14:CONVERSIONS DES CLASSES D'OCCUPATION DES SOLS ENTRE 2007 ET 2017	35
TABLEAU 15:CONVERSIONS DES CLASSES D'OCCUPATION DES SOLS ENTRE 1990 ET 2017	36
TABLEAU 16:COMPARAISONS DES SURFACES DES UNITES D'OCCUPATION DU SOL.....	40
TABLEAU 17: COMPARAISONS CLASSIFICATION ET BDOT	41



LISTE DES CARTES

CARTE 1: CARTE DE SITUATION DU BASSIN MOUHOUN SUPERIEUR	11
CARTE 2: CARTE DE SITUATION PLUVIOMETRIQUE DE LA ZONE D'ETUDE (70-90).....	12
CARTE 3: SOL DU BASSIN MOUHOUN-SUPERIEUR	14
CARTE 4: GEOLOGIE DU SOMMAIRE DU BASSIN MOUHOUN SUPERIEUR.....	16
CARTE 5: OCCUPATIONS DES SOLS DU COMPLEXE MOUHOUN SOUROU (SOURCE : BDOT 2015).....	17
CARTE 6: OCCUPATION DES SOLS EN 1990	29
CARTE 7: OCCUPATION DES SOLS EN 2007	30
CARTE 8: OCCUPATION DES SOLS EN 2017	32
CARTE 9:DETECTION DU CHANGEMENT 1990-2007	34
CARTE 10: DETECTION DU CHANGEMENT 2007-2017	35
CARTE 11: DETECTION DU CHANGEMENT 1990-2017	36

LISTES DES FIGURES

FIGURE 1: ORGANIGRAMME DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE.....	26
FIGURE 2: OCCUPATION DU SOL EN OCTOBRE 1990	28
FIGURE 3: OCCUPATION DU SOL EN OCTOBRE 2007	30
FIGURE 4: OCCUPATION DU SOL EN OCTOBRE 2017	31
FIGURE 5:TAUX MOYEN ANNUEL D'EVOLUTION	37
FIGURE 6: ÉVOLUTION DES SURFACES D'OCCUPATION DU SOL EN %	38
FIGURE 7: COMPARAISON DES SURFACES DES UNITES D'OCCUPATION DU SOL	39
FIGURE 8: INDICE DE PLUVIOMETRIE DE BOBO DIOULASSO	40



INTRODUCTION

La problématique des changements globaux fait l'objet d'importantes préoccupations au sein de la communauté scientifique et de la société civile. Parmi les divers aspects que recouvre cette question, on a la dynamique d'occupation des sols. Le rôle déterminant des changements d'occupation et d'utilisation des sols a été démontré, tant à l'échelle globale que locale, depuis plusieurs années (Lambin et al., 2006). L'étude de l'occupation du sol est donc une entrée privilégiée dans l'évaluation des interactions entre l'Homme et son milieu. Ainsi, l'étude des changements passés des modes d'occupation et d'usages des sols est fondamentale pour comprendre les changements actuels et appréhender les changements futurs avec leurs conséquences possibles à long terme (Mas et al., 2011). Les informations issues de l'analyse de l'occupation du sol sont toujours utiles dans l'identification des stratégies appropriées pour mieux gérer l'état de l'utilisation des terres.

Le bassin complexe Mouhoun Supérieur, situé en zone soudano-sahélienne au Burkina Faso est le contexte géographique de cette étude. C'est un territoire drainé par les eaux du système composé par le Sourou et le Mouhoun supérieur. Le Mouhoun est un important affluent de la Volta, un cours d'eau transnational de la sous-région ouest-africaine qui se jette dans le golfe de Guinée. Le Sourou est un affluent du Mouhoun au niveau de son coude au nord-ouest du Burkina Faso (Kologo, 2016). La particularité de cette zone réside dans le caractère affluent-défluent du Sourou vis-à-vis du Mouhoun, la présence de nombreuses zones endoréiques sur le Sourou et la forte densité de sources d'eau dans la partie amont du Mouhoun supérieur. Le Complexe Mouhoun-Sourou concentre les aménagements hydroagricoles de la vallée du Kou, de Samendeni et du Sourou. Il constitue de ce fait, un exemple illustratif de pressions sur les ressources naturelles (Farid, 2007).

Au Burkina Faso, comme dans tous les pays en développement, la conjugaison de la pauvreté et de la croissance démographique dans les milieux fragiles a abouti à une dégradation des ressources naturelles, notamment les forêts, les sols et les eaux. Ces dernières années, ce processus s'est particulièrement accentué suite à l'exploitation irrationnelle des ressources naturelles et la mise en cultures des terres fragiles (lits mineurs et majeurs des cours) (Huong, 2009; Wellens, 2014).

Il ressort du contexte hydro agricole de cette étude que la gestion des terres et des eaux du complexe Mouhoun supérieur Sourou constitue un problème majeur en raison de la forte concurrence sur l'utilisation de la ressource eau et des terres. On y enregistre presque chaque année des inondations en saison pluvieuse avec des conséquences dramatiques telles que des pertes en vies humaines et des cultures. Aussi, enregistre-t-on paradoxalement des pénuries drastiques d'eau en saison sèche pour les périmètres irrigués.



Le changement de la dynamique générale de l'occupation des sols dans ces écosystèmes déjà fragilisés par les conditions climatiques nécessite donc des recherches approfondies garantissant une bonne connaissance des ressources en eau, non seulement, dans le court terme, mais aussi, dans le moyen et le long terme.

La télédétection spatiale par le nombre élevé de données, par l'homogénéité synoptique conférée aux informations transmises et par la répétitivité de l'acquisition de ces données trouve une place privilégiée comme un outil performant de suivi de l'occupation des terres et son évolution. Les images satellitaires sont descriptives et apportent une information visuelle très importante. En outre, l'aspect multispectral des données de télédétection offre un atout crucial dans la caractérisation des objets dans une large bande spectrale (Hoang et al., 2007; Hassen, 2008).

La présente étude vise à appliquer les produits et les principes la télédétection en vue d'acquérir une meilleure connaissance de la dynamique d'occupation des sols du Mouhoun supérieur. La compréhension de cette dynamique et de son impact sur les ressources en eau en général et sur l'hydrologie en particulier est un aspect primordial pour la prise de décision dans l'élaboration des schémas d'aménagement de gestion de l'eau.

Le présent rapport qui représente le substrat de notre investigation s'articule autour des principaux points suivants :

- une introduction qui présente le contexte, la problématique, les objectifs de l'étude et le plan du document ;
- une synthèse bibliographique ;
- la démarche méthodologique adopté et le matériel utilisé pour le travail ;
- la présentation et les discussions des résultats de l'étude ;
- une synthèse de l'étude et des propositions d'amélioration de la dynamique d'occupation des terres.

II. OBJECTIFS ET HYPOTHESE DE L'ETUDE

II.1. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif global de cette étude est de contribuer à la modélisation intégrée du complexe Mouhoun supérieur-sourou dans le contexte de changements climatiques. De façon spécifique, il s'agit à partir des images satellitaires :

- d'étudier les différentes situations intervenues entre les années 1990, 2007 et 2017 ;



- d'identifier les similitudes et les différences de l'occupation des sols ;
- d'évaluer et analyser les causes des changements.

II.2. HYPOTHÈSES DE RECHERCHE

Pour mener à bien ce travail, nous formulons l'hypothèse de travail suivante :

- la combinaison de la télédétection et des SIG permettent de dégager la dynamique d'occupation du sol à grande échelle avec des marges d'erreurs acceptables.

II.3. QUESTIONS DE RECHERCHE

La question d'ordre scientifique fondamentale à laquelle cette étude est censée répondre s'articule autour de la préoccupation suivante : est-il possible de cartographier sans une marge d'erreur importante la dynamique d'occupation du sol sur le Mouhoun supérieur en utilisant des images satellitaires libre d'accès ?

III. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

En télédétection, la classification consiste à exécuter la correspondance entre les éléments d'une scène de l'image (espace géographique) matérialisés par leurs valeurs radiométriques (espace des signatures spectrales) et les classes connues a priori ou non par un utilisateur (Regis & Claude, 2001). Une classe est un ensemble d'éléments (pixels ou objets) dont les caractéristiques ont été jugées similaires, humainement ou mathématiquement. La correspondance est réalisée à l'aide d'un « classifieur » : il s'agit d'une fonction ou de règles de décision permettant de transformer un ensemble de données appartenant en des classes. Ces classifieurs sont nombreux et variés. Les parties qui vont suivre visent à exposer les différentes méthodes existantes, leurs caractéristiques, avantages et limites.

III.1. BASE DE LA TÉLÉDÉTECTION

Cette étape de notre travail a consisté à collecter et à faire une analyse critique de la littérature existante afin de faire un état des lieux de notre problématique. Également, il s'agit ici de nous informer sur les études récentes et anciennes sur des problématiques similaires à notre étude pour bien cerner le sujet.

III.1.1. Télédétection

La télédétection est la technique, qui par l'acquisition d'images permet d'obtenir des informations sur la surface de la terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application celle-ci. Elle est habituellement définie comme la science, la technologie ou l'art d'obtenir à distance des informations sur des objets ou des phénomènes (Regis et al., 2001).



III.1.2. La réflectance solaire

La réflectance solaire, élément fondamental de notre étude, se définit comme le rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire incidente sur une surface (Energie solaire/ Energie solaire incidente). Par exemple, une réflectance de 100% signifie que la surface en question réfléchit toute l'énergie solaire dans l'atmosphère et n'en absorbe aucune fraction (Regis et al., 2001). Dans le cas de notre étude, nous utiliserons des données issues d'un traitement de niveau 2. Le traitement de niveau 2 correspond à la fourniture de réflectances de surface, accompagnées de masques de nuages et de leurs ombres, ainsi que de masques d'eau et de neige. La plupart des méthodes utilisées sont multi-temporelles et utilisent le principe suivant: pour la date à traiter et pour chaque pixel, elles comparent les mesures obtenues avec les mesures non nuageuses acquises récemment; si une variation très forte est détectée, il s'agit probablement d'un nuage ou d'une ombre, si la variation est modérée et cohérente sur un voisinage, on peut déduire l'épaisseur optique des aérosols.

III.1.3. Landsat

Le programme Landsat est le premier programme spatial d'observation de la Terre destiné à des fins civiles. Il est développé par l'agence spatiale américaine (NASA) à l'instigation de l'Institut des études géologiques américain (USGS) et du département de l'agriculture au milieu des années 1960. Huit (8) satellites Landsat ont été lancés entre 1972 et 2013. Les instruments embarqués sur les satellites Landsat ont permis de capturer plusieurs millions d'images. Celles-ci constituent des ressources uniques pour l'étude des changements climatiques, l'utilisation des sols, la cartographie, la gestion de l'habitat ; ainsi que pour de nombreuses autres applications dans les domaines de l'agriculture, la géologie, la sylviculture, l'éducation, etc.

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

Le programme Landsat a été un succès technique et scientifique.

III.1.4. Capteurs Landsat

Le capteur OLI (Operational Land Imager) de Landsat8 a été lancé le 11 février 2013. Il acquiert des images dans neuf bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge. Sept de ces bandes spectrales étaient déjà présentes sur la version précédente du capteur TM (Thématique Mapper) de Landsat 5/7. 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). La résolution optique est de 30 mètres sur toutes les bandes sauf sur la bande panchromatique (15 m). Nous présentons les caractéristiques des images en tableau 1.

Tableau 1:caractéristiques des différentes bandes spectrales des capteurs LANDSAT

<i>LANDSAT 5/7</i>			<i>LANDSAT 8</i>		
Bande spectrale	Longueur D'onde (µm)	Résolution	Bande spectrale	Longueur d'onde(µm)	Résolution
Bande 1 Bleu (B)	0.45-0.52	30 m	Bande 2 Bleu (B)	0.45-0.515	30 m
Bande 2 Vert (V)	0.52-0.6	30 m	Bande 3 Vert (V)	0.525-0.6	30 m
Bande 3 Rouge (R)	0.63-0.69	30 m	Bande 4 Rouge (R)	0.63-0.6	30 m
Bande4 Ner-Infrared (NIR)	0.76-0.9	30 m	Bande 5 Ner-Infrared (NIR)	0.845-0.885	30 m
Bande5 Ner-Infrared 1 (NIR 1)	1.55-1.75	30 m	Bande 6 Ner-Infrared 1 (NIR 1)	1.560-1.66	30 m
Bande7 mid-infrared (MID)	2.08-2.35	30 m	Bande7 mid-infrared (MID)	2.1-2.300	30 m

III. 1.2.2. Images Satellite

Une image satellitaire est une image numérique, c'est-à-dire un ensemble de valeurs, et non une photographie ; chaque valeur correspond à une réflectance, ou à une luminance, mesurée pour une unité de surface appelée pixel. Pour traduire cette image numérique en image colorée et parlante, il faut utiliser un logiciel de traitement des données.

III.2 CONCEPT DE LA CLASSIFICATION

III.2.1. Méthodes de Classification

La classification peut être définie comme étant le regroupement en groupes similaires d'un ensemble de données. Il s'agit en d'autres termes de regrouper les données ayant le plus de similarité de telle sorte que les individus similaires appartiennent à une même classe tandis que les individus différents à d'autres classes.

Il existe deux grandes familles de méthodes de classification :

- les méthodes supervisées ;
- les méthodes non supervisées.

III.2.1.1. Classification non supervisée

La classification non-supervisée porte sur un ensemble de méthodes destinées à répartir des données dans une structure plus ou moins organisée, de regrouper les données en sous-groupes de sorte à ce que les données les plus similaires soient associées au sein d'un même groupe homogène et les données considérées comme différentes soient associées dans des groupes différents. Lors de la classification non supervisée on cherche à satisfaire deux objectifs simultanément:



- une grande homogénéité de chaque classe;
- une bonne séparation des classes.

Il existe plusieurs algorithmes de classification non supervisée donnant tous des résultats plus ou moins satisfaisants selon le type de traitement souhaité.

On peut citer, entre autres Clustering hiérarchique, Clustering K-means, Clustering statistique, Clustering stochastique.

La classification non supervisée présente différentes difficultés dont les plus essentielles, à notre avis sont les suivantes :

- dans une zone de forte densité, il est naturel de reconnaître des observations regroupées comme appartenant à une même classe ; en revanche il n'est pas de même dans une zone de faible densité. La définition de frontières entre les classes peut être hasardeuse ;
- dans le cadre de la classification non supervisée le nombre de classes est inconnu à priori. Ainsi, il est difficile de définir le nombre optimal de classes ;
- le critère de validation des résultats constitue également une difficulté pour la classification non supervisée ;
- Pour certains algorithmes la forte dépendance de la phase d'initialisation constitue un véritable désavantage.

III.2.1.2. Classification supervisée

La classification supervisée porte sur une série de méthodes prédictives de classification des données. On parle de prédiction lorsqu'on veut estimer la classe à laquelle appartient une donnée à partir d'un ensemble de données déjà classées. On dispose pour ce faire d'une base de données à priori classée appelée base d'apprentissage qui servira de référent et d'un ensemble de données qu'on appellera base de test (qui contient les données à prédire). La problématique sera donc de prédire, pour chaque donnée de la base de test, la classe à laquelle elle appartiendra dans la base d'apprentissage.

III.2.1.2. Classification par maximum de vraisemblance

Le mode supervisé de classification par maximum de vraisemblance a été choisi pour réaliser la classification du milieu de la zone d'étude. C'est sans doute la méthode de classification la plus aboutie, car elle s'attache à des considérations théoriques approfondies (Regis et al., 2001).

On utilise des zones-échantillons pour déterminer les caractéristiques des classes d'objets, qui deviennent également des centres dans l'espace multispectral. L'algorithme se base sur une analyse statistique de la distribution des vecteurs spectraux de l'échantillon pour définir des zones de probabilité équivalente autour de ces centres. La probabilité d'appartenance à chacune des classes est

calculée pour chaque vecteur spectral et le vecteur est affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus élevée et l'équation s'écrit :

$$P(a/c_i) = \frac{1}{2\pi^{N/2} |\Sigma_i|^{1/2}} e^{-1/2[(a-m)^t \Sigma_i^{-1} (a-m)]}$$

où : $P(a/c_i)$ probabilité d'un pixel anonyme **a** appartienne a une classe C_i

a : vecteur pixel

m_i : vecteur du centre de classe

Σ_i : de covariance de la classe i

$(a-m)^t$ est le vecteur transposé de $(a-m)$

N : nombre de bandes spectrales ou dimension du vecteur

La méthode s'appuie sur la densité de probabilité multi normale qui constitue l'articulation majeure du processus de classification par maximum de vraisemblance. L'avantage de cette méthode est qu'elle fournit pour chaque pixel, en plus de la classe à laquelle il a été affecté, un indice de certitude lié à ce choix.

III.2.3. Evaluation de la qualité d'une classifications

L'évaluation de la qualité de la classification constitue une étape clef de notre démarche dans la mesure où elle détermine la performance de la méthode développée ainsi que la significativité des résultats obtenus. Il convient de définir précisément les termes et méthodes qui seront employés par la suite. La validation d'une classification se fait en analysant une matrice de confusion. Il s'agit de relever un minimum de points dans chacune des classes présentes sur l'image et un maximum de points au total sur l'ensemble de l'image et ensuite, de vérifier pour ces points la correspondance entre l'occupation du sol et la classe attribuée sur la carte réalisée. Les résultats de cette comparaison sont après repris dans une matrice de confusion. Les différentes classes de référence utilisées sont positionnées en colonne et les classes utilisées lors de la classification sont reprises en lignes. Cette matrice de confusion génère plusieurs indices d'évaluation.

III.2.3.1. Le coefficient Kappa

C'est l'indice le plus connu pour l'évaluation d'une classification dirigée. Il traduit la réduction de l'erreur commise lors de l'utilisation de la classification par rapport à l'erreur qui se produirait dans le cas d'une attribution aléatoire des classes, son équation s'écrit :

$$K = \frac{(T_{classés}) \cdot \sum m(i, +) \cdot m(+, i)}{T_{classés}^2 - \sum [m(i, +) \cdot m(+, i)]}$$

Ou $T_{classés}$: total des pixels classés, toute classe confondue

$m(+, i)$: valeur marginale de la colonne i (somme de la colonne)

$m(i, +)$. Valeur marginale de la ligne i (somme de la ligne)

Lorsque l'indice kappa d'une classification est compris entre 0.5 et 0.75 la carte est exploitable (Pontius et al. , 2011).

III.2.3.2. La précision globale de la carte

Une mesure globale de la précision de classification consiste à diviser le nombre de pixels, classés correctement (éléments de la diagonale dans la matrice de confusion) par le nombre de pixels contenus dans l'ensemble des zones de référence. Afin de s'assurer de la représentativité de cet indice et d'affiner ainsi cette information, il est recommandé d'examiner la précision de chaque classe prise séparément, son équation s'écrit :

$$G_0 = \frac{\sum m(i, i)}{T_{classés}}$$

Ou $T_{classés}$: total des pixels classés, toute classe confondue

$m(i, i)$: pixels de la classe i correctement classées.

III.2.3. Principe de la cartographie des changements d'occupation des sols

L'étude des changements d'occupations des sols et d'utilisation des terres est un exercice relativement difficile à mener directement sur le terrain, pour des raisons méthodologiques et des implications financières coûteuses. La télédétection permet d'acquérir un grand nombre d'informations sur de vastes surfaces et de façon continue en utilisant une variété de capteurs satellitaires et une diversité d'approches (Baatz et al., 2004).

Les approches méthodologiques, fortement liées aux types de données, connaissent aujourd'hui une évolution qui reflète la diversité et la finesse de la résolution des images utilisées (photographies aériennes et images satellitaires) ; ce qui contribue à la réalisation de nombreux projets cartographiques à des échelles variées. En effet, les outils de télédétection et de (SIG) Systèmes d'Information Géographique ont donné une impulsion remarquable au dessin de la représentation et de l'analyse des

attributs spatiaux plus connus sous l'appellation : « occupation du sol ». Les outils et les méthodes mis en œuvre, facilités par l'intégration informatique tentent d'apporter une réponse à la problématique de cartographie harmonisée de la végétation qui réside dans la conciliation de trois aspects que sont :

- l'étendue de la zone couverte ;
- le niveau de détail souhaité ;
- et la désignation des classes identifiées.

Les résultats de l'analyse spatiale essentiellement quantitatifs sont utilisés pour répondre à plusieurs objectifs de planification, d'aménagement et de gestion des ressources naturelles. Les analyses structurales et temporelles menées par télédétection permettent de décrire les changements de l'occupation des sols alors que l'utilisation des terres fait référence aux interactions entre les communautés humaines et leur milieu (Klieme et al., 2003). En d'autres termes, l'occupation des sols traduit la structure spatiale de l'espace géographique et l'utilisation des terres fait référence à la fonction de cet espace. Ainsi, une unité d'occupation des sols peut avoir donc différents types d'utilisations et plusieurs types d'occupation des sols peuvent être utilisés pour le même dessein socio-économique.

III.2.4. Indice de télédétection

En télédétection, les indices font partie des méthodes de traitement que l'on appelle les transformations multispectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeur ayant une signification dans le domaine de l'environnement. Basés sur le caractère multispectral des données satellitaires, ils permettent de décrire l'état d'un phénomène. Par exemple, Les indices de végétation sont des approches utilisés pour identifier et suivre l'évolution temporelle des couverts végétaux, ainsi que pour évaluer certains paramètres du couvert comme la biomasse aérienne chlorophyllienne, les indices de végétation sont calculés soit à partir de mesures de réflectance sur le terrain, soit de données numériques fournies par des données satellitaires (Regis, 2001).

III.2.5. Considérations pratiques pour la cartographie thématique

La cartographie thématique est un exercice délicat puisqu'elle nécessite un choix judicieux des données de base. Toute image est utile pour un type de cartographie particulière. En fonction de la finalité du travail et de l'étendue de la zone, le cartographe doit opérer un choix judicieux des images. Quatre principales étapes sont importantes à considérer :

- identification des besoins (cartographie à grande ou à petite échelle) ;
- recherche des données adaptées au type de cartographie (le type d'image détermine les possibilités de faire une carte détaillée ou non) ;



- identification de la meilleure période pour l'acquisition des images (dans les zones de savane la fin de la saison des pluies avant le début des feux de brousse, est souvent indiquée pour cette acquisition) ;
- élaboration de la méthode de cartographie adaptée aux objectifs (celle-ci est relative à l'objectif du projet).

Le choix d'un type d'image doit être un compromis entre le niveau de détail souhaité et l'étendue de la zone d'étude. (Andrieu, 2008)

III.3. DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DE L'ESPACE

Les études sur la dynamique de l'occupation de l'espace (analyse diachronique) permettent d'établir l'état de référence et l'état actuel d'une zone d'étude. L'état de référence est une situation d'une zone ou milieu donné à un moment de son évolution. Sa description vise à cerner les principales caractéristiques de la zone d'étude dans une perspective évolutive et temporelle, avant le changement. Il sert donc à décrire et à mieux comprendre les différentes composantes physiques, sociales et économiques et leurs interactions, qui caractérisent le territoire à l'étude.

III.3.1. Occupation des terres

Le concept "d'occupation des sols" fait référence, non seulement, à la surface du sol, mais aussi au sous-sol. Or, les préoccupations actuelles s'orientent à rassembler et à analyser les informations à référence spatiale donc des informations à la surface du sol. Ainsi, la terminologie "occupation de sol" a été remplacée par "**Occupation Des Terres**" afin de mieux concorder avec les préoccupations des utilisateurs.

L'étude d'occupation des terres comporte deux aspects :

- le « *Land Ecology* » qui consiste à l'inventaire et à l'analyse des données relatives à la végétation, aux sols et à l'hydrographie ;
- le « *Land Use* » qui consiste à l'inventaire, à la classification et en la représentation cartographique de l'utilisation des éléments de surface (« cover »)

III. 3 .2. Conséquences de l'occupation des terres

Les activités d'utilisation de terre, ont transformé une grande proportion de la surface de terre de la planète avec comme conséquences :

- la dégradation des conditions environnementales entraînant la perte de la biodiversité ;
- la modification des habitats ;
- la dégradation de sol et eau ;
- et la surexploitation des ressources naturelles.

IV. MATERIELS ET METHODES

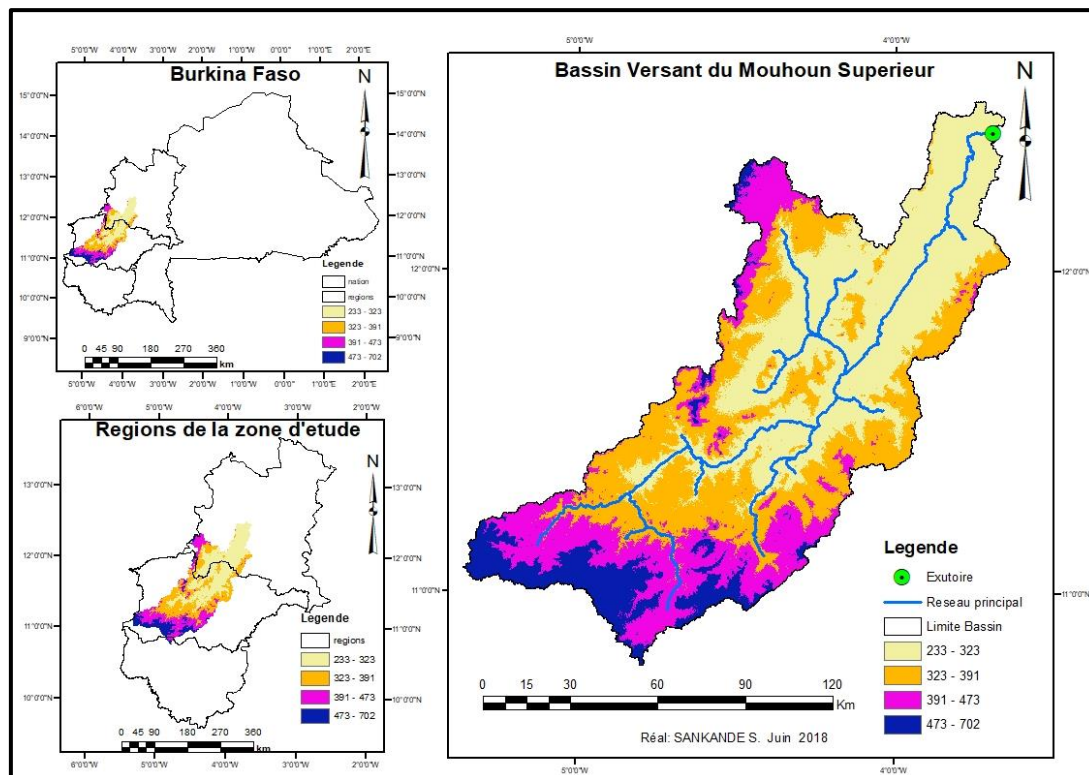
Dans cette partie, nous allons présenter d’abord la zone d’étude, ensuite les différentes données utilisées dans le cadre de ce travail et enfin, les outils et méthodologie utilisées pour mener à bien la présente étude.

IV.1. PRESENTATION DE LA ZONE D’ÉTUDE

IV.1.1. Généralités sur le complexe Mouhoun-Sourou

Le Système Mouhoun supérieur fait partie du bassin international de la Volta. Il est situé au Burkina Faso entre les latitudes 10°43’N et 14°23’N et les longitudes 02°10’W et 05°27’W. Le bassin est drainé, comme son nom l’indique, par les principaux cours d’eau que sont le Mouhoun Supérieur et le Sourou. Le Mouhoun prend sa source à environ 70 km au Sud-Ouest de Bobo Dioulasso et coule ensuite en direction du Nord jusqu’au point de jonction avec son principal affluent le Sourou aux environs de Léry. Le Sourou prend sa source en territoire malien et coule du Nord vers le Sud en direction du Burkina Faso. Le bassin s’étend sur une superficie d’environ 13 713.4 km² et un périmètre moyen de l’ordre de 1510.6 km.

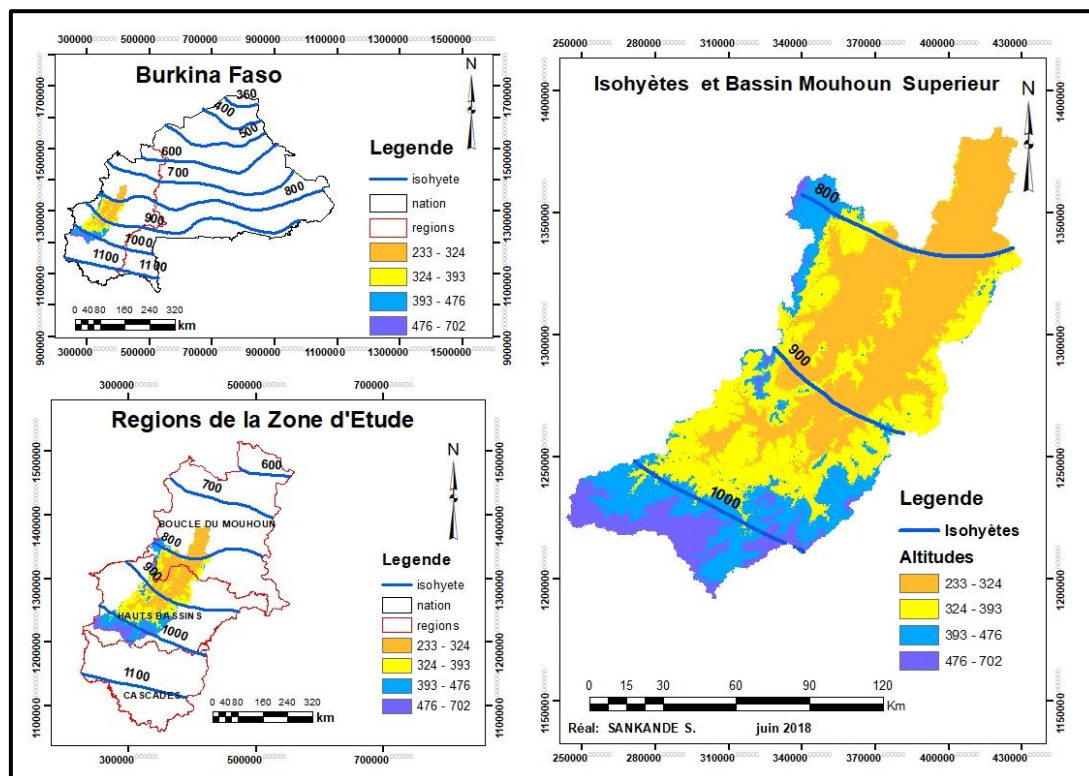
Il est situé à cheval entre les régions de la Boucle du Mouhoun (30.44%), des Hauts-bassins (68.98%) et des Cascades (0,58%) comme l’indique la carte 1.



Carte 1: Carte de situation du Bassin Mouhoun supérieur

IV.1.2. Contexte climatique

En raison de son étendue, le système Mouhoun supérieur Sourou traverse toutes les trois zones climatiques du Burkina Faso comme le montre la carte2 ci-dessous.



Carte 2: carte de situation pluviométrique de la zone d'étude (70-90)

La région de la Boucle du Mouhoun et la région des Hauts Bassins sont sous le climat nord soudanien et sud soudanien : l'extrémité nord du bassin connaît un climat du type sahélien.

Nous présentons dans le tableau 2 ci-dessous les caractéristiques climatiques du bassin.

Tableau 2: Principales caractéristiques climatiques du bassin

Type de climat	Pm(m)	Jours pluie	ETP(mm)	EV/bacA (mm)	T°C	Ampl Diurne	Ampl Saison
Sahélien	PM<600	<45/110	2200 à 2500	3200à 3500	29	21	11
Nord soudanien	600<Pm<900	50 à 70/150	1900 à 2100	2600 à 2900	28	18	8
Sud soudanien	Pm>900	85 à 100/180 à 200	1500 à 1700	1800 à 2000	27	14	5

source : SDAGE Mouhoun

La zone sahélienne au Nord dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 600 mm avec une forte évapotranspiration, des températures élevées et une saison pluvieuse courte (3 à 4 mois) est la zone la moins arrosée du pays.

La zone soudanienne occupe la portion Sud où la saison pluvieuse dure de 4 à 5 mois avec des hauteurs d'eau pouvant dépasser 1000 mm par an. Ce domaine est marqué par de faibles amplitudes thermiques.

IV.1.3. Hydrographique et régime hydrologie

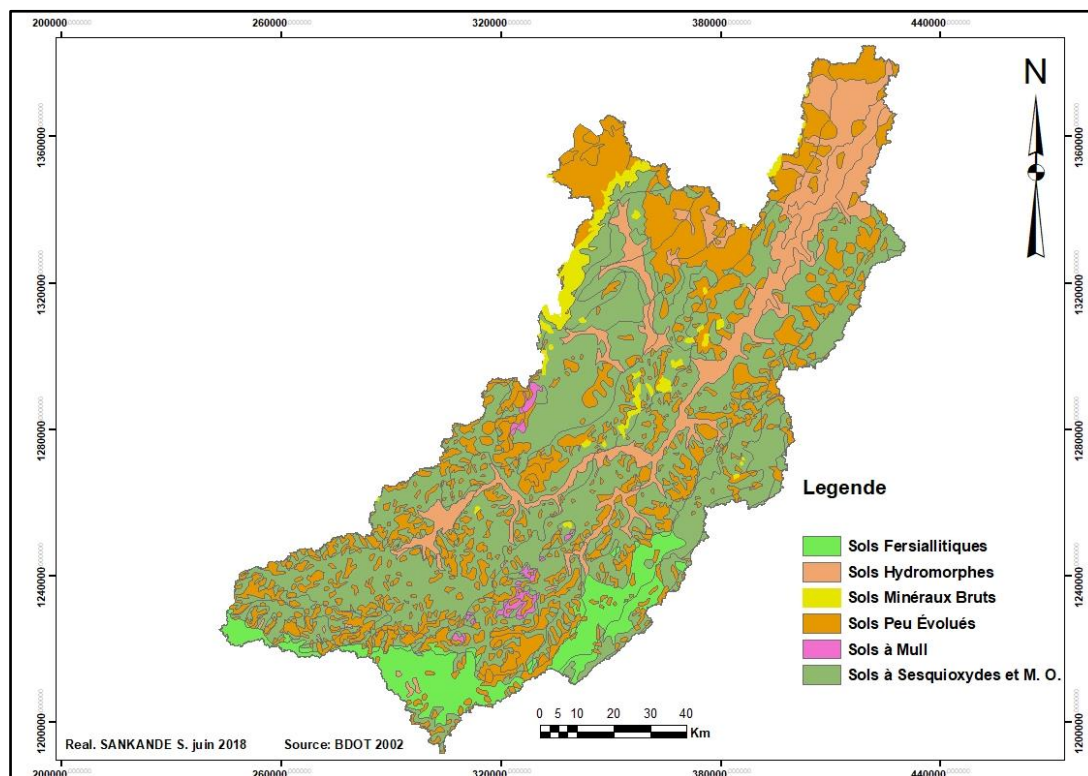
Le Mouhoun, d'une longueur totale de 1 891 km, est caractérisé par sa forme en boucle. Il prend ses sources sur les plateaux gréseux dans la région des Hauts-Bassins. Le Mouhoun coule d'abord vers le Nord-est et reçoit en rive gauche, d'amont en aval, le Plandi, le Siou et le Voun Houn. En rive droite, il reçoit le Kou au niveau de son bassin supérieur. Plus au nord, il forme une boucle et reçoit le Sourou qui jouait avant la réalisation en 1976 du barrage vanne de Léry, le rôle d'affluent – défluent. Il reprend à partir du Sourou, la direction nord-sud et rejoint, au Ghana, le cours d'eau principal de la Volta River. Ci-dessous en Tableau 3 les volumes écoulés moyen aux niveaux des principaux sous bassins.

Tableau 3: volumes annuels écoulés source : SDAGE Mouhoun

Sous bassin	Station Hydrométrique	Volume annuel écoulé (million m3/an)	Superficie bassin
Plandi	Samendeni	362	4490
Mouhoun supérieur	Nwokuy	672	15104
Sourou	Léry	-243(quitte le bassin)	2700
	Manimenso	435	19968

IV.1.4. Caractéristiques pédologiques

La pédologie du bassin versant est hétérogène et intimement liée à la diversité géologique et à la longue évolution géomorphologique (SDAGE, 2009). Le sol intervient dans le comportement hydrologique d'un bassin versant par ses propriétés mécaniques qui régissent sa perméabilité, donc, sa capacité à l'infiltration. La carte3 donne la répartition des différents types de sols rencontrés dans le bassin.



Carte 3: Sol du Bassin Mouhoun-Supérieur

Au-delà de la mise en évidence de leur aptitude pour l’agriculture, la connaissance des propriétés des sols est très importante en ce sens qu’en période de crue, les volumes écoulés et les débits de pointes seront d’autant plus importants que le bassin versant est imperméable. A l’opposé, pour un bassin versant perméable, en période de basses eaux, les débits seront d’autant plus forts que les nappes sont nombreuses et importantes. Le tableau 4 précise les propriétés mécaniques des sols rencontrés dans le bassin (Aley, 2015).

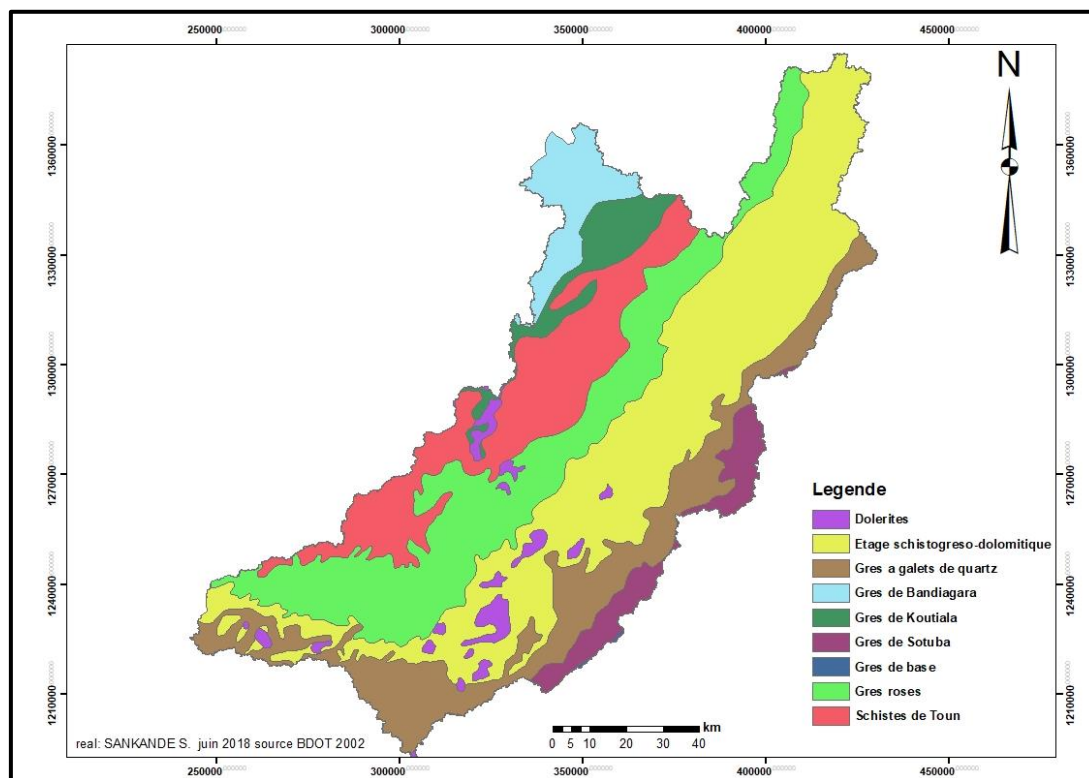
Tableau 4:Types de sols et leurs propriétés mécaniques

Types de sols	Propriétés mécaniques
Sols hydromorphes, minéraux, peu humifères à pseudogley, sur matériau alluvionnaire de texture variable souvent argileuse	Sol à mauvais drainage
Sols ferrugineux tropicaux lessivés ou appauvris, hydromorphes sur matériau sablo-argileux à argileux issus de grès associés à des sols ferrallitiques faiblement et moyennement désaturés	Bonne perméabilité, bien drainé
Sols peu évolués, d'origines non climatiques, d'érosion, sur matériau gravillonnaire, association à lithosols sur cuirasse ferrugineuse.	Indice de drainage mauvais à médiocre en surface, plus mauvais en profondeur
Sols à mull des pays tropicaux, sols bruns eutrophes, modaux sur matériau argileux issu de roches basiques, association à sols bruns eutrophes, vertiques, sur matériau remanié riche en éléments grossiers, à sols bruns eutrophes, hydromorphes et à vertisols topomorphes, grumulosiques, modaux	Le drainage externe est généralement moyen et le drainage interne moyen à médiocre. Sols à potentialité de fertilité élevée
Sols ferrallitiques, moyennement désaturés, typiques ou remaniés, sur matériau argilo-sableux issus de grès	Perméabilité bonne à élevée (supérieure à 4 cm/heure), mais présence de sols mal drainés.

IV.1.5. Caractéristiques Géologiques et Hydrogéologiques

La géologie est l'une des caractéristiques déterminantes dans le flux des eaux au sein d'un bassin versant. Le bassin du Mouhoun-Sourou comme le reste du pays se situe sur deux ensembles géologiques : la zone de socle plus dominante (69,37%) et la zone sédimentaire (19,03%). La zone sédimentaire est constituée de roches à dominance gréseuse tandis que la zone de socle se caractérise par des roches de types acides (granites) et de types basiques (schistes et dolérites) (Aley,2015) Comme

l'indique la carte 4 ci-dessous.



Carte 4: Géologie du sommaire du Bassin Mouhoun Supérieur

Du point de vue hydrogéologique, comme la géologie, le bassin abrite deux types d'aquifères : les aquifères discontinus du socle cristallin et ceux continus ou semi-continus du bassin sédimentaire. Les granites, schistes et dolérites ci-dessus notifiés dans la composition des roches du socle présentent une faible perméabilité avec des débits moyens d'environ $3\text{m}^3/\text{h}$. Dans la zone sédimentaire, le débit des forages peut atteindre entre 10 à $40\text{m}^3/\text{h}$, parfois jusqu'à $320\text{m}^3/\text{h}$ surtout dans la zone de Bobo-Dioulasso (Aley, 2015). Le programme de valorisation des ressources en eau du Sud-Ouest (2007) a estimé les réserves d'eaux souterraines de la zone sédimentaire à environ 115,41 Milliards de mètres cubes et 25,14 Milliards de mètres cubes dans le socle.

IV.1.6. La végétation

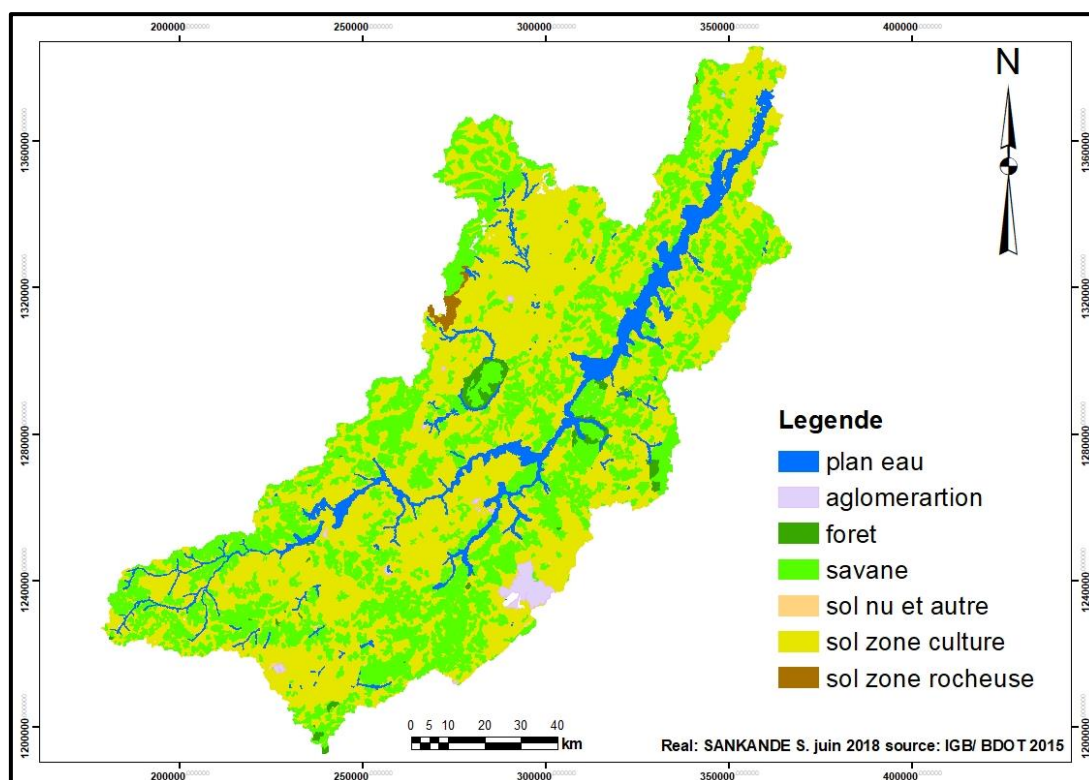
Le bassin du Mouhoun supérieur Sourou est marqué par une végétation composite, une diversité de faune et par de nombreuses zones humides. La couverture végétale du bassin est essentiellement constituée de savanes boisées, de forêts claires et de galeries forestières le long des cours d'eau permanents sa largeur augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le Sud. Au niveau du Sourou en particulier, la végétation est caractérisée par le passage de la steppe arbustive à la steppe arborée, parsemée de minces forêts claires ripicoles. C'est la zone où coexistent de nombreuses espèces sahéliennes et soudaniennes. Le tapis herbacé est dominé par *Loudetia togoensis*, *Andropogon*

ascinodis et *Pennisetum pedicellatum*. L'extrême nord du bassin (dans la région du Nord) abrite une végétation typique sahélienne faite de savane arbustive, de forêt-galerie et d'épineux.

La végétation assure de nombreuses fonctions économiques vitales aussi bien pour les humains que pour le cheptel domestique comme sauvage. Elle sert en particulier de source d'alimentation, de soins, d'abris et de lieux de reproduction pour la faune notamment aviaire et animale sauvage, mais en plus, elle joue à travers les tapis herbacés, un rôle de filtre qui réduit fortement l'érosion hydrique et éolienne tout en améliorant l'infiltration des eaux de pluie. Elle produit également une biomasse à même de contribuer au développement d'une agriculture assise sur le patrimoine naturel (SDAGE, 2009).

IV.1.7. Occupation des Sols et Utilisation des Terres

L'occupation des sols se réfère aux caractéristiques biophysiques de la surface de la Terre et peut être détectée directement à partir des images aériennes ou des satellites. L'utilisation des terres sous-entend une interaction entre l'homme et son milieu sur un territoire. L'utilisation des terres peut être déduite des images de télédétection, mais doit généralement être vérifiée sur le terrain ou par le biais de données recueillies sur le terrain. Des informations précises sur l'utilisation des terres sont essentielles pour comprendre les causes de changement de couverture végétale, élaborer des politiques et des stratégies efficaces pour ralentir et inverser les pertes de forêt. Nous présentons en carte 5, l'occupation des terres issue de la BDOT 2015.



Carte 5: occupations des sols du complexe Mouhoun Sourou (source : BDOT 2015)



IV.2. DONNÉES D'ÉTUDES

IV.2.1. Images satellitaires

Les images utilisées dans le cadre de ce travail sont des produits scientifiques LANDSAT OLI niveau 2 qui présentent un fort intérêt pour les institutions des pays en voie de développement ne disposant pas toujours de moyens suffisants à l'acquisition d'images payantes. Les produits LANDSAT OLI niveau 2 permettent également de gagner en temps sur les longs processus de correction d'images. Ce sont des données d'observations de séries chronologiques d'une longueur, d'une cohérence et d'une continuité suffisantes pour enregistrer les effets du changement climatique.

IV.2.1.1. Critères du choix des images

Le choix du type d'images satellitaires dépend de plusieurs critères et plus particulièrement de la dimension spatiale de la zone d'étude. Les images TM, ETM+ et OLI présentent l'avantage de couvrir par une seule scène (185 km x 185 km) une surface très importante. Dans notre étude quatre (4) scènes sont nécessaires pour découper la zone d'étude. Pour l'analyse de la dynamique d'occupation des sols, le choix des images s'est basé sur quatre (4) critères : (i) la saison de prise de vue, (ii) la couverture nuageuse (<10 %), (iii) les années de prise de vue et (iv) la résolution spatiale. Il faut souligner que du fait de la taille de notre bassin, des images en mode multispectral de LANDSAT, dont la résolution est de (30 m) est suffisante pour cartographier les contours des grandes unités de couverture du sol aux échelles moyennes.

IV.2. 1.2. Images d'étude

Les images satellitaires utilisées pour la cartographie de la dynamique d'occupation du sol du bassin Mouhoun supérieur- Sourou de 1990 à 2017 sont des images multispectral Landsat (TM, ETM+, OLI) de niveau 2. L'acquisition de quatre (4) scènes par date est nécessaire pour notre zone d'étude soit douze (12) scènes. En outre, pour notre zone d'étude, les images ne sont pas acquises le même jour. Les scènes sont décalées deux à deux de sept (7) jours calendaires. Nous présentons en tableau 5 la synthèse des données utilisées dans ce travail.

Tableau 5:Caractéristiques des images de l'étude

Année	Date d'acquisition	Path/Row	Capteur	Bande spectrale	
				Couverture nuageuse (%)	Résolution Spatial
1990	03/10/1990	196/51	TM	0.00	30 m
	03/10/1990	196/52	TM	0.00	30 m
	10/10/1990	197/51	TM	1.00	30 m
	10/10/1990	197/52	TM	0.00	30 m
2007	26/10/2007	197/52	ETM+	6.00	30 m
	26/10/2007	196/51	ETM+	0.00	30 m
	17/10/2007	196/52	ETM+	0.00	30 m
	17/10/2007	197/51	ETM+	1.00	30 m
2017	20/10/2017	197/52	OLI	0.80	30 m
	20/10/2017	197/51	OLI	0.00	30 m
	13/10/2017	196/52	OLI	5.85	30 m
	13/10/2017	196/51	OLI	9.18	30 m

IV.2.2. Données Exogènes

La détection des différentes catégories d'occupation du sol à partir des seules images satellites reste difficile, c'est pourquoi il est nécessaire de s'appuyer sur des données terrain (SARR, 2009). Compte de la taille de notre zone d'études et des difficultés pour mener une campagne exhaustive. Nous nous sommes appuyés sur des données existant consignées dans le tableau 6.

Tableau 6:Caractéristiques des données exogènes

N ^o	Données	Source	Format
1	modèle numérique de terrain (MNT)	NASA	numérique (raster)
2	base de données retenues d'eau	DGRE	numérique
3	évaluation des ressources forestières mondiales (2010)	Ministère de l'environnement Burkina Faso	numérique
4	documents et données SDAGE Mouhoun	Agence de l'eau du Mouhoun (AEM)	numérique
5	base nationale de données topographiques (BDOT 1992)	IGB	numérique
6	base nationale de données topographiques (BDOT 2002)	IGB	Numérique
7	Base de Données de l'occupation des terres BDOT 2015	IGB	Numérique
8	Images hautes résolutions google earth.	Google earth.	numérique

Nous avons, également eu recours aux différentes données terrains utilisés dans le projet de thèse. Les données ainsi obtenues devraient permettre d'aider à la compréhension des données satellitaires, puis de points de vérité terrain pour la validation de la classification.

IV.2.2.1. Zones d'entraînements

On procède par échantillonnage. Il s'agit de sélectionner un minimum de pixels spectralement représentatif de chaque signature spectrale identifiée. Ces échantillons, une ou plusieurs zones réputées être occupées par une catégorie thématique connue ou « aires d'entraînement » serviront à la « calibration » de votre classification. On demande à l'algorithme d'extraire la distribution des luminances dans chaque bande. Cette information constitue la signature spectrale de l'échantillon.

IV.2.2.1. Critique des zones d'entraînements

Lors de la création des zones d'entraînements pour une classification supervisée, il est important d'étudier la séparabilité ou le pouvoir discriminant des classes identifiées. Ce qui donne une idée de la possibilité de distinguer ces classes et donc de produire une classification précise. Deux indices de séparabilités sont calculés dans ENVI, il s'agit des indices de « Jeffries-matusita » et « transformed divergence ». La valeur de ces indices varie entre [0 – 2]. Une grande valeur indique une très bonne séparation entre deux classes données. Nous présentons en tableau 7 l'échantillonnage utilisé dans le cadre du présent travail.

Tableau 7:représentativité des zones d'entrainement

1990		2007		2017	
pourcentage /image total		pourcentage /image total		pourcentage /image total	
Eau	0.02%	Eau	0.03%	Eau	0.02%
Foret	0.06%	Foret	0.06%	Foret	0.05%
savane	0.06%	savane	0.06%	savane	0.06%
culture	0.07%	culture	0.07%	culture	0.07%
sol nu	0.02%	sol nu	0.02%	sol nu	0.02%
Total entrainement	0.23%	Total entrainement	0.23%	Total entrainement	0.23%
Total image	100.00%	Total image	100.00%	Total image	100.00%

IV.3. OUTILS DE L'ÉTUDE

L'utilisation d'un certain nombre d'outils a été nécessaire pour l'accomplissement de notre travail. Il s'agit entre autres : Google earth, Envi ArcGIS, Word, Excel, global mapper. Dans cette partie nous vous présentons les principaux outils.

IV.3.1. Google Earth pro

Le logiciel Google Earth est un logiciel qui permet une visualisation de la Terre (et d'autres astres) avec un assemblage de photographies aériennes ou satellitaires. Ce logiciel permet à tout utilisateur de survoler la Terre et de zoomer sur un lieu de son choix. Nous l'utilisons pour visualiser, valider ou infirmer les classes que nous avons établies.

IV.3.2. Envi 5.1

Le logiciel ENVI est un logiciel utilisé par les scientifiques, chercheurs et spécialistes de l'analyse d'images ou des SIG pour traiter et analyser les images géospatiales. Le logiciel propose une approche guidée et automatisée qui permet aux utilisateurs de réaliser simplement les tâches complexes. Nous l'utilisons pour :

- la réalisation de l'assemblages des bandes ;
- la création de mosaïques des scènes;



- la classification.

IV.3.2. ArcGIS 10.4.1

Le logiciel **ArcGIS** est une suite de **logiciels** d'information géographique (ou **logiciels SIG**) développés par la société américaine **ESRI** (Environmental System Research Institute, Inc.).

Nous l'utilisons pour :

- la création, l'habillage et l'édition des cartes ;
- la détection de changement entre les différentes images satellitaires ;
- découpage de la zone d'étude.

IV.4. MÉTHODES D'ÉTUDES

IV. 4.1. Prétraitements des images

Nous n'avons pas eu recours ici à des corrections atmosphériques difficiles à mettre en œuvre en l'absence de données sur l'état de l'atmosphère (Sar, 2009). Nous avons utilisé les données de Réflectance de surface (SR) niveau 2 téléchargées gratuitement sur le site ESPA « Earth Science Proccession Architecture ». Ce sont des produits de haut niveau générés par un logiciel spécialisé développé à l'origine par la NASA.

IV. 4.1.1. Assemblage des bandes

L'assemblage des bandes consiste à utiliser le logiciel ENVI pour constituer un fichier unique qui sauvegarde toutes les bandes d'une scène en une seule image.

IV. 4.1.1. Mosaïque des scènes

La mosaïque des scènes consiste à combiner les différentes scènes en vue de constituer une entité unique ou on peut découper notre zone d'étude.

IV. 4.1.2. Enregistrement image à image

Compte tenu du fait que nous utilisons des images issues de capteurs différents (TM, ETM+, OLI) et des dates différentes ; l'enregistrement temporel est une option développée dans le logiciel ENVI qui permet de mettre les images sur la même base de comparaison. Il est utilisé pour la détection des changements et l'observation des ressources terrestres, y compris la surveillance des changements de la couverture terrestre et des caractéristiques agricoles et géologiques extraites des images sur une période.

IV. 4.1.3. Délimitation de la zone d'étude

Le mosaïquage des scènes étant fait, la délimitation de la zone d'étude consiste à découper la zone dans l'assemblage des images à l'aide du logiciel ArcGIS.







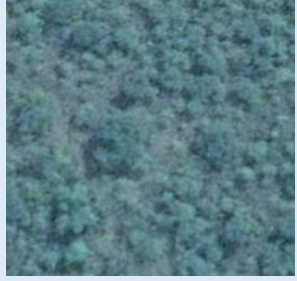
IV. 4.1.4. Classification de la composition colorée des images

Les compositions colorées permettent de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets. Elles sont fréquemment utilisées pour faire ressortir les différents types de surface sur les images multispectrales ou mettre en évidence certains phénomènes environnementaux, comme les feux de forêts, les vents de sable, les glaces de mer, etc. Le principe des compositions colorées consiste à affecter aux trois couleurs primaires (rouge, vert, bleue) trois images acquises au-dessus d'une même région, au même moment, mais dans des longueurs d'onde différentes. d'une manière générale, sur une composition colorée, les sols nus apparaissent dans des teintes bleues claires, l'eau dans une teinte bleue foncée ou pratiquement noire, la végétation herbacée en rouge foncée et les résineux dans des teintes rouges-noires. Il est important de signaler que ces remarques sont données à titre indicatif. Différents facteurs en particulier l'état d'humidité de sol et le tapis herbacé en forets peuvent être à l'origine d'une forte modification de la réflectance du pixel.(Regis , 2001)

IV. 4.1.5. Définition des classes thématiques

La définition des classes thématiques constitue une étape préalable à la phase de classification. Cette définition s'est faite sur la base des classes obtenues sur la base de la BDOT 2015 et sur la base d'observation des compositions colorées et de la méthode iso data. Les classes ont été définies de sorte à être, à la fois, bien discriminées entre elles et communes à toutes les images de notre période d'étude. Nous présentons en tableau 8 classes thématiques utilisées.

Tableau 8: classes thématiques utilisées source : BDOT 2015

Classe thématiques	Groupes	Description	Exemple
Plan D'eau	Eau	Retenues d'eau, marres, rivières barrages, bouli etc.	
Sols nus	Sols nus	Il s'agit en général de zone où aucun type de végétation, même saisonnière, n'a été identifié. Ces zones peuvent éventuellement comporter de l'habitat.	
Zone de cultures	Milieu agricole	Surface de culture permanente : culture hors assolement qui fournit des récoltes régulières et qui occupe des terres pendant une longue période. Surface de culture annuelle : surface cultivée, régulièrement labourée et généralement incluse dans un assolement. Zone agricole hétérogène.	
Zone de savane et/ou jachères	Milieu de savane	Formation herbeuse comportant une strate graminéenne continue d'au moins 80 cm de hauteur, avec présence d'arbre.	
Zone de forêt	Milieu de forêt	Formation végétale fermée principalement constituée par des arbres, mais aussi par des buissons, des arbustes et essences lianescentes pour les strates inférieures. Comprend aussi bien les forêts claires que les forêts sèches	

IV. 4.1.6. Définitions des sites d'entraînement

Les classifications supervisées s'appuient sur la prise en compte de zones témoins, connues, identifiées appelées parcelles d'échantillonnage ou parcelles d'entraînement qui serviront à classer l'ensemble de l'image. La validité d'une classification dépend en grande partie de la qualité de l'échantillonnage d'origine. Cette qualité dépend de la taille de la parcelle (nombre de points), de sa situation (au centre, en périphérie, en dehors.) par rapport à l'objet étudié, de la nature de l'objet (pixels purs, mixtes).

Méthode d'échantillonnage:

- choix de la zone et/ou du type d'objet ;
- définition du polygone d'échantillonnage;
- vérification de la qualité de l'échantillon au regard du nombre de pixels, des valeurs statistiques (moyennes, écart-types.), de la signature spectrale de l'échantillon dans les différents canaux sélectionnés...
- rejet ou sauvegarde de l'échantillon
- nouvel échantillon dans le même type d'objet et/ou dans un nouveau type. Il est indispensable de réaliser plusieurs échantillons sur le même type d'objet et d'échantillonner tous les types d'objets.

Pour pouvoir réaliser un bon échantillonnage, il faut :

- Avoir une idée relativement précise des objets et de leur répartition dans l'image ;
- Tenir compte des canaux les plus caractéristiques définissant l'image (même s'ils n'ont pas servi à la visualisation) ;
- Multiplier au maximum les échantillons de départ et procéder par élimination ;
- Etudier les valeurs statistiques obtenues et en particulier les profils spectraux ;
- Procéder à différentes échelles depuis les grandes composantes jusqu'aux objets ponctuels.

En d'autres termes : une bonne classification s'appuie sur un bon échantillonnage, et un bon échantillonnage s'appuie sur une bonne étude préalable de l'image via les histogrammes, les composantes statistiques et les documents disponibles.

IV. 4.2. Traitements des images (classification maximum de vraisemblance)

Le traitement d'images est l'étape la plus importante. Elle consiste à appliquer l'algorithme maximum de vraisemblance à l'image ayant subi l'étape du prétraitement.

IV. 4.2.1. Rétro ajustement des parcelles d'apprentissage

L'étape de retro-ajustement des parcelles d'apprentissages est très importante. En effet, elle souligne le processus itératif de la méthode. Une fois le modèle calibré et la carte intermédiaire produite, on

réalise des ajustements des parcelles d'apprentissage pour réduire les erreurs géographiques et les confusions entre les classes.

IV. 4.3. Post-traitements

Les résultats bruts obtenus par application du modèle sur des données satellitaires produisent une carte qui peut sembler bruitée du fait du changement de modes d'usages des terres d'un pixel à l'autre. Le filtrage post classification permet de nettoyer l'image de classification brute, la faire correspondre aux exigences d'unité minimale de cartographie.

IV. 4.4. Organigramme de la démarche méthodologique

La marche à suivre pour procéder à une classification dirigée comporte 10 étapes (Regis & Claude, 2001). Nous synthétisons les étapes à travers notre méthodologie à travers l'organigramme en figure 1 .

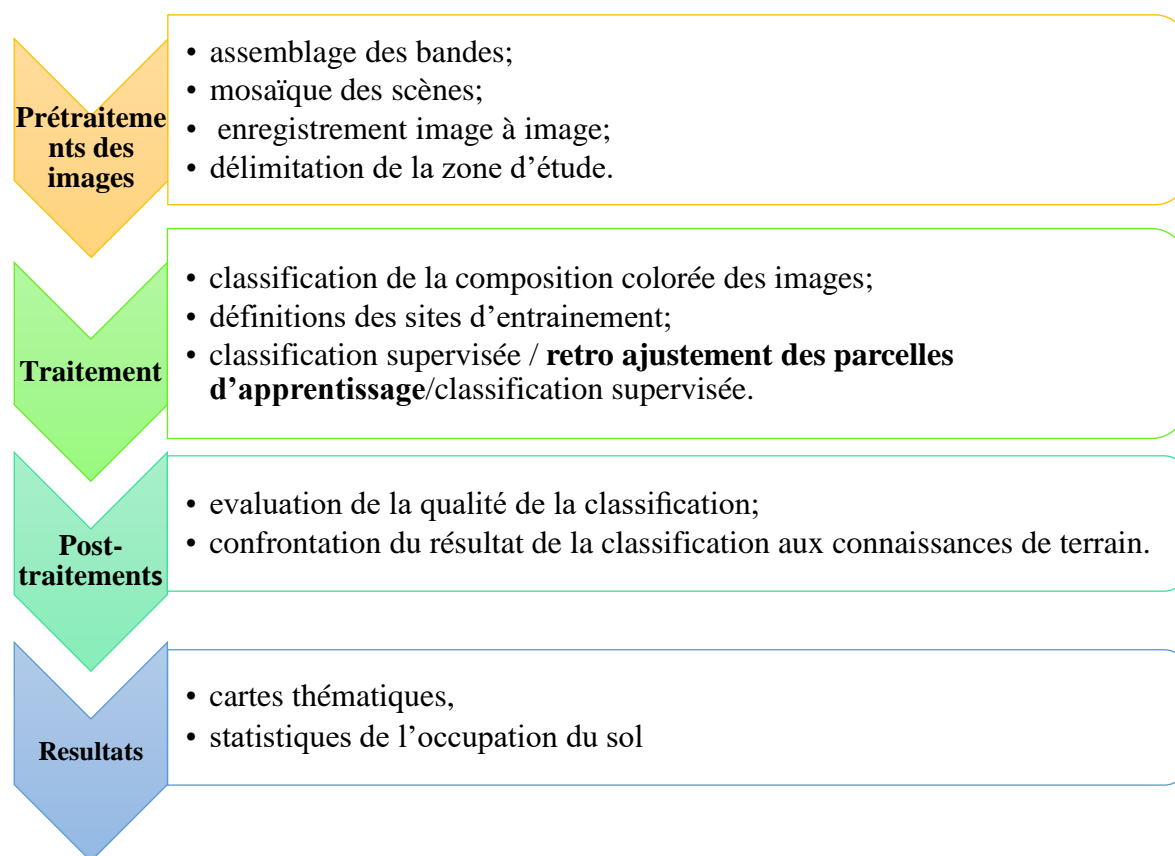


Figure 1: Organigramme de la démarche méthodologique



IV. 4.5. Validation externe

Cette étape consiste en une confrontation statistique du résultat de classification avec les résultats de la mission de validation terrain et l'observation d'images satellitaires. Selon Benkrid (2008), l'utilisation des supports cartographiques engendre des informations incertaines qui ne peuvent être levées que par des observations de terrain. La pertinence et la précision des classifications ont été évaluées à l'aide des matrices de confusion entre les données de vérité-terrain et celles des traitements des images satellitaires, par le calcul d'un certain nombre d'indices à partir de la matrice de confusion. Selon (Tilahun et al., 2015) l'évaluation de la précision de la classification de la couverture peut être faite avec Google Earth donne un kappa et une précision appréciable. En considérant les résultats des ingénieurs-conseils utilisant l'imagerie dérivée de Google Earth. Les cartes produites sont d'une grande précision (Ghorbani et al., 2013).

V. RESULTATS

V.1. ÉTAT D'OCCUPATION DU SOL DU BASSIN COMPLEXE MOUHOUN SUPÉRIEUR-

Au total, cinq (5) unités d'occupation des terres sont mise en évidence. La classification durant les trois années : 1990;2007;2017 a permis en outre d'évaluer l'évolution spatio-temporelle des changements de l'occupation du sol de la zone d'étude. Nous présentons les résultats année par année.

IV.1.1. État de l'occupation du sol en octobre 1990

A la date d'octobre 1990, l'occupation du sol est dominée par les formations type forestières de près de 77 % comme le montre la figure 2 ci-dessous. On a les savanes à 9 %, les cultures à 3 %, les sols nus à 8% et les plans d'eau à 3%.

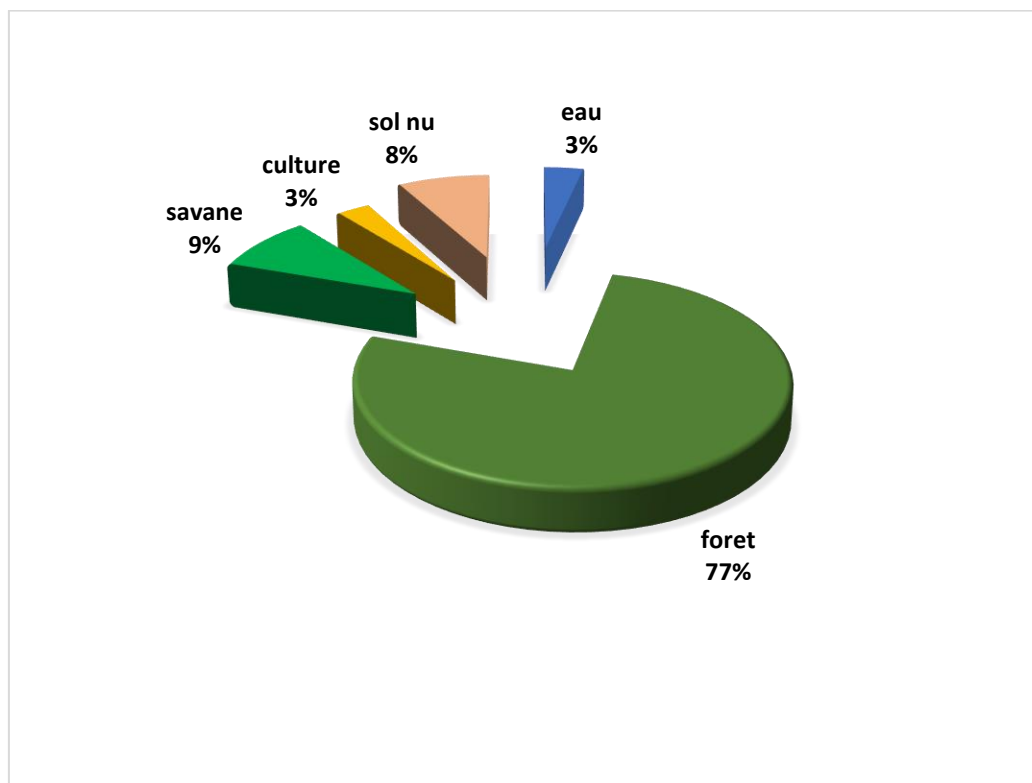
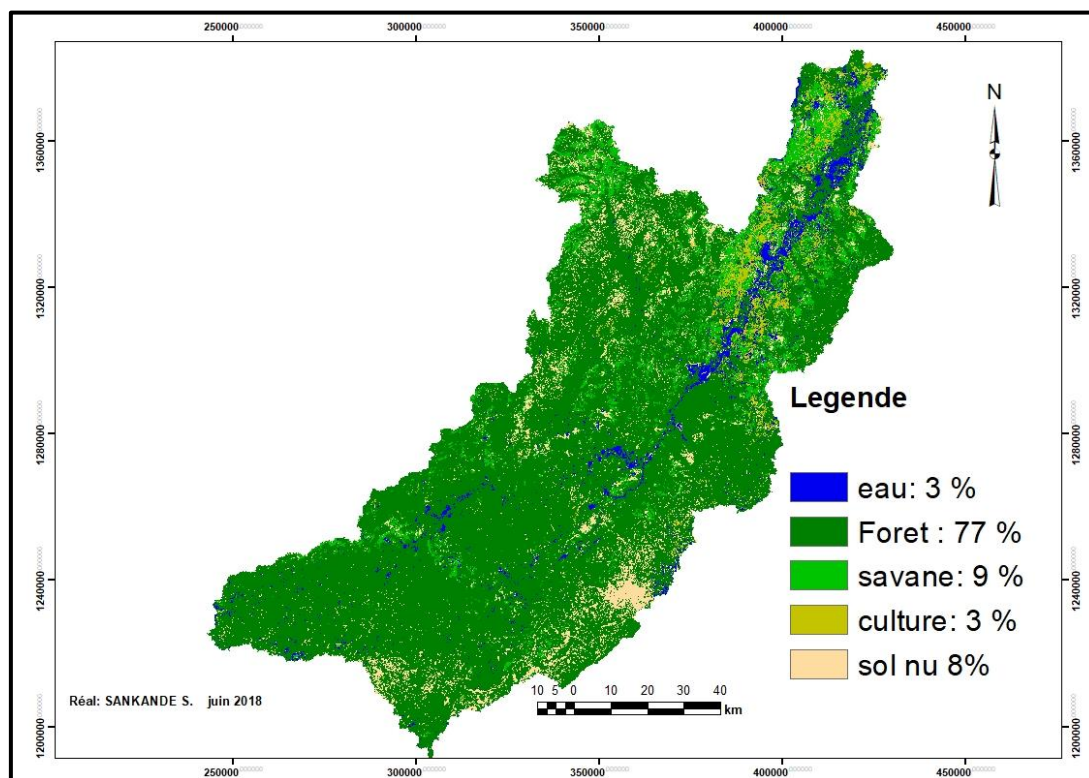


Figure 2: occupation du sol en octobre 1990

Au total, les thèmes d'occupation du sol se répartissent comme suit :

- les plans d'eau couvrent une superficie de 473.82 km² soit de 3 % de la région d'étude ;
- les forêts occupent près de 10533.40 km² soit 77 % de la zone d'étude ;
- les cultures s'étalent sur 391.58km² soit 3 % de la zone d'étude ;
- les savanes occupent 1206.32 km² soit 9% de la zone d'étude ;
- les sols nus couvrent 1098.87 km² soit 8% de la zone d'étude.

Nous présentons sur la carte 6 l'occupation du sol sur le bassin versant en 1990.



Carte 6: occupation des sols en 1990

V.1.2. État de l'occupation du sol en octobre 2007

En ce qui concerne l'occupation du sol en 2007, la figure 3 montre une augmentation des formations type savanes au détriment des forêts, une légère augmentation des plans d'eau et une diminution des forêts. L'occupation du sol se répartit comme suit :

- les plans d'eau couvrent une superficie de 605.57 km² soit de 4 % de la région d'étude ;
- les savanes occupent près de 7065.66 km² soit 52% de la zone d'étude ;
- les cultures s'étalent sur 1238.73km² soit 9 % de la zone d'étude ;
- les forêts occupent 4159.13 km² soit 30 % de la zone d'étude ;
- les sols nus couvrent 638.85 km² soit 5 % de la zone d'étude.

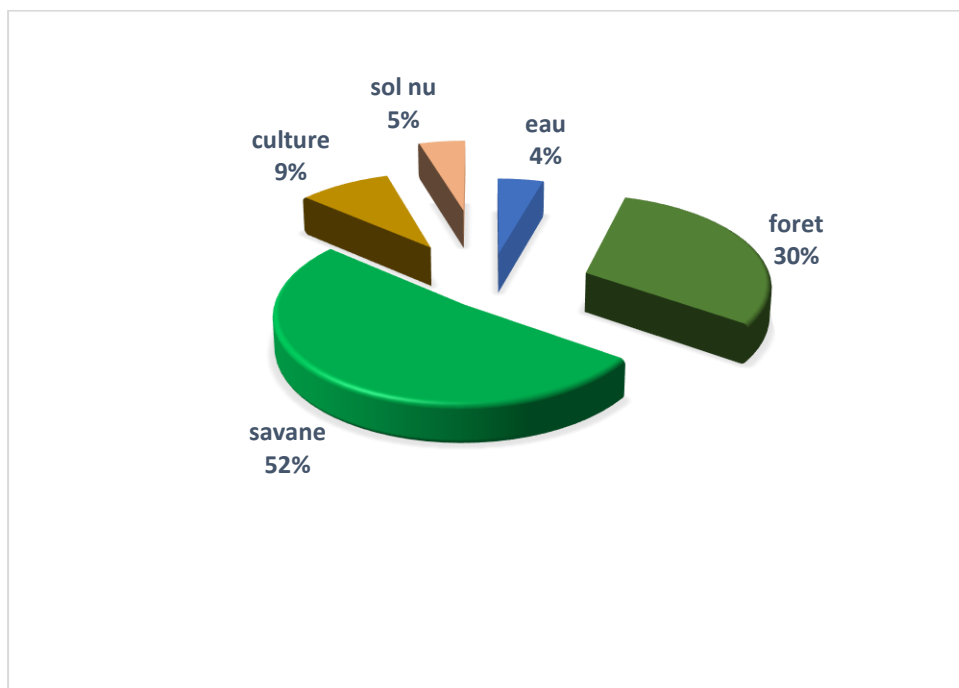
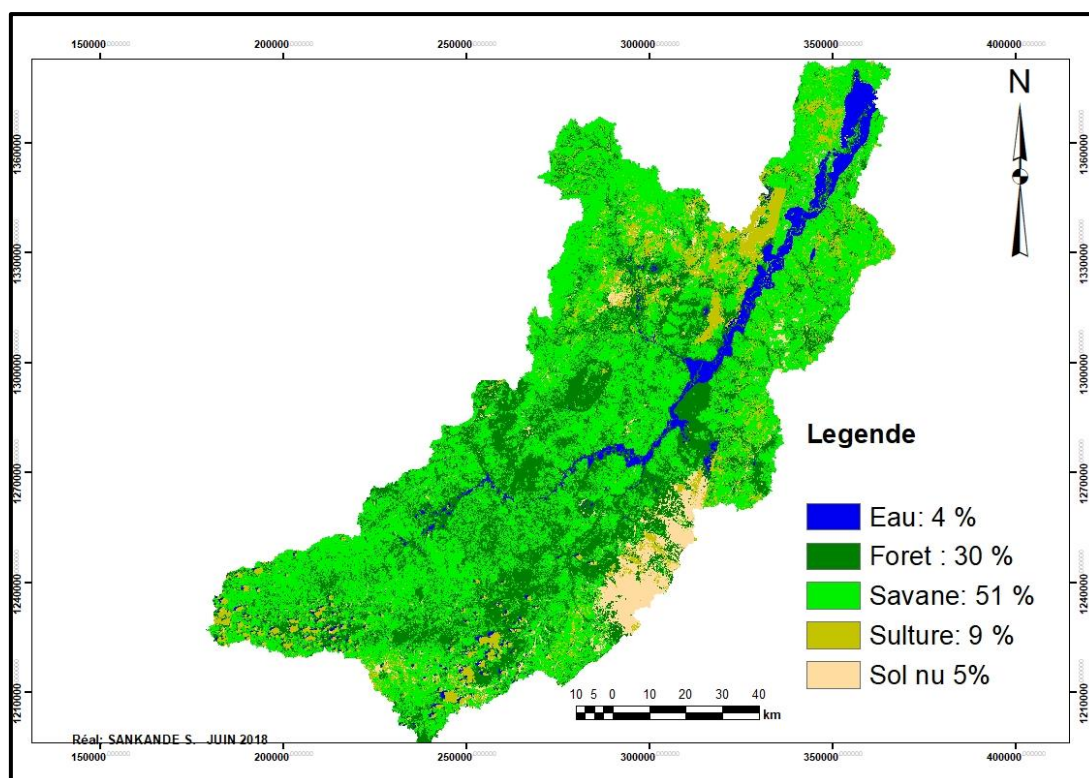


Figure 3: occupation du sol en octobre 2007

Nous présentons sur la carte 7 une vue spatiale de l'occupation du sol sur le bassin versant en 2007.



Carte 7: occupation des sols en 2007

V.1.3. État de l'occupation du sol en octobre 2017

Pour l'année 2017, la figure 4 et carte 8 montre la distribution des grands ensembles dans la zone d'étude. Les savanes prédominent dans la zone d'étude. Ainsi, les thématiques sont réparties comme suit :

- les plans d'eau couvrent une superficie de 150.65 km² soit de 1 % de la région d'étude ;
- les forêts occupent près de 2496.17 km² soit 18 % de la zone d'étude ;
- les cultures s'étalent sur 5537.23 km² soit 40% de la zone d'étude ;
- les savanes occupent 4598.19 km² soit 34 % de la zone d'étude ;
- les sols nus couvrent 925.29 km² soit 7 % de la zone d'étude.

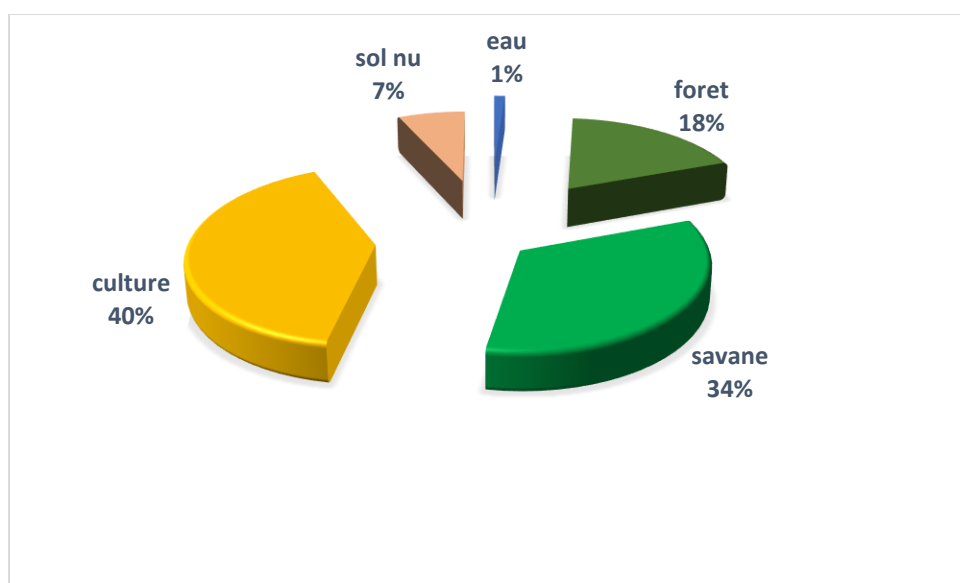
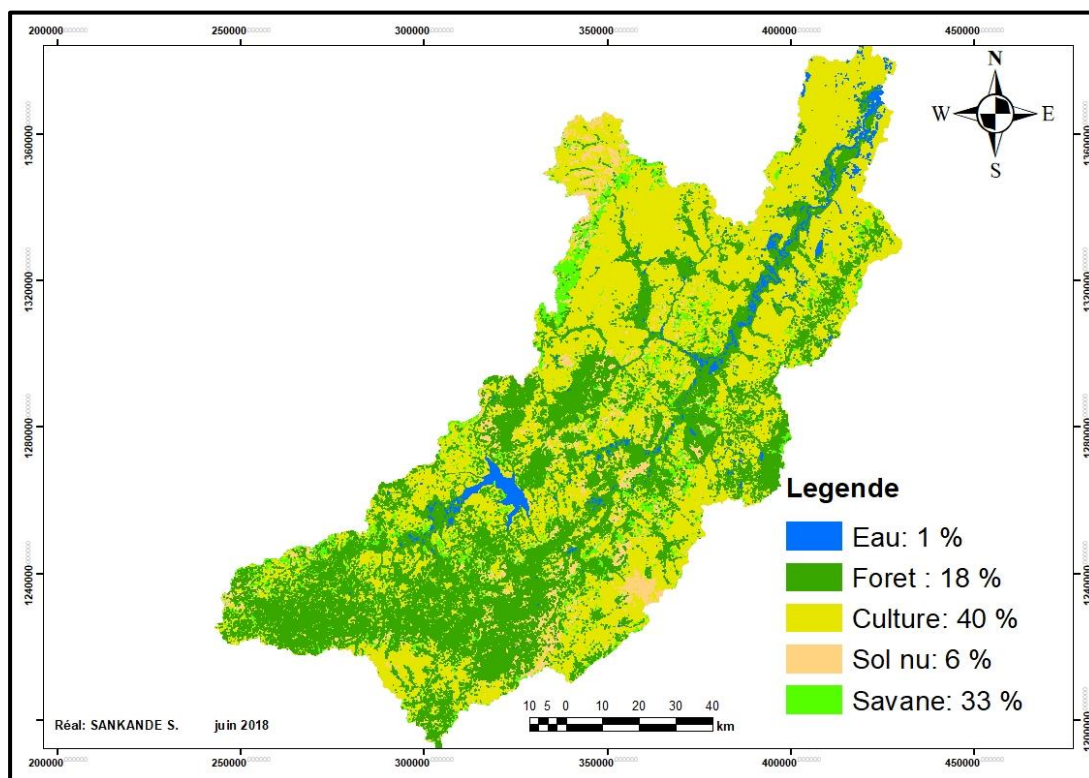


Figure 4: occupation du sol en octobre 2017

Nous illustrons en la carte 8 une vue spatiale de l'occupation du sol sur le bassin versant en 2017.



Carte 8: occupation des sols en 2017

V.2. MATRICE DE CONFUSION

Les matrices de confusion par rapport à la BDOT 1992, à la BDOT 2002, à la BDOT 2015 et par rapport aux images hautes résolutions de google earth ont fourni les résultats que nous présentons dans les tableaux 9, 10, 11 et 12. Les coefficients de Kappa et la précision globale sont assez satisfaisants.

Tableau 9: matrice de confusion de 1990/BDOT-1992

Kappa Coefficient		0.6117		Précision globale		75.49%	
Classe	sol nu	savane	forêt	eau	culture		
Sol nu	21	12		0	1	5	
Savane	33	59		0	2	13	
Forêt	35	25		99	18	3	
eau	1	0		0	79	0	
Culture	10	3		0	0	79	
Total	100	100		100	100	100	

Tableau 10:matrice de confusion de 2007/BDOT-2002

Kappa Coefficient	0.8752		Précision globale		90.22%	
Classe	Sol nu.	Foret	Savane	Eau	Culture	
Sol nu	51		0	4	0	2
Foret	25		95	2	0	3
Savane	6		4	90	0	1
Eau	8		0	0	100	0
Culture	11		1	4	0	94
Total	100		100	100	100	100

Tableau 11:matrice de confusion de 2017/BDOT-2015

Kappa Coefficient	0.8923		Précision globale		91.69%	
Classe	Ground Truth		(Percent)		Eau	Culture.
	Sol nu.	Savane	Foret			
sol nu	56.7	0.1	0.0		0.0	0.0
Savane	30.1	89.8	0.0		0.0	0.0
Foret	9.5	1.6	100.0		0.0	0.0
Eau	1.0	0.0	0.0		99.8	0.0
culture	2.7	8.6	0.0		0.1	100.0
Total	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0

Tableau 12:matrice de confusion de 2017/google earth

Kappa Coefficient	0.8358		Précision globale		89.08%	
Ground Truth	(Percent)					
Classe	sol nu.	savane	foret	eau	culture	
sol nu	27		0	0	0	0
Savane	52		90	0	0	0
Foret	15		2	100	0	0
Eau	2		0	0	100	0
culture	4		9	0	0	100
Total	100		100	100	100	100

V.3.STATISTIQUE DES CHANGEMENTS PAR CLASSE

Les statistiques de détection du changement comprennent de nombreuses méthodes dont le but est d'identifier, de décrire et de quantifier les différences entre les images d'une même scène (même endroit) prises à différents moments ou dans des conditions différentes. Dans cette partie, nous présentons les matrices de transitions de façon dichotomique suivant les années (1990-2007); (2007-2017); (1990-2017). En colonne, on retrouve, les conversions d'une classe à l'autre et en ligne les conversions des autres classes en une classe particulière.

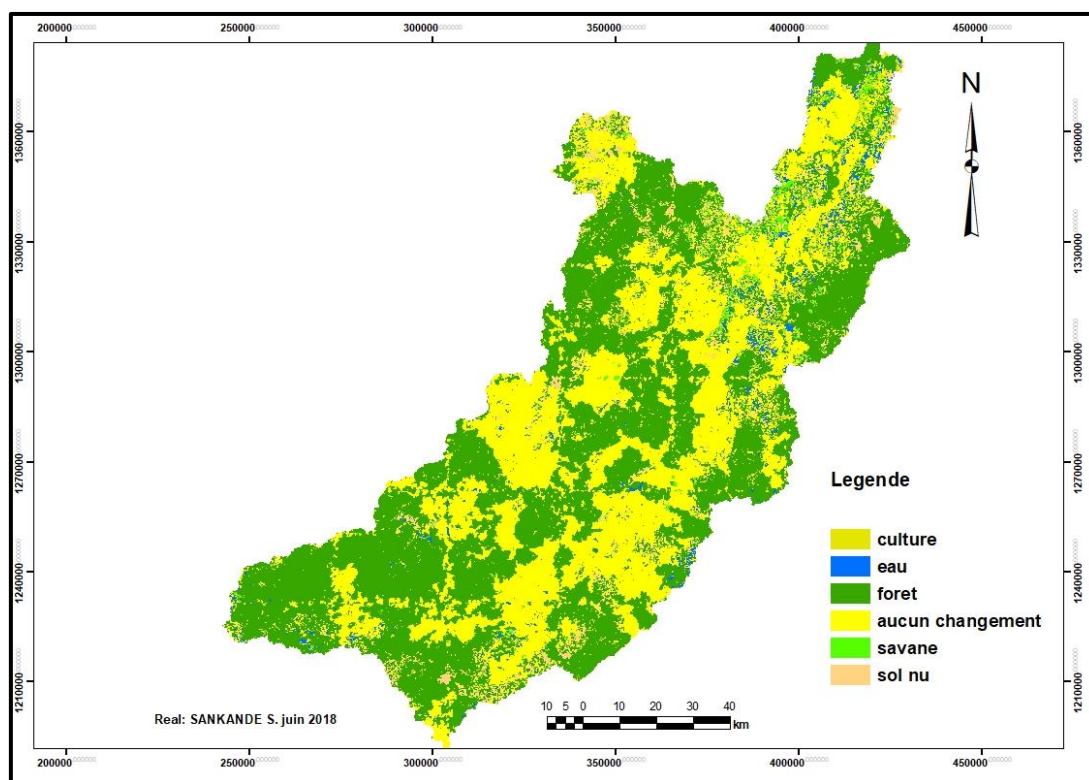
V.3.1. Conversion de l'occupation des sols entre 1990-2007

Les conversions de l'occupation des sols concernent toutes les classes d'occupation du sol de 1990 à 2007. La classe qui a connu la plus grande transformation est la classe sol nu avec un changement de classe de l'ordre de 77.93 %. Suivent respectivement la classe forêt 63.96%, la culture 63.479 %, la classe eau 56.01% et la classe savane 21.43 %, comme le montre le tableau 13.

Tableau 13: conversions des classes d'occupation des sols entre 1990 et 2007

		État initial 1990				
État final 2007		eau	forêt	savane	culture	sol nu
	Unclassified	0	0	0	0	0
	eau	92	3	2	4	2
	forêt	0	36	7	16	11
	savane	0	50	79	39	51
	culture	6	8	9	37	13
	sol nu	2	3	3	4	22
	Class Total	100	100	100	100	100
	Class Changes	8	64	21	63	78
	Image Difference	28	-61	486	216	-42

Nous présentons en carte 9 la dynamique de changement de 2007 à 2017. Entre ces deux dates 5384.78 km² de superficie soit 39.29 % non pas changer d'occupation du sol.



Carte 9: Détection du changement 1990-2007

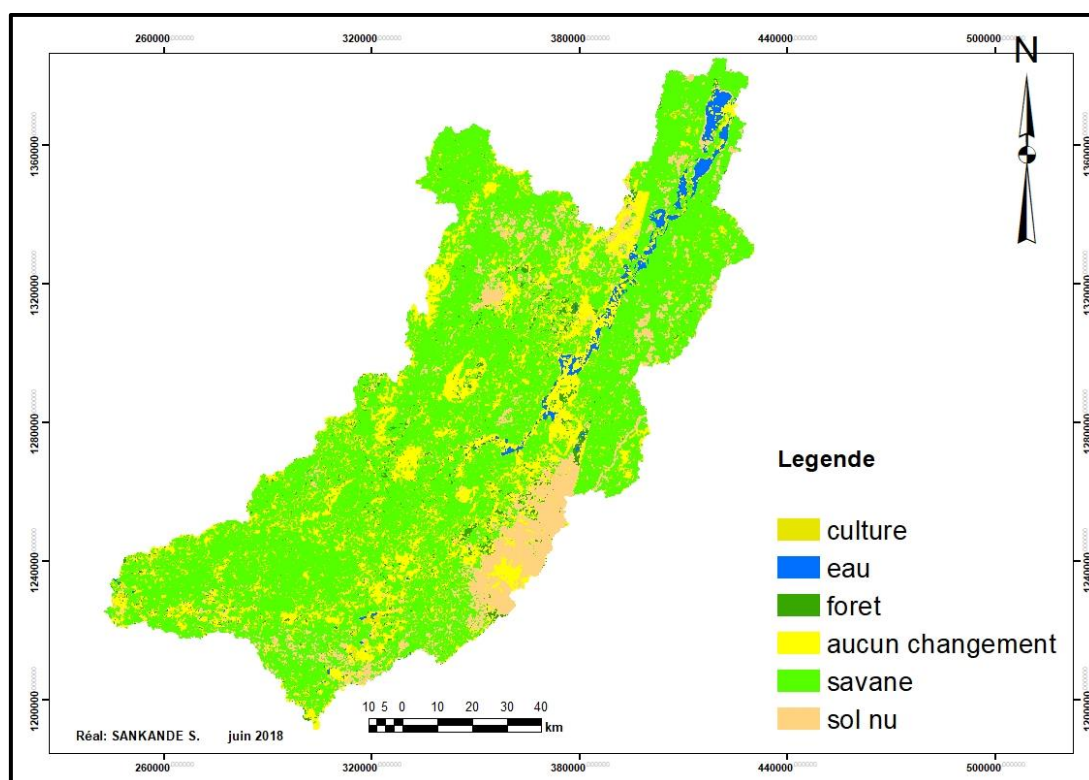
V.3.2. Conversion de l'occupation des sols entre 2007-2017

Les conversions de l'occupation des sols concernent toutes les classes d'occupation du sol de 2007 à 2017. La classe qui a connu la plus grande transformation est la classe sol nu avec un changement de classe de l'ordre de 95.146 %. Suivent respectivement la classe eau 89.60%, la classe sol nu 70.11%, la classe forêt 67.12%, la classe savane 59.95% et la culture 30.56%, comme le montre le tableau 14. Les classes eau, forêt, savane, sol nul ont régressée.

Tableau 14: conversions des classes d'occupation des sols entre 2007 et 2017

État final 2017	État initial 2007				
	eau	foret	savane	culture	sol nu
Unclassified	0	0	0	0	0
eau	74	1	0	0	0
foret	0	33	10	9	2
savane	0	33	40	17	18
culture	24	28	43	69	50
sol nu	2	5	7	4	30
Class Total	100	100	100	100	100
Class Changes	90	67	60	31	70
Image Difference	-25	-40	-35	347	45

Nous présentons en carte 10 la dynamique de changement de 2007 à 2017. Entre ces deux dates 5425.16 km² de superficie soit 39.56 % non pas changer d'occupation du sol.



Carte 10: Détection du changement 2007-2017

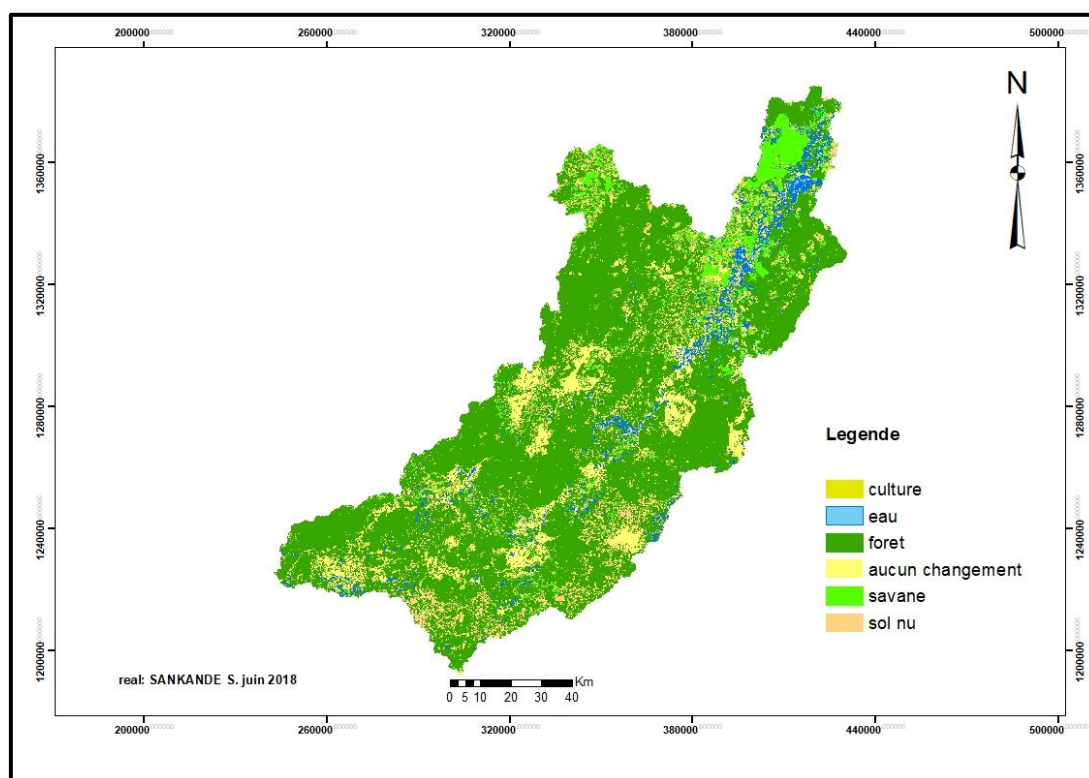
V.3.3 Conversion de l'occupation des sols entre 1990-2017

Les conversions de l'occupation des sols concernent toutes les classes d'occupation du sol de 1990 à 2017. Les classes qui ont connu les grands changements sont : classe eau (90.99 %) ; la classe foret (78.98%), sol nu (76.44%), la classe savane 59.61% et la classe culture comme le montre le tableau 15.

Tableau 15: conversions des classes d'occupation des sols entre 1990 et 2017

État initial 1990						
État final 2017		eau	foret	savane	culture	sol nu
	Unclassified		0	0	0	0
eau		63	1	0	0	1
foret		0	21	2	6	4
savane		0	36	40	6	24
culture		33	38	42	86	48
sol nu		3	4	16	1	24
Class Total		100	100	100	100	100
Class Changes		37	79	60	14	76
Image Difference		-48	-76	281	1314	-16

Nous présentons en carte 11 la dynamique de changement de 1990 à 2017. Entre ces deux dates 3357.17 km² de superficie soit 24.48 % non pas changer d'occupation du sol.



Carte 11: Détection du changement 1990-2017

V.3.4 Taux moyen annuel d'évolution

Nous présentons en figure 5 le taux moyen annuel d'évolution de la dynamique d'occupation des sols. Pendant les trois (3) périodes, nous pouvons constater que les changements persistants concernent les classes forêt et culture.

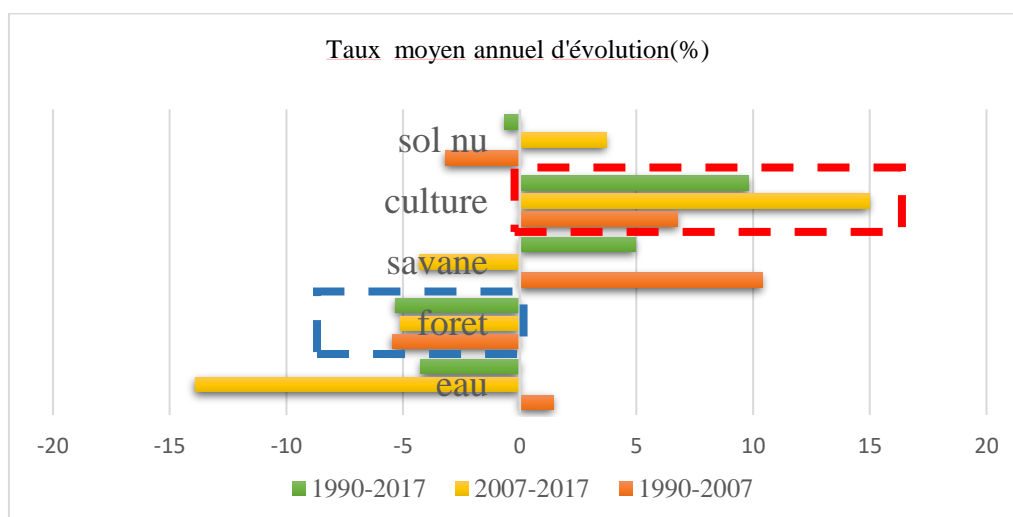


Figure 5: Taux moyen annuel d'évolution

VI. ANALYSES ET DISCUSSION

Ce travail met en évidence l'évolution des différentes classes d'occupation des sols de 1990 à 2017.

- **Tendance des différentes classes d'occupations des sols**

Nous présentons en figure 6 les grandes tendances de l'occupation des sols de 1990 à 2017.

On constate une forte baisse des surfaces des forêts de 1990 à 2007 et modérée de 2007 à 2017.

On note une augmentation modérée des surfaces de cultures de 1990 à 2007 puis très forte de 2007 à 2017. On observe une forte augmentation des savanes de 1990 à 2007 puis une baisse modérée de 2007 à 2017.

On a une augmentation continue des sols nus de 1990 à 2007 puis une baisse de 2007 à 2017.

Les plans d'eau ont augmenté de 1990 à 2007 et ont baissé de 2007 à 2017.

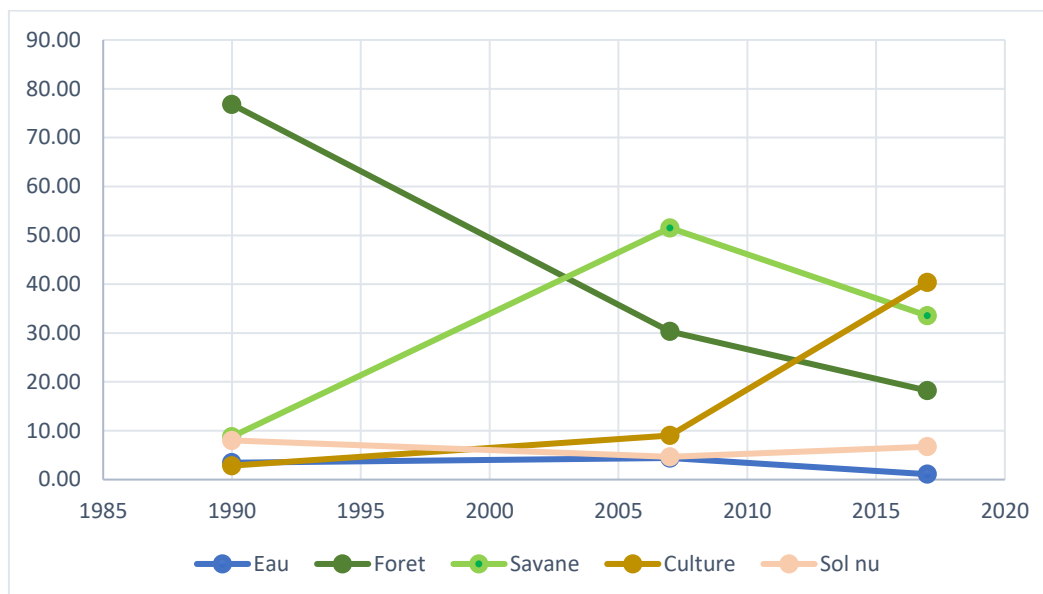


Figure 6: Évolution des surfaces d'occupation du sol en %

- **Pressions sur les forêts**

Les résultats obtenus par la présente étude révèlent une importante dégradation des formations forestières qui passent respectivement de 76.81% en 1990 à 30.33 % en 2007 puis à 18.2% en 2017. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes de la BDOT 1992-2002 qui ont montré que les plus grands changements concernent les changements survenus dans les formations de types forêts galerie impactée à près de 83 % et les autres formations forestières impactées à 17 % (PNGT2, 2006). Également, (Bene et al., 2010) ont montré une réduction considérable des formations forestières fermées (brousses et les galeries forestières) au profit des champs et des vergers qui sont devenus dominants. Les causes principales évoquées sont surtout agricoles avec le développement accru des cultures de contre-saison. Ces cultures consistent à occuper les plans d'eau souvent saisonniers. Ce qui entraîne la destruction des forêts galeries. L'augmentation des superficies des terres agricoles sur les savanes se concentre dans les régions des Cascades, Hauts Bassins et Sud-Ouest. Il est possible de lier ce phénomène à la migration interne des populations des régions surpeuplées du Nord et du Plateau Central vers les régions des Hauts-Bassins, de l'Est, du Sud et Sud-Ouest en quête de terres cultivables et de pâturages (PNGT2, 2006)

Nous présentons en figure 7 la répartition de l'occupation qui illustre la dégradation des formations forestières et l'accroissement des superficies cultivables.

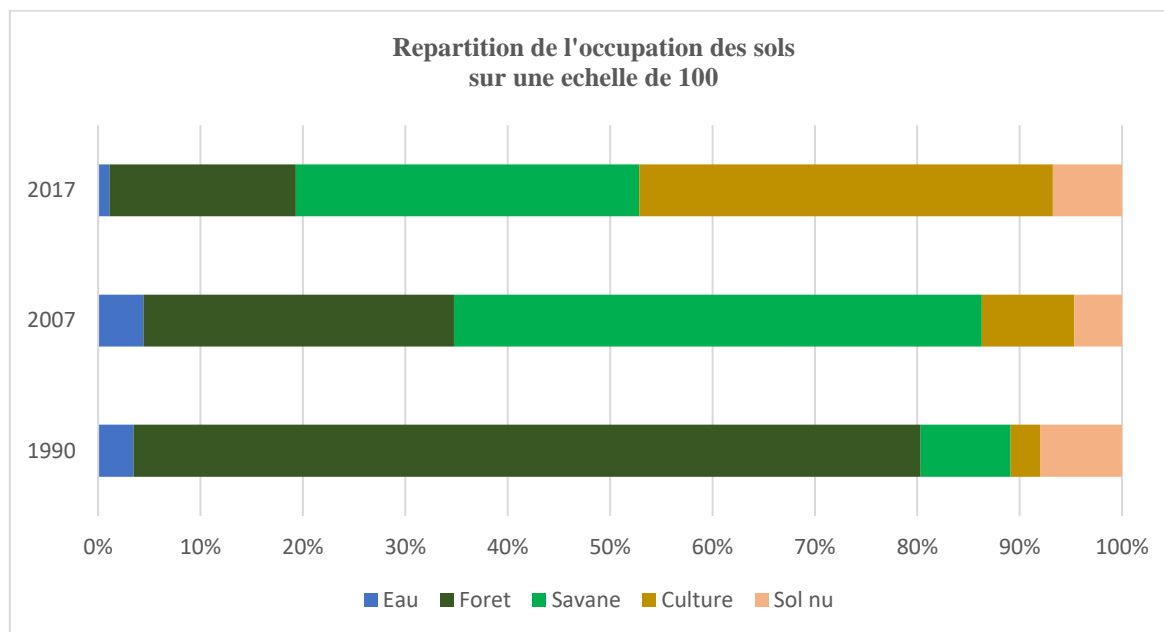


Figure 7: comparaison des surfaces des unités d'occupation du sol

Bien que la connaissance de l'état réel des ressources naturelles soit encore insuffisante au Burkina Faso, les recherches effectuées et les données disponibles révèlent une amplification du processus de dégradation des ressources naturelles ; processus qui affecte le potentiel productif du pays et qui se manifeste entre autres à travers : la dégradation de la couverture végétale, la dégradation des sols, la dégradation des ressources en eau, la dégradation de l'habitat de la faune, la dégradation du cadre de vie (INSD, 2009).

- **Abandon de certains espaces agricoles**

Selon PNGT 2 (2006), entre 1992 et 2002, 536093,86 ha des terres agricoles soit 4,26 % ont été abandonnées ou mises en jachères. Le retrait des zones agricoles (ou jachères) peut être permanent ou temporaire. Il est, en effet difficile de faire une distinction nette entre les vieilles et les jeunes jachères à partir des données satellitaires Landsat et sur deux dates. Nous distinguerons deux types d'extension de jachère : l'une importante, l'autre modérée.

- La première correspond à un abandon des cultures annuelles et/ou des cultures permanentes et des mosaïques de cultures en savanes ;
- La seconde est définie comme une conversion des systèmes agricoles hétérogènes en savane.

Cela explique, sans doute, l'augmentation des savanes qui passent de 8.80 % en 1990 à 51.52 en (2007). On constate également l'augmentation des superficies cultivées qui passent de 6.41 % en 1990 à 11.60 % en 2007 puis à 40.39% en 2017. Selon PNGT 2 (2006)

- **Création et aménagement des plans d'eau**

Les surfaces de plans d'eau sont passées de 3.46% en 1990 à 4.42% en 2007. Cette situation s'explique par la réalisation de treize (13) retenus d'eau entre ces deux dates sur la base de données des retenus d'eau du Burkina. La réalisation de ses ouvrages a contribué à augmenter les surfaces des plans d'eau. En 2017, les surfaces des plans d'eau ont chuté à 1 %. La zone d'étude a connu la réalisation du barrage de Samendeni. Cependant, la plupart des retenues d'eau sont en mauvais état. Cet état de fait est aggravé par la baisse de la pluviométrie avec pour corollaire la baisse des écoulements du fleuve Mouhoun comme montre la figure 8 courbe d'indice de pluviométrie de la station synoptique de Bobo Dioulasso on variabilité de la pluviométrie d'une année à l'autre.

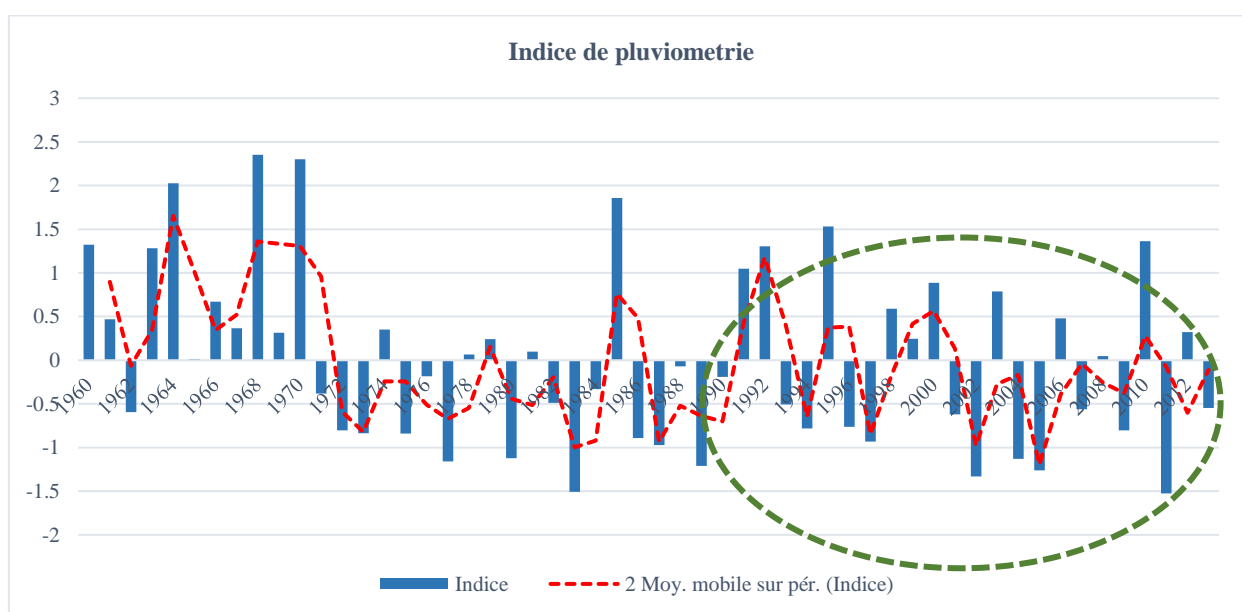


Figure 8: Indice de pluviométrie de BOBO DIOULASSO

Nous présentons en tableau 16 la synthèse des superficies des thèmes d'occupations des sols de 1990 à 2017.

Tableau 16:comparaisons des surfaces des unités d'occupation du sol

Unité occupation Du sol	Superficie en 1990		Superficie en 2007		Superficie en 2017	
	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)
Non classifié	9.58	0.07	5.64	0.04	6.87	0.05
Eau	473.82	3.46	605.57	4.42	228.45	1.10
Foret	10533.40	76.81	4159.13	30.33	5637.30	18.20
Savane	1206.32	8.80	7065.65	51.52	3802.02	33.53
Culture	391.58	2.86	1238.73	9.03	3568.22	40.38
Sol nu	1098.87	8.01	638.86	4.66	470.71	6.75
Total	13713.57	100.00	13713.57	100.00	13713.57	100.00

- **Comparaisons DBOT (1990 ; 2002 : 2015) et les résultats de la classification**

De façon globale nos résultats sont comparés à ceux de la BDOT à travers le tableau 17 en agrégeant savane et forêt, les chiffres de nos résultats corroborent ceux des différentes BDOT.

Tableau 17: comparaisons classification et BDOT

	BDOT			BDOT		
	1992	2002	2015	1990	2007	2017
Vegetation	88%	81%	32%	86%	82%	52%
Eau	1%	1%	6%	3%	4%	1%
Culture	34%	37%	67%	3%	9%	40%
Sol nu	1%	1%	1%	8%	5%	7%

- **les limites de l'étude**

Durant notre étude nous avons connu de nombreuses difficultés dont les principaux sont :

- le temps imparti à l'étude était insuffisant.
- Il a été difficile de trouver des images de qualité du fait de la taille du bassin. Effet, le bassin se retrouvait morcelé dans quatre scènes. Les images des quatre scènes n'étaient pas acquises au même moment.
- la taille du bassin posait énormément de difficultés pour la mise en œuvre de la validation terrain (collecte de points terrain). En outre, notre zone d'étude est frontalière du Mali, la conjoncture sécuritaire n'est pas favorable.
- **Des limites liées à la complexité des paysages**
- Dans les zones sahéliennes, le paysage est un amalgame complexe d'entités dont la taille, la densité et la répartition varient de façon continue ou discontinue sur de faibles distances : rares sont les endroits où des limites précises, d'ensembles homogènes, sont observées. On y rencontre le plus souvent des zones naturelles composées de savanes arbustives ou arborées, à faible densité de recouvrement végétal, et des zones cultivées, où cette densité de recouvrement est très faible. Les zones totalement homogènes sur les images satellites (plans d'eau, dunes vives, forêts, brûlis) y sont exceptionnelles. (Lamachere et al., 1996).
- **Des limites liées aux images Landsat**
- La réflectance de la végétation cache celle de l'eau. De même, l'effet d'ombrage des arbres cache la réflectance du sol. Ceci peut être expliqué par la faible résolution du satellite Landsat (Ben Salem et al., 2016).
- **Des limites liées à dates de prise de vue des images satellitaires et du climat**

- Une Mosaic d'images de deux dates différentes suffisamment proche mais espacé d'au moins une semaine sont utilisées par année dans le cadre du présent travail. Les images sont agrégées et donnent des informations plus ou moins lissées
- **Des limites liées à l'approche méthodologique et de nos résultats**
- Les matrices de confusions montrent une moyenne discrimination des différentes classes. Une combinaison de méthode n'est -elle pas nécessaire pour améliorer la séparabilité des différentes classes.
- **Avantage de la méthode**
- L'utilisation des images LANDSAT permet de résoudre certains problèmes, bien que subsiste une certaine imprécision dans le contenu des unités. Pour améliorer les résultats, l'utilisation d'images à très haute résolution spatiale (de l'ordre du mètre) qui offriront une discrimination optimale des états de surface et donc un meilleur suivi est recommandé.
- De la validation il ressort que des études préliminaires ont montré une précision appropriée et un faible coût. Google Earth est donc très important pour la cartographie des différents types d'utilisation des terres / couverture du sol (Tilahun et al., 2015).



CONCLUSION

Cette étude menée dans le bassin Mouhoun supérieur avait pour objectifs de faire l'analyse diachronique de l'occupation des terres du Mouhoun Supérieur. Au terme de notre étude, l'analyse diachronique a permis de quantifier les changements intervenus entre les années 1990-2007, 2007-2017 et globalement 1990-2017 avec une bonne précision, les coefficients kappa allant de 0.61 à 0.89 et des précisions globales de 75% à 91 %. L'analyse de la dynamique d'occupation des sols révèle de grandes modifications de l'occupation des sols surtout un accroissement des surfaces cultivées et une réduction considérable des formations forestières (forêt claire et les galeries forestières). Les surfaces cultivées sont devenues dominantes. Cette évolution s'est faite dans un contexte de forte croissance démographique et d'évolution de la technologie (culture attelée et motorisée) combiné à des aléas climatiques (faible quantité et mauvaise répartition des pluies). Les conséquences de la pluviométrie irrégulière et de l'accroissement de la population ont fortement contribué d'une part à l'installation des populations sur les lits mineurs des cours d'eau et à la destruction des forêts galeries, et d'autre part à la destruction des formations végétales par l'immigration massive des populations vers le bassin versant plus humide et la coupe abusive des arbres pour le bois de chauffe. L'évolution de la dynamique d'occupation du sol 1990 ;2007 ;2017 soulève de nombreuses questions que les politiques doivent prendre à bras le corps dans l'élaboration des schémas d'aménagement de gestion de l'eau (SAGE).



RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

Le développement accru des aires de cultures engendre une réduction progressive de l'étendue des surfaces boisées, donc la déstabilisation de la structure des sols. Cette dégradation du milieu a un impact sur l'hydrologie du bassin versant du Mouhoun Supérieur. Il importe donc d'analyser les diverses formes d'exploitation du milieu pour dégager les contraintes qu'elles font peser sur l'environnement, et le rôle des différents acteurs afin de proposer une stratégie d'action à mettre en œuvre pour promouvoir un développement durable.

Afin de mieux gérer les ressources naturelles nous recommandons le développer d'une approche participative dans la gestion des ressources naturelles qui prend en considération les besoins des populations locales. Les propositions suivantes sont importantes :

- l'identification de méthodes écologiques pour intensifier l'agriculture et adapter au contexte du Mouhoun supérieur ;
- la créer des grandes zones de pâturage pour éviter les crises entre agriculteurs et éleveurs ;
- encourager l'utilisation d'autres sources d'énergies et lieu et place du bois de chauffages ; en faisant la promotion des équipements pour les énergies solaires, le gaz et l'électricité pour réduire la dépendance vis-à-vis du bois ;
- Renforcer les capacités d'acteurs du monde rural afin de promouvoir l'éducation environnementale.



BLIOGRAPHIE

- Aley, S. (2015).** Optimisation Des Allocations Des Eaux De Surface Dans Une Vision Prospective : Application Du Modele WEAP21 au complexe Mouhoun-Sourou au BURKINA FASO (p. 70). ouagadougou: Institut International d'Ingénierie (2ie).
- Andrieu, J., & Mering, C. (2008).** Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale ouest-africaine: exemple des Rivières du Sud du delta du Saloum au Rio Geba. *Télédétection*, 8(2), 93-118.
- Baatz, M., Benz, U., Dehghani, S., Heynen, M., Höltje, A., Hofmann, P., ... Weber, M. (2004).** eCognition user guide. Definiens Imaging GmbH, Munich, Germany.
- Ben Salem, A., Chokmani, K., MAJDOUB, R., & Abida, H. (2016).** Apports et limites de la télédétection dans l'étude diachronique du système anti-érosif Meskat dans le bassin versant d'oued Hamdoun (Vol. 137).
- Bene, A., & Fournier, A. (2010).** Végétation naturelle et occupation des terres au Burkina Faso (Afrique de l'Ouest). Cinq décennies de changement dans un terroir du pays sèmè.
- Farid, T. (2007, décembre 1).** Optimisation de l'utilisation des ressources en eau du bassin du Kou pour des usages agricoles.
- Ghorbani, A., & Pakravan, M. (2013).** Land use mapping using visual vs. digital image interpretation of TM and Google earth derived imagery in Shrivan-Darasi watershed (Northwest of Iran). *European Journal of Experimental Biology*, 3(1), 576-582.
- Hassen, B., Mahdi, K., & Yassine, B. (2008).** Utilisation des données satellitaires pour le suivi des changements d'occupation du sol et de la dégradation du couvert végétal dans les zones semi-arides: cas de la région sud des aurès (Algérie), *Revue synthese*(18).
- Hoang, K. H., Bernier, M., & Villeneuve, J. P. (2007).** Les changements de l'occupation du sol et ses impacts sur les eaux de surface du bassin versant de la riviere Càu (Viêt-nam).
- Huong Hoang, K., Bernier, M., & Villeneuve, J.-P. (2009).** Les Changements De L'occupation Du



Sol Dans Le Bassin Versant De La Rivière Cäu (VIËT-NAM). Télédétection.

INSD. (2009). Annuaire statistique de l'environnement 2010.

Klieme, E., Avenarius, H., Blum, W., Döbrich, P., Gruber, H., Prenzel, M., ... Tenorth, H.-E. (2003).

Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards. Eine Expertise. BMBF.

Kologo, B., & Soumbougma, A. (2016, septembre). Inventaire Des Occupants Des Berges Du Fleuve Sourou.

Lamachere, J.-M., & Puech, C. (1996). Cartographie des états de surface par télédétection et prédétermination des crues des petits bassins versants en zones sahélienne et tropicale sèche. L'hydrologie tropicale géoscience et outil pour le développement, 2-4 May 1995, 235-248.

Lambin, E. F., Geist, H., & Rindfuss, R. R. (2006). Introduction: local processes with global impacts. In Land-use and land-cover change (p. 1-8). Springer.

Mas, J.-F., Kolb, M., Houet, T., Paegelow, M., & Olmedo, M. C. (2011). Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. *Revue Internationale de Géomatique*, 21(3), 405-430.

PNGT2. (2006). Evaluation de l'occupation des terres entre 1992 et 2002 au BUKINA FASO.

Pontius Jr, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407-4429.

Regis, C., & Claude, C. (2001). *Precis de télédétection volume 3 Traitements Numeriques d'Images de télédétection.* Quebec (CANADA): Presse de l'université de QUEBEC.

Sarr, M. A. (2009). Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeog*: *European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeog.22707>

Tilahun, A., & Teferie, B. (2015). Accuracy assessment of land use land cover classification using Google Earth. *Am. J. Environ. Prot*, 4, 193-198.

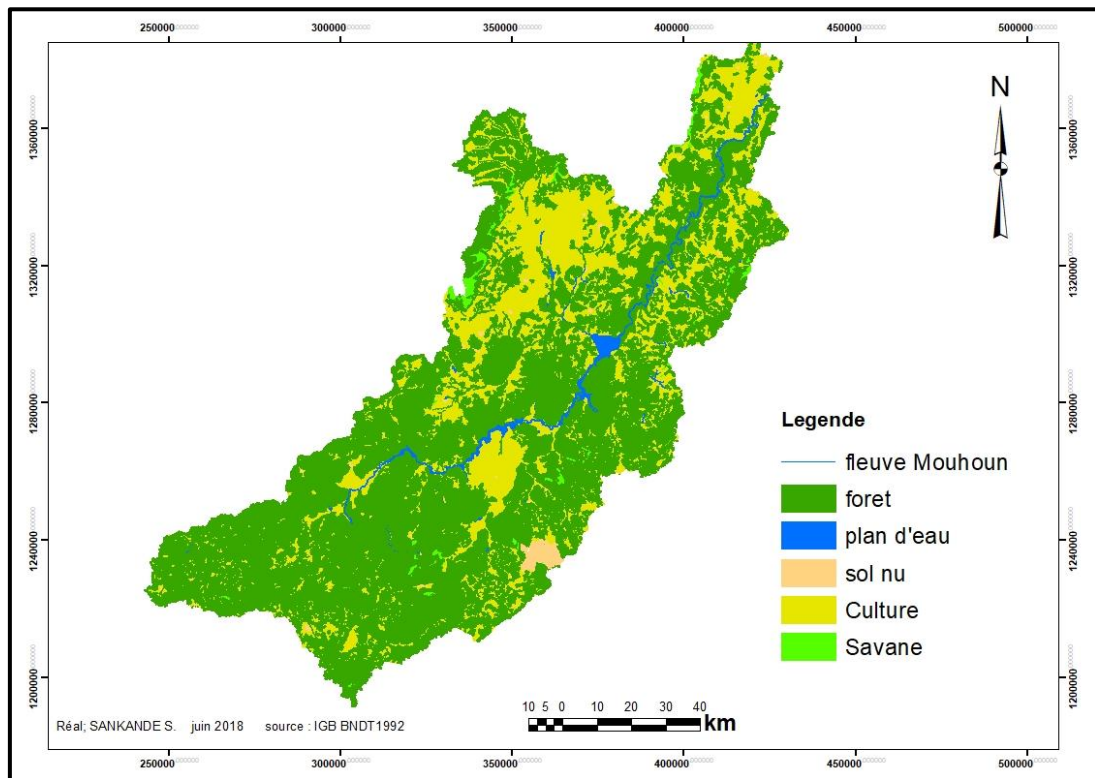


Wellens, J. (2014, mars). Un cadre pour l'utilisation des outils d'aide à la décision à diverses échelles spatiales pour la gestion de l'agriculture irriguée en Afrique de l'Ouest.

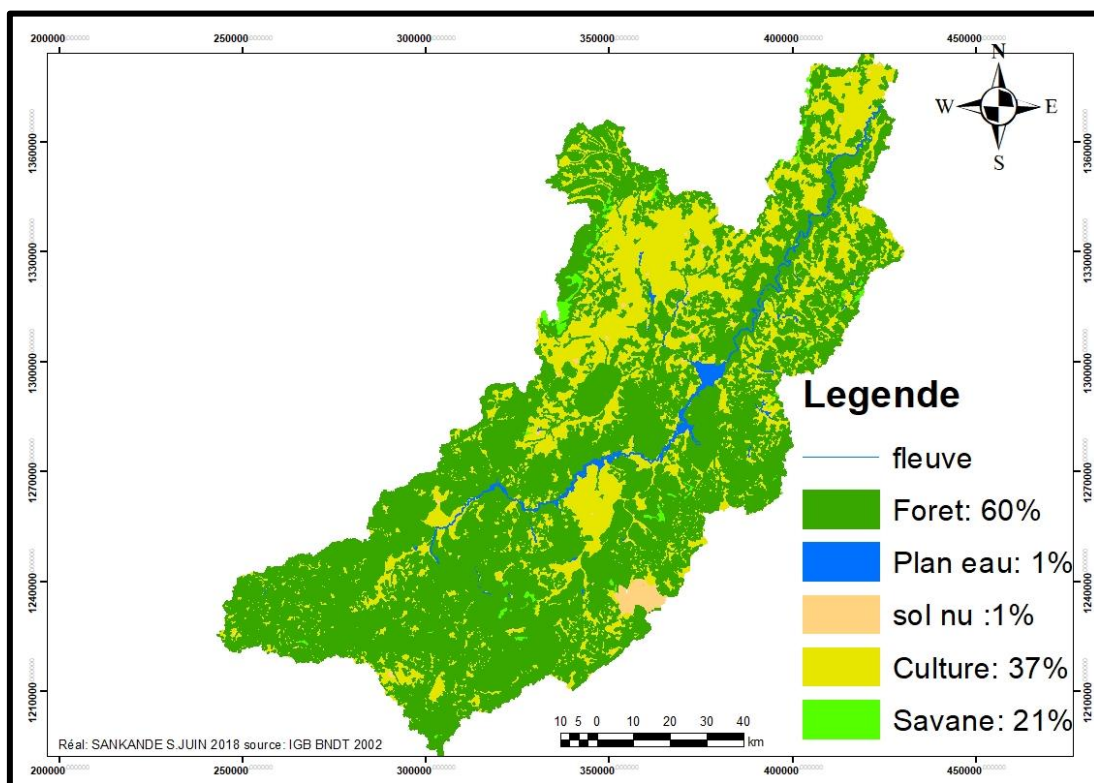
ANNEXES

Annexe 1: pluviométrie annuelle à la station de Bobo Dioulasso

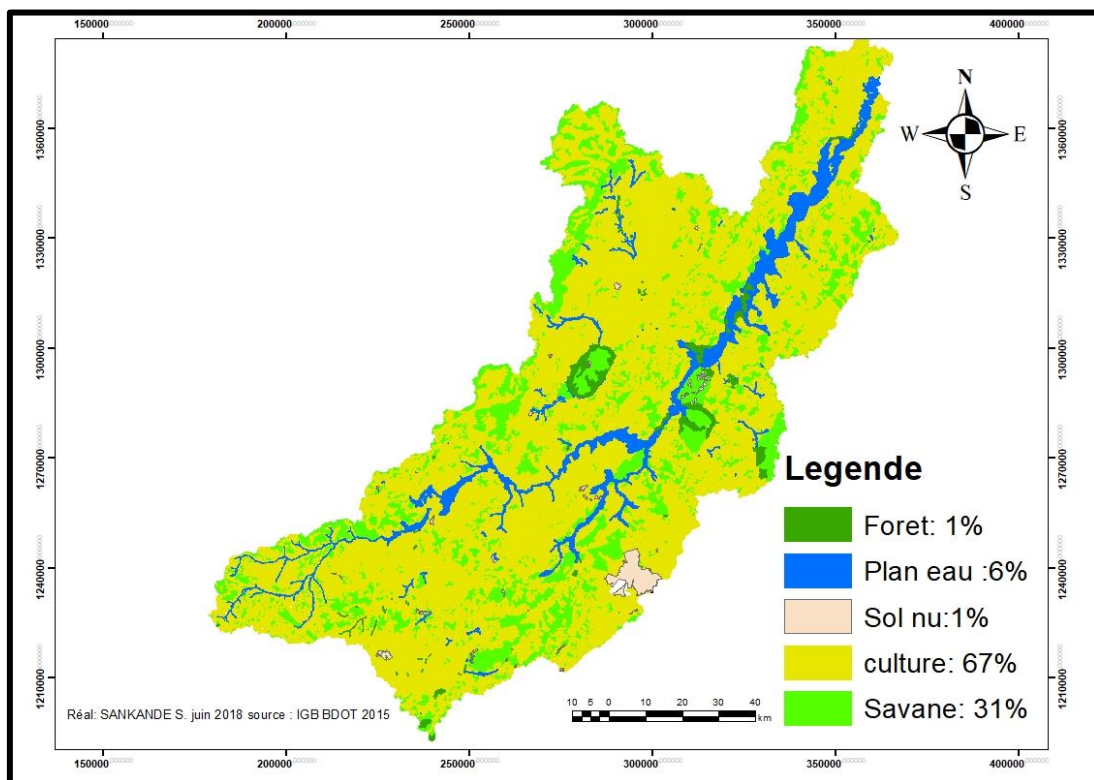
année	Pluie	année	Pluie	année	Pluie	année	Pluie	année	Pluie
1960	1243.4	1971	963.6	1982	945.6	1993	943	2004	840.6
1961	1103.4	1972	894.2	1983	778.1	1994	897.4	2005	818.9
1962	928.4	1973	888.5	1984	971.6	1995	1277.7	2006	1105
1963	1236.7	1974	1084	1985	1331.5	1996	900.5	2007	933.8
1964	1359	1975	888.1	1986	879.8	1997	872.9	2008	1033.8
1965	1028.6	1976	996.1	1987	866.3	1998	1122.9	2009	894
1966	1136.5	1977	835.4	1988	1014.5	1999	1066.2	2010	1250.1
1967	1086.2	1978	1036.7	1989	827.5	2000	1171.7	2011	775.4
1968	1412.9	1979	1065.7	1990	994.7	2001	924.5	2012	1079.2
1969	1078	1980	841.4	1991	1198.1	2002	807.6	2013	936.2
1970	1404.3	1981	1042.3	1992	1240.7	2003	1155.7		



Annexe 2: Occupation des sols BDOT 1992



Annexe 3: Occupation des sols BDOT 2002



Annexe 4: Occupation des sols BDOT 2015



Annexe 5: liste des retenues du bassin versant

Nom	longitude	latitude_	type	sous_bassin	Année realization	usage
TOUKORO	-4.25911	11.4477997	Barrage	Mouhoun superieur	1990	Agricole
BALLA 1	-4.1038098	11.4855003	Barrage	Mouhoun superieur	1990	Agricole
BALLA 2	-4.1061101	11.4939003	Barrage	Mouhoun superieur	1999	Pastoral
KADOUMBA	-3.99125	11.5143995	Barrage	Mouhoun superieur	1998	Pastoral
SATIRI	-4.04106	11.4350996	Barrage	Mouhoun superieur	2006	Pastoral
SOKOURANI 1	-4.1153302	11.5164003	Barrage	Mouhoun superieur	1989	Agricole
SOKOURANI 2	-4.11483	11.5045004	Barrage	Mouhoun superieur	1989	Agricole
TIARAKO1	-4.1347198	11.4827995	Barrage	Mouhoun superieur	1991	Pastoral
TIARAKO2	-4.14083	11.4808998	Barrage	Mouhoun superieur	1990	Agricole
KOLOKO	-5.2990799	11.0866003	Barrage	Mouhoun superieur	1996	Pastoral
Kabala	-4.7611098	11.507	Barrage	Mouhoun superieur	1999	Pastoral
SAMOROGOUAN	-4.9207201	11.4101	Barrage	Mouhoun superieur	1999	Pastoral
NEFRELAYE	-3.9829199	11.6292	Barrage	Mouhoun superieur	1999	Pastoral