

Occupation du sol dans le sous-bassin versant de la rivière Ndrigi (Lac Albert, Ituri, RDC) de 1999 à 2021

Germain Kababo KAKANI^{1*}, Honoré Belesi KATULA² et Fils Makanzu IMWANGANA³

¹ *Institut Supérieur Pédagogique de Bunia, Géographie et Gestion de l'Environnement, RDC*

² *Université de Kinshasa, Faculté des Sciences et Technologies, Sciences et Gestion de l'Environnement,
BP 190 Kinshasa XI, RDC*

³ *Université de Kinshasa, Faculté des Sciences et Technologies, Géosciences, Unité de Recherche et Formation
en Gestion des Risques Naturels (URF-GRN), BP 190 Kinshasa XI, Centre de Recherches Géologiques et
Minières (CRGM), Laboratoire de Géomorphologie, Kinshasa, RDC*

(Reçu le 10 Août 2023 ; Accepté le 11 Novembre 2023)

* Correspondance, courriel : gkababo@gmail.com

Résumé

Ce travail sur l'« Occupation du sol du bassin versant du lac Albert : Cas du sous bassin de Ndrigi en Ituri (République Démocratique du Congo, RDC) » porte sur l'analyse des images satellitaires pour la période allant de 1999 à 2021, dans l'objectif de décrire et d'expliquer l'état actuel et la dynamique d'occupation du sol en vue de prévenir et de limiter les catastrophes qui en découleraient. Une méthodologie couplant les analyses de terrain et les travaux de laboratoire y est appliquée. Les analyses au laboratoire ont été étayées par la télédétection à l'aide de modèles numériques et des images Landsat. Elles se sont appuyées sur le calcul de NDVI et de matrice de confusion pour les classes d'occupation du sol de 1999, 2001, 2008, 2010, 2016 et 2021. La moyenne des NDVI pour ces années varie entre -0,23044517 et 0,28443483. Tandis que les classes d'occupation du sol se sont développées différemment selon les années, avec la prédominance de la forêt ripicole en 1999, la forêt des terres fermes en 2008 et 2016 et la formation herbacée en 2010 et 2021. En 2001 et 2021 de nouvelles classes sont apparues notamment celles de marécage, de végétation lacustre et de roche dénudée, formant au total sept classes d'occupation du sol détectées avec celle de sol nu observée dans toutes les années. La précision globale moyenne de classification de 89 % pour un coefficient de Kappa moyen de 0,94 a permis de détecter le changement des superficies et des spectres des classes dont la plus remarquable est l'expansion spatiale au niveau de la formation herbacée pour toutes les années d'observation au détriment de la forêt. Cette modification peut permettre de prendre des décisions d'aménagement. Car cela signale déjà l'ampleur négatif des activités anthropiques.

Mots-clés : *bassin versant, Lac Albert, Ndrigi, occupation du sol, NDVI.*

Abstract

Land cover in the Ndrigi sub-catchment, a tributary of Lake Albert in Ituri, DR Congo

This work on "Land cover of the Lake Albert watershed: Case of the Ndrigi sub-catchment in Ituri (DRC)" focuses on the analysis of satellite images for the period from 1999 to 2021, with the aim of describing and explaining the current state and dynamics of land use in order to prevent and limit the resulting disasters. A methodology coupling field analysis and laboratory work is applied. Laboratory analysis have been supported by remote sensing using numerical models and Landsat images. They were based on the calculation of NDVI and confounding matrix for the 1999, 2001, 2008, 2010, 2016 and 2021 land cover classes. These years NDVI average ranges from -0.23044517 to 0.28443483. Whereas the land cover classes have developed differently depending on the year, with the predominance of riparian forest in 1999, forest in 2008 and 2016, herbaceous formation in 2010 and 2021. In 2001 and 2021 new classes appeared, including those of swamp, lake vegetation and bare rock forming a total of seven detected land cover classes with the bare ground class that was observed in all years. The average global accuracy of classification is 89% for an average Kappa coefficient of 0.94 made it possible to detect the change in the areas and spectra of the classes, the most remarkable of which is the spatial expansion at the level of the herbaceous formation for all years of observation to the detriment of the forest. This amendment may allow planning decisions to be made because this already signals the negative scale of anthropogenic activities.

Keywords : *catchment, Lake Albert, Ndrigi, land use, NDVI.*

1. Introduction

L'analyse de l'occupation du sol complète la compréhension des changements environnementaux [1]. Elle utilise les techniques de la télédétection et du système d'information géographique (SIG) qui ont une approche de plus en plus précise [2, 3] pour explorer la matière à étudier au plan théorique, conceptuel et méthodologique [4]. Ces dernières sont utilisées pour l'étude des informations géographiques et pour guider la prise des décisions [5]. C'est pourquoi leurs outils sont choisis pour la présente étude qui consacre son attention sur l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol d'un bassin versant, situé dans une région très peu explorée par les chercheurs à savoir le sous-bassin versant de Ndrigi un affluent du lac Albert [6]. Ce sous-bassin constitue un lieu de refuge en période d'insécurité. Il attire les exploitants des matériaux de construction dans sa partie montagnarde et les éleveurs dans la plaine lacustre. Ce qui accentue l'expansion de la formation végétale herbacée au détriment de la forêt [7, 8]. Depuis trois décennies, bien que les facteurs naturels favorisent la dynamique et la variation du couvert végétal [9], la concentration de l'homme y constitue la principale cause de la dégradation des écosystèmes [10]. Cette concentration exerce une pression sur les ressources naturelles [11], surtout que les systèmes inappropriés d'exploitation des ressources disponibles, ont des répercussions directes sur l'occupation du sol [12, 13]. En effet, l'instabilité économique et politique qui touche la partie du nord-est de la RDC fait que le contrôle de gestion tant urbaine que rurale n'est pas pris en priorité [14] ; pourtant c'est un phénomène visible et alarmant qui entraînent des dysfonctionnements des écosystèmes terrestres et des pertes de biodiversité [15]. Ainsi, dans le contexte actuel des changements climatiques et au regard de la croissance conjointe de la population et de leurs besoins vitaux et en terre dont la superficie est constante, il est nécessaire de s'intéresser à la dynamique d'occupation du sol [16]. L'objectif de la présente étude est donc d'analyser les aspects actuels de l'occupation du sol et de décrire leurs changements observés dans le bassin versant de Ndrigi, afin d'orienter rationnellement la politique de gestion environnementale, pour développer des stratégies de préservation et de restauration des écosystèmes.

2. Matériel et méthodes

2-1. Milieu d'étude

Le sous-bassin de Ndrigi est situé sur deux formes de relief : celle de la chaîne de Monts Bleus (1460 m) d'où Ndrigi tire sa source, et de la plaine lacustre de Kasenyi dont l'altitude moyenne varie entre 600 et 700 m, dans trois entités administratives : la chefferie de Bahema Banywagi et le Secteur des Walendu Tatsi en territoire de Djugu et le secteur des Bahema Sud en territoire d'Irumu (RDC). Orienté du nord-ouest au sud-est, il s'étend entre 1°32'07" et 1°24'15" de latitude Nord et entre 30°20'05" et 30°28'15" de longitude Est (**Figure 1**) et appartient à deux domaines climatiques l'un montagnard à tendance subtropicale et continentale du type Cfa et l'autre tropical de transition du type Aw (selon la classification de Köppen) étalé dans la plaine de Kasenyi. Il s'y développe les formations végétales dominées par des espèces graminées variées, avec la présence des arbustes comme *Acacia*, *Albizzia*, *Euphorbia* et *Kigelia abyssinica* formant une mosaïque de formation herbeuse et de forêt-galerie.

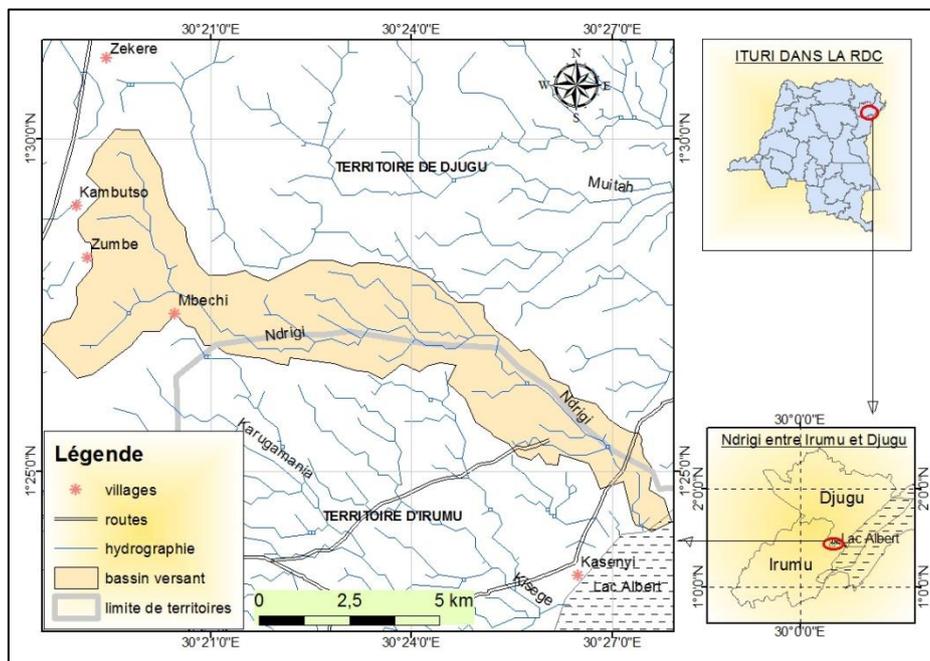


Figure 1 : Localisation régionale du bassin versant de Ndrigi

Source : Digitalisation sur Arc Gis par Kababo

La population qui y habitait entre 2010 et 2021 a évolué de 14775 à 38319 habitants. Ce qui représente une augmentation de 259,4 % en dix ans. Ce peuplement est un indicateur explicatif du changement d'occupation du sol de la région suite à la démographie, à l'exploitation des ressources naturelles, à l'agriculture et au surpâturage.

2-2. Matériel d'acquisition et de traitement des données

2-2-1. Matériel

Les matériels utilisés dans le cadre de ce travail sont :

- Un GPS (Global Positioning System) de marque Garmin 60s pour le prélèvement des coordonnées géographiques sur le terrain ;

- Une Caméra marque Sony (zoom 8x) pour la prise des photographies ;
- Un ordinateur avec les logiciels de télédétection (Envi 5.3, Quatum GIS 3.10, Google Earth Pro.

2-2-2. Données utilisées

Les données sont tirées de la scène ETM+ de Landsat 7 et 8, Path 173, Row 59 ayant les caractéristiques différentes (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Caractéristiques des données utilisées

Type de données	Format	Résolution spatiale / Echelle	Source des données	Utilisation
Modèle numérique de terrain- ASTER	Raster	30 m	Earth Explorer de l'USGS http://earthexplorer.usgs.gov/	Carte de pente du bassin versant
Images Landsat 7 et Landsat 8	Raster	30m	Earth Explorer de l'USGS http://earthexplorer.usgs.gov/	Analyse diachronique des communautés végétales

2-3. Approche méthodologique

La méthode d'observation et la technique analytique des images ont servi à étudier l'occupation du sol. Les images ont subi un prétraitement pour corriger les déformations géométriques et radiométriques, puis le calcul de l'Indice par Différence Normalisée de la Végétation (NDVI) a facilité la classification par Maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood). Pour se rassurer de la qualité de la classification, le Coefficient Kappa « K » est calculé en utilisant la **Formule (1)**. Et la précision globale (Pg) est générée par la **Formule (2)**.

$$K = \frac{\sum_{i=1}^k X_{ii} - \sum_{i=1}^k (X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (X_{i+} \times X_{+i})} \quad (1)$$

$$Pg = \frac{\sum_{i=1}^r X_{ii}}{N} \times 100 \quad (2)$$

X_{ii} est le nombre de pixels classés correctement ; X_{+i} est la somme des valeurs de la colonne i ; X_{i+} est la somme des valeurs de la ligne i ; D est la somme des pixels bien classés (éléments de la diagonale dans la matrice d'erreur) ; N est la somme des pixels dans la matrice d'erreur et k est le nombre de lignes dans la matrice.

Enfin pour déterminer le dynamisme de l'occupation du sol, le taux moyen annuel d'expansion spatiale (T) est calculé à partir des superficies initiale et finale en utilisant la formule de Bernier (1992) présentée par la **Formule 3**.

$$T = \left[\frac{\ln S_2 - \ln S_1}{(t_2 - t_1) \times \ln e} \right] \times 100 \quad (3)$$

S_1 et S_2 : Superficie d'une unité paysagère à la date t_1 et t_2 respectivement ; $t_2 - t_1$: Nombre d'années d'évolution ; \ln : Logarithme népérien ; e : Base du logarithme népérien ($e = 2,71828$).

3. Résultat

3-1. Prétraitement des images et calcul de NDVI

Les images du Landsat 7 et 8 contenant des nuages sont prétraitées par la correction géométrique et le mosaïquage. Puis le calcul de NDVI effectué a donné (i) le couvert végétal permanent en couleur sombre constitué de forêts, de forêts ripicoles, de formations herbacées, et des végétations aquatiques et semi aquatiques ; (ii) et le couvert végétal incomplet en couleur claire, qui est représenté par les sols et les rochers. La **Figure 2** présente les différentes valeurs de NDVI dans le bassin versant de Ndrigi de 1999 à 2021. Leurs valeurs chiffres sont présentées dans le **Tableau 2**.

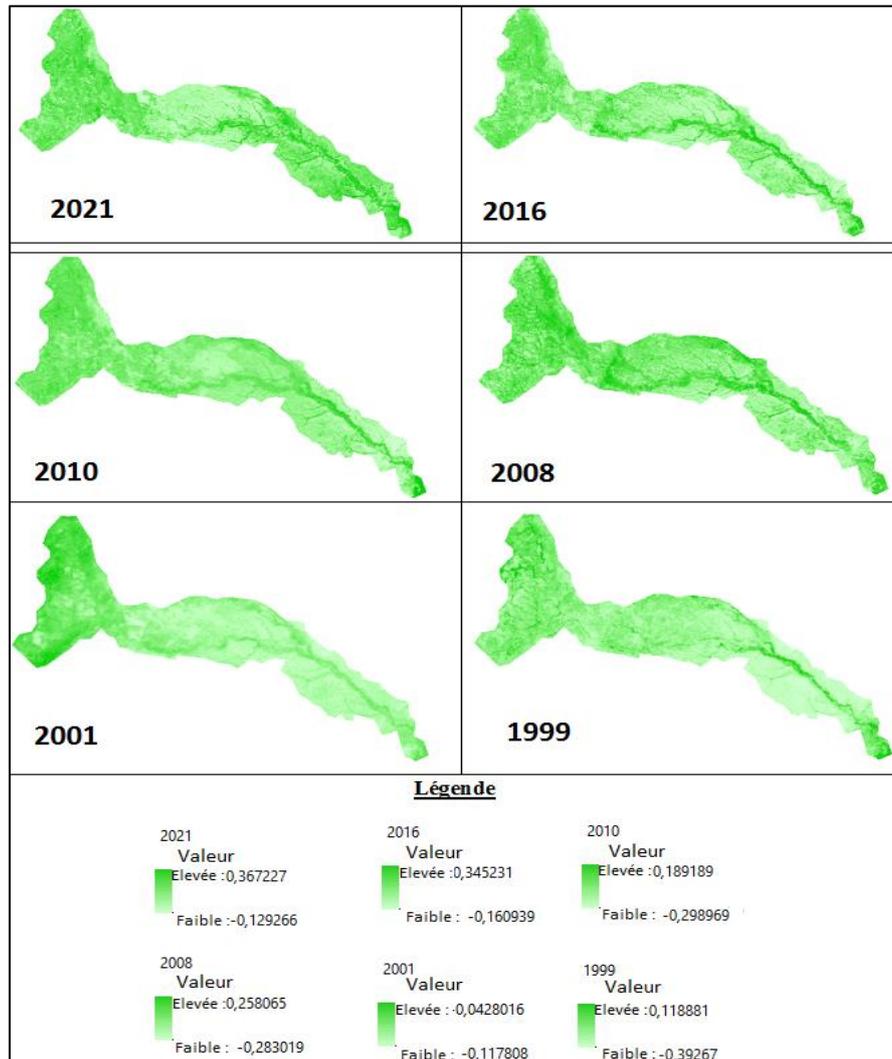


Figure 2 : Les NDVI du bassin versant de Ndrigi

Source : Analyse sur Envi par Kababo

Tableau 2 : Valeurs de NDVI

ANNEES	1999	2001	2008	2010	2016	2021	MOYENNE
Elevée	0,118881	0,428016	0,258065	0,189189	0,34523	0,367227	0,28443483
Faible	-0,39267	-0,1178	-0,28301	-0,29896	-0,16093	-0,1292	-0,23044517
Différence	0,511551	0,545824	0,541084	0,488158	0,50617	0,496493	0,51488

Il ressort du **Tableau 4** que les valeurs moyennes de NDVI varient entre -0,23044517 et 0,28443483, une différence de 0,51488. Toutefois, ces valeurs ont été très contrastées en 2001 avec l'intensité variant entre -0,1178 et 0,428016 soit une différence de 0,545824.

3-2. Classification thématique des images

Pour classifier les images satellites, les données issues des investigations de 2021 sur le terrain et des images des années antérieures de Google Earth ont servi comme données d'apprentissage. La signature spectrale observée a sensiblement changé au niveau des classes au cours de ces années étudiées (**Figure 3**).

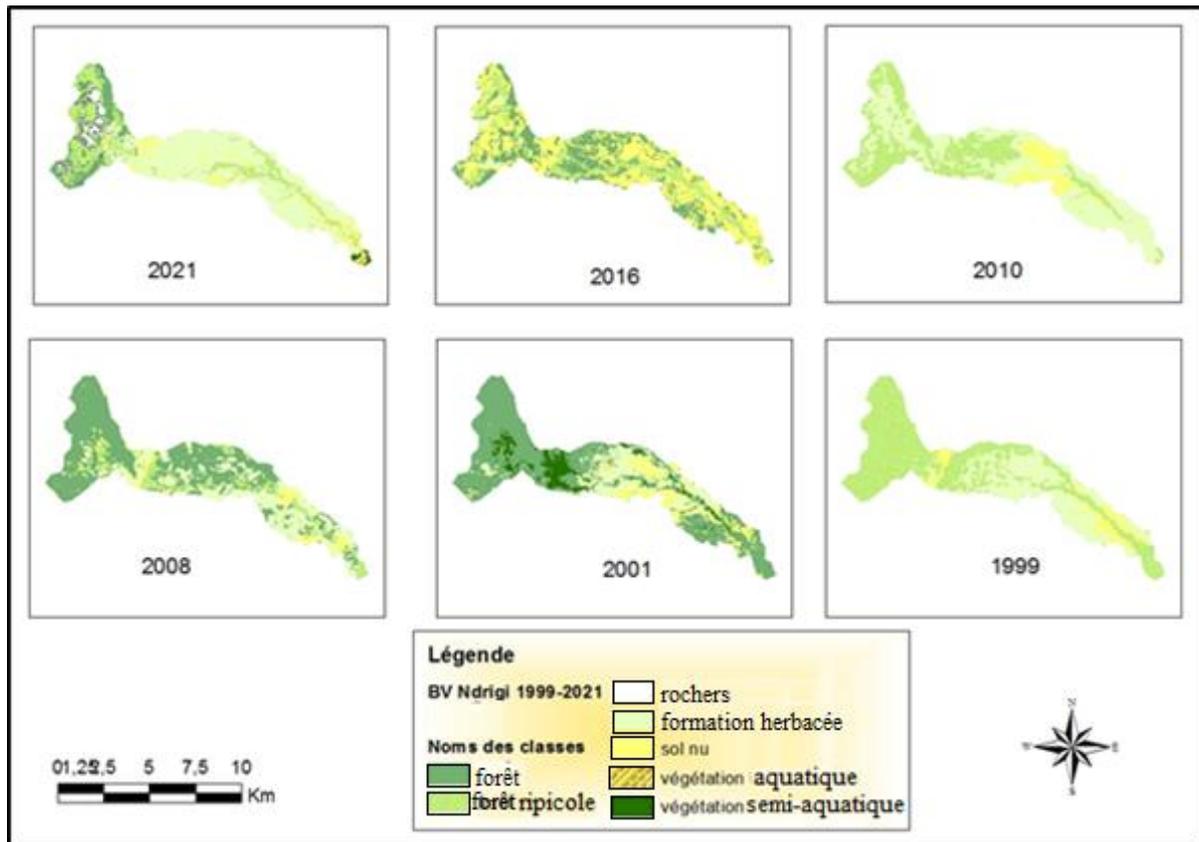


Figure 3 : *Changements d'occupation du sol du bassin versant de Ndrigi de 1999 à 2021*

Source : analyse sur Envi par Kababo

Il ressort de la **Figure 3** que les classes d'occupation du sol se sont développées différemment selon les années. Avec la prédominance de la forêt ripicole en 1999, la forêt en 2001 et 2008, tandis qu'en 2010 et 2021 c'est la formation herbacée qui a prédominé. Suite à la classification supervisée, les précisions de l'utilisateur supérieures à 95 % pour toutes les années d'étude et les erreurs calculées à partir des matrices de confusion indiquent que les pixels correctement classés représentent une moyenne de 6717 sur un total de 7025 pixels donnant ainsi une précision globale moyenne de 89 % après l'utilisation de la formule (2) pour un coefficient de Kappa moyen de 0,94 (1). La classification a donné sept classes présentées avec leurs superficies dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Superficies des classes d'occupation du sol du bassin versant de Ndrigi de 1999 à 2021

Classes Années	Superficies en m ²					
	1999	2001	2008	2010	2016	2021
Forêt de terre ferme	15492940,3	12123170,5	26903886	18721237	18594557,8	5420475
Formation herbacée	6184240,33	4488119,23	10767339	17867137	11700225	25439175
Sol nu	3698100	7697073,31	2852100	4734000	8756372,69	3296250
Forêt ripicole	22685740,3	16977829,8	7537685	6738637	9010382,39	10503450
Marécage	0	6774826,12	0	0	0	311625
Roche dénudée	0	0	0	0	0	2766150
Vég. lacustre	0	0	0	0	0	341550
TOTAL	48063019,9	48063019,96	48063018	48063021	48063553,9	48080696

Du **Tableau 3**, il ressort que la forêt de terre ferme a perdu près de deux tiers de sa superficie en passant de 15492940,3 m² en 1999 à 5420475 m² en 2021. Tandis que la forêt ripicole a perdu près de la moitié de sa superficie passant de 22685740,3 m² en 1999 à 10503450 m² en 2021. La détection de ces changements est décrite dans les points qui suivent et quelques éléments de cette occupation du sol sont illustrés par la **Figure 4**.

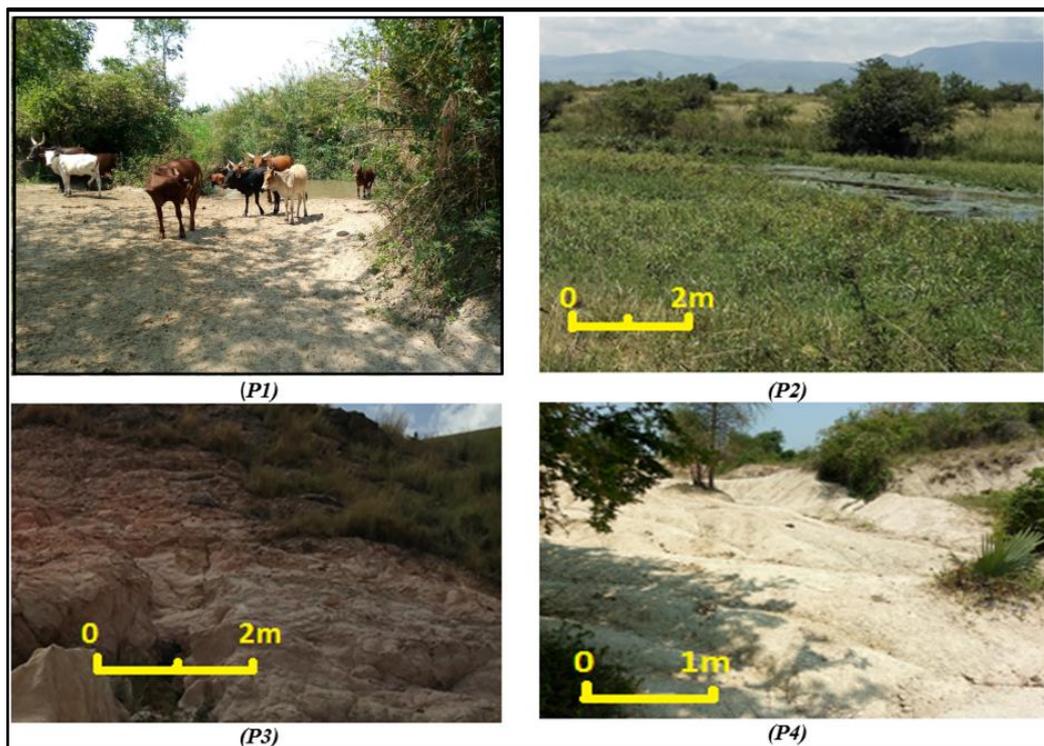


Figure 4 : Images de la couverture du sol dans la vallée de Ndrigi (P1) du couvert végétal dégradé par l'élevage, (P2) de la forêt ripicole dégradée combinée aux marécages, (P3) de la formation herbacée et du sol nu et (P4) du sol nu dominant la surface

3-3. Détection du changement

La détection du changement est utilisée pour identifier, décrire et quantifier les différences entre les images d'une même scène à des moments différents (changement temporel) ou dans des conditions différentes (changement spatial).

3-3-1. Évolution spatiale du bassin versant de Ndrigi

Les sept classes d'occupation du sol détectées dans le bassin versant de Ndrigi ont évolué de manière différente entre 1999 et 2021. La classe de rocher est apparue seulement en 2021 tandis que celle de marécage est observée deux fois, en 2001 et en 2021. Même s'il s'est observé une reforestation naturelle entre 2001 et 2008, de manière globale l'évolution montre une diminution de superficie des forêts au profit des zones savanicoles (*Figure 5*).

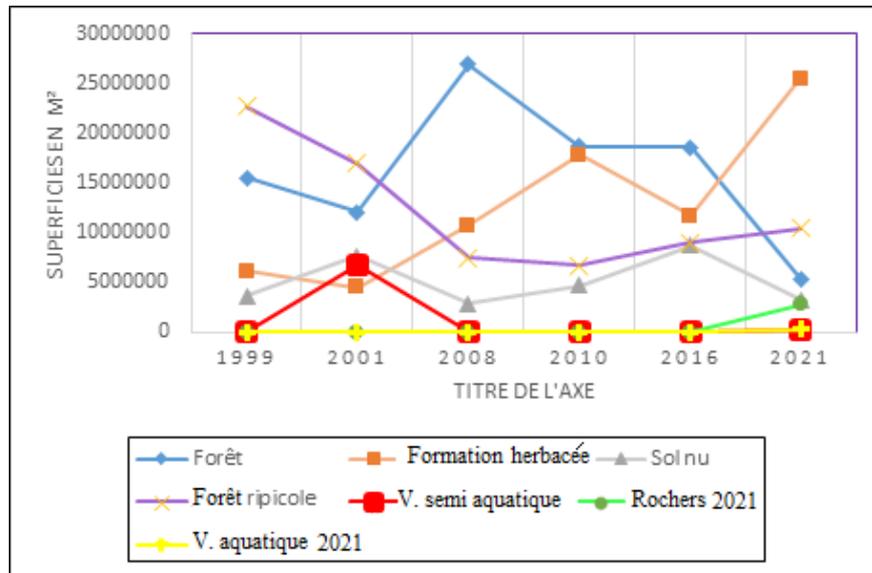


Figure 5 : Évolution de l'occupation du sol du bassin versant de Ndrigi de 1999 à 2021

Source : analyse sur Envi, Arc Gis et Excel, par Kababo

La *Figure 5* indique qu'au début de l'observation, c'est la forêt ripicole qui avait une grande superficie plus que les autres, suivie de la forêt de terre ferme. Mais à la dernière année d'observation, c'est la formation herbacée qui a pris la tête de classement.

3-3-2. Détection du changement spatial (Thematic Change)

Ce type prend deux images de classification de la même scène prise à différents moments (1999 et 2021) et en identifie les changements des surfaces (*Figure 6*).

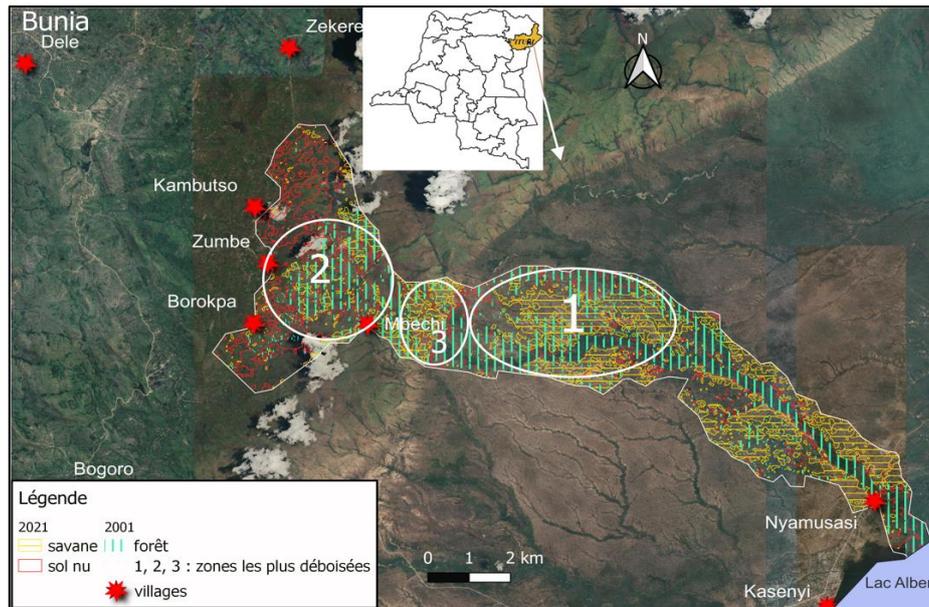


Figure 6 : Couverture du sol en 2001 et 2021

La **Figure 6** montre que les zones les plus déboisées se trouvent au centre, sur la montagne et au pied de la montagne. En utilisant le taux moyen annuel d'expansion spatiale (3), le changement s'exprime en pourcentage de proportion de chaque unité d'occupation du sol (**Tableau 4**).

Tableau 4 : Taux moyens annuels d'expansion spatiale (T)

	Forêt de terre ferme	Formation herbacée	Sol nu	Forêt ripicole
$t_2 - t_1$	22	22	22	22
lne	0,999999327	0,999999327	0,999999327	0,999999327
S_1	10417500	1108800	3698100	17610300
S_2	5420475	25439175	6062400	10503450
lnS_1	16,16	13,92	15,12	16,68
lnS_2	15,51	17,05	15,62	16,17
T	-2,97	14,24	2,25	-2,35

Les proportions des unités d'occupation des terres présentées dans le **Tableau 6** montrent que les changements annuels de la forêt de terre ferme et de la forêt ripicole sont négatifs au profit de la formation herbacée et de sol nu.

4. Discussion

Le bassin versant de Ndrigi connaît depuis ces trois dernières décennies des perturbations dues aux activités anthropiques. Conjointement à ce phénomène, les modifications climatiques en cours entraînent également de profonds bouleversements environnementaux [17]. Aussi, dans ce contexte, les pressions exercées sur les ressources naturelles sont de plus en plus grandes, accentuées notamment par l'exploitation des matériaux de construction et l'activité d'élevage et de l'agriculture. Il faut alors estimer les variations spatio-temporelles de l'occupation du sol pour diminuer cette pression. De ce fait, l'utilisation de la télédétection constitue un outil utile pour le suivi des couverts végétaux [18]. Les images satellitaires sont traitées en passant par le prétraitement, le calcul de NDVI puis la classification thématique pour détecter les changements.

4-1. Prétraitement des images et calcul de NDVI

La cartographie de l'occupation du sol du bassin versant de Ndrigi a posé problèmes de la forte nébulosité pendant la période des pluies. En effet, la nébulosité limite la capacité de développement géométrique et radiométrique des images [19]. Il faut donc un prétraitement qui a l'avantage d'être généralement plus précis dans l'identification des zones de changement spectral [20]. La correction radiométrique permet quant à elle de réduire les bruits d'images dus au capteur ou à l'atmosphère lié aux nuages, poussière atmosphérique, vent de sable, etc. [21]. Quant au mosaïquage, plusieurs études ont montré que la fusion d'images satellitaires, avant leurs traitements, procure les avantages dans l'étude du changement de couverture terrestre [22].

4-2. Classification thématique des images

La classification est facilitée par les données de terrain et les images de Google Earth. Ces dernières fournissent des précisions sur les zones d'études et permettent d'extraire les régions d'apprentissage (Region of Interest) [1]. La classification est réalisée en deux étapes, d'abord le calcul de NDVI, qui est aussi un bon indicateur pour le suivi régional de la végétation, car il reflète l'activité chlorophyllienne des surfaces, puis la classification par Maximum de vraisemblance [22, 23]. Les signatures spectrales observées ont sensiblement changé au niveau des classes au cours de ces années étudiées et ont ressorti sept classes d'occupation du sol à savoir celles de forêt de terre ferme, de forêt ripicole, de la formation herbacée, de marécage, de la végétation lacustre, de la roche dénudée et du sol nu. Ces classes montrent que les pixels sont bien rassemblés et cela permet un bon traitement d'analyse spatiale [22]. Les images bien classifiées permettent de rassembler les pixels en un nombre limité de classes correspondant aux grands éléments structuraux [24]. Enfin, une fusion « post-classification » a été adoptée pour ne pas altérer l'information spectrale originale. L'étape de post-classification permet d'atteindre les objectifs définis préalablement et de détecter les précisions de l'utilisateur et les erreurs à minimiser [23]. Pour ce travail les précisions de l'utilisateur (89 %) et les coefficients de Kappa (0,94) sont élevés car les erreurs par commission et par omission étaient minimisées.

4-3. Détection du changement (Change Detection)

4-3-1. Évolution spatiale du bassin versant de Ndrigi

Selon la *Figure 3* les classes d'occupation du sol ont connu la prédominance de la forêt ripicole en 1999, la forêt de terre ferme en 2001 et 2008, tandis que la formation herbacée a dominé en 2016 et 2021. L'évolution de l'occupation du sol est un indicateur pertinent, d'une combinaison d'activités humaines que les sociétés déploient dans l'espace et auxquelles elle réagit avec une certaine inertie et de facteurs naturels [25]. Cet argument est soutenu par les recherches d'autres auteurs [26, 27], et confirmé par les témoignages du chef du groupement Bedu Ezekere et la population locale. Pour ces derniers l'évolution des classes d'occupation du sol est consécutive à la fluctuation démographique mais surtout aux activités de subsistances telles que l'élevage, l'exploitation des matériaux de construction et l'exploitation de bois d'œuvre. Toutefois, les causes de la dégradation des forêts ne sont pas toujours facilement identifiables d'emblée, il faut leurs suivi permanent [14]. L'étude de l'occupation du sol est reconnue comme un élément privilégié de l'analyse spatiale et de reflet des mutations spatiales qui se sont succédées dans le temps [25].

4-3-2. Détection du changement (Change Detection)

Les études sur le changement dans l'occupation permettent d'expliquer les tendances actuelles dans les processus de la perte de la biodiversité d'une région déterminée [28]. Pour rappel, les superficies des sept classes d'occupation du sol détectées dans le bassin versant de Ndrigi ont évolué de manière différente entre 1999 et 2021. La classe de rocher est apparue en 2021, celle de marécage est observée, en 2001 et en 2021.

De manière globale, l'évolution montre une diminution de superficie des forêts au profit des zones savanicoles (*Figure 3 et Tableau 4*). Ces déforestations s'expliquent par la présence permanente de l'homme. La progression des formations herbacées dans un milieu jadis couvert par la forêt favorise la dégradation des espaces naturels et les causes sont souvent anthropiques [29]. C'est pourquoi la solution à proposer est entre autre celle de diminuer l'usage de feu pour éviter le « pyroclimax » [19], car la tendance régressive des ressources naturelles engendre un déséquilibre total entre l'homme et son environnement si les dispositions ne sont pas prises à temps [30]. Par la même analyse, entre 2001 et 2008, il s'est observé une reforestation. La population du bassin versant de Ndrigi enquêtée l'a justifiée par l'absence d'exploitation des terres car depuis le mois de mai 1999, deux peuples voisins des territoires de Djugu et d'Irumu sont entrés en guerre et toute la région était vidée de sa population pour se réfugier dans les grands centres tels qu'Ezekere » ou Kasenyi [31], en favorisant alors la reprise de la végétation naturelle à leurs absences [32]. Cette observation montre qu'il est possible de trouver la solution à la dégradation environnementale : Sans laisser à exploiter le sol, la population peut gérer l'environnement par zonage utilisé en jonction avec d'autres méthodes de gestion environnementale telles que la conservation, la restauration écologique, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, etc. Suite à la validation de détection de changement de la même scène prise en 1999 et en 2021 (Tableau 6) [33], le résultat montre que les Taux moyens annuels d'expansion spatiale de la forêt de terre ferme (-2,97) et de la forêt ripicole (-2,35) sont négatifs et donc dangereuse pour l'environnement au profit de la formation herbacée (14,24) et de sol nu (2,25) [34]. La détection des changements doit pour ce faire être effectuée en temps opportun et avec précision pour permettre une gestion bien planifiée [35], comme ce qui est proposé et appliqué dans la région des lacs Kivu et Tanganyika [36]. De la même façon, la dynamique de l'environnement modélisé dans le bassin versant de Ndrigi servira de l'outil de planification et de la gestion rurale à l'instar du model proposé en Wallonie [37], que d'autres chercheurs peuvent utiliser pour créer un algorithme mathématique sur la base de programmation linéaire en plusieurs années, afin de résoudre les problèmes environnementaux qui s'y poserait [38].

5. Conclusion

Cette étude avait pour objectif de décrire les aspects actuels et la dynamique spatiale de l'occupation du sol dans le sous bassin de la rivière Ndrigi en vue de prévenir et de limiter les catastrophes qui en découleraient. La méthode d'observation et la technique d'analyse des images ont montré que les classes d'occupation du sol se sont développées différemment selon les années, avec la prédominance de la forêt ripicole en 1999, la forêt de terre ferme en 2008 et 2016, la formation herbacée en 2016 et 2021. Les taux d'expansion spatiale de -2,97 pour la forêt de terre ferme, -2,35 pour la forêt ripicole, 14,24 pour la formation herbacée et 2,25 pour le sol nu indiquent que le taux pour la formation herbacée est important au détriment de celui des forêts, donc une série régressive du couvert végétal. D'où, la nécessité d'analyser d'autres paramètres de l'occupation du sol, de l'évolution démographique, phytosociologique et climatique, et en priorité des stratégies de conservation et d'aménagement et du milieu.

Références

- [1] - E. ASSEMIAN et *al.*, Analyse du bassin versant du Kô, à l'ouest de la Côte d'Ivoire l'image radar à synthèse d'ouverture (RSO) du satellite ERS2, *Geo-Eco-Trop.*, 44 (2) (2020) 279 - 292
- [2] - N. KÄYHKÖÄ, N. FAGERHOLMA, B. S. ASSEIDB, A. J. MZEE, Dynamic land use and land cover changes and their effect on forest resources in a coastal village of Matemwe, Zanzibar, Tanzania, *Land Use Policy*, 28 (2011) 26 - 37
- [3] - A. TAPSOBA, K. KOKOU et Z. SANOU, dynamique spatiale d'occupation du sol à la périphérie du barrage de Bagré au Burkina Faso, *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 41 (2023) 66 - 82
- [4] - K. DJAGNIKPO, O. DRABO, P. O. AWA, C. E.D. DAPOLA, T. THIOU, K. TCHAMIE, Analyse de l'occupation du sol pour le suivi de l'évolution du paysage du territoire Ouatchi au sud-est Togo entre 1958 et 2015. *Cahiers du Cerleshs*, XXXI (55) (2017) 203 - 228
- [5] - H. SIRADJ, SIG et méthode AHP pour la prévision en planification urbaine « Analyse de l'adéquation des sites pour le développement urbain », Mémoire de master en Informatique, Université Larbi Tebessi—Tébessa, Algérie, (2021) 74 p.
- [6] - M. MBULUYO, Carte morphostructurale de la plaine de Kasenyi (Ituri — RD Congo), *Geo-Eco-Trop*, 42, 1 (2018) 8
- [7] - S. KOUTA et I. T. IMOROU, Analyse Quantitative des Changements d'Occupation des Terres dans le Bassin Cotonnier du Nord-Benin Vol. *International Journals of Sciences and High Technologies*, 17, N° 2 November (2019) 227 - 234 p.
- [8] - T. AÏCHA, S. LOUIS et S. JOSIAS, Préservation et Gestion Durable de la Zone Humide de Bagré : Analyse des Enjeux, Menaces et Défis Pour la Conservation de l'Ecosystème, (2023) 775 p.
- [9] - M.L. LEBLANC, Évaluation des impacts de l'urbanisation et des variations climatiques sur un bassin versant dans le sud-est du Nouveau-Brunswick : Humphrey Brook. Thèse de doctorat en étude de l'Environnement, Université de Moncton, Canada, (2013) 119 p.
- [10] - K. KPEDENOU, T. BOUKPESSI et T. K. TCHAMIE, Quantification des changements de l'occupation du sol dans la Préfecture de Yoto (sud-est Togo) à l'aide de l'imagerie satellitaire Landsat, *Rev. Sc. Env. Univ.*, Lomé (Togo), N° 13 (2016) 137 - 156
- [11] - R. M. CURTIS, "Access and use of forest resources: Evidence from common property forest management in Swaziland". *African Journal of Estate and Property Management*, 1 (1) (2014) 8 - 17
- [12] - L. J. BETTI, Les Relations Eau-Forêt en Afrique Centrale. African Forest Forum, Working Paper Series, Vol. (1) 8 (2011) 45 p.
- [13] - S. GBOMBELE, Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines de la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire) : Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou. Thèse de doctorat en Sciences de la Terre. Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2010) 296 p.
- [14] - B. TCHATCHOU, DJ. SONWA, S. IFO et A.M. TIANI, Déforestation et dégradation des forêts dans le Bassin du Congo : État des lieux, causes actuelles et perspectives. Papier occasionnel 120. Bogor, Indonésie : CIFOR., (2015) 47 p.
- [15] - M. DUROUSSEAU, Le constat : la biodiversité en crise. Biodiversité et évolution du droit de la protection de la nature, *Revue Juridique de l'Environnement*, (2008) 11 - 19
- [16] - S. TRAORE, S. DEMBELE, D. DEMBELE, N. DIAKITE et C. H. DIAKITE, Dynamique de l'occupation du sol et trajectoire du couvert végétal autour de trois sites miniers du Sud Mali entre 1988 et 2019, *Physio-Géo*, (17) (2022) 151 - 166
- [17] - V. GAMEREN, R. WEIKMANS et E. ZACCAI, L'adaptation au changement climatique, Éd. La Découverte, Paris, (2014) 123 p.

- [18] - B. MAMANE, Dynamique spatio-temporelle d'occupation du sol dans la Réserve Totale de Faune de Tamou dans un contexte de la variabilité climatique (Ouest du Niger) in *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 12 (4) (2018) 1667 - 1687
- [19] - V. DJOUFACK, Étude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI, Thèse de doctorat en géographie, Université de Bourgogne et Université de Yaoundé I, (2011) 303 p.
- [20] - C. TIESSE, Apport de la télédétection et des SIG pour le suivi spatiotemporel de l'occupation du sol et la cartographie de la sensibilité à l'érosion hydrique dans la région montagneuse du Tonkpi (ouest de la cote d'ivoire), Thèse en Sciences Agronomiques et Génie Rural, Institut National Polytechnique, Côte d'Ivoire, (2020) 170 p.
- [21] - E. WIEDERKEHR, Apport de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques. Elaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône. Géographie. Thèse de doctorat en géographie, Ecole normale supérieure de Lyon - ENS LYON, (2012) 287 p.
- [22] - J. N. KPOHA, H. B. AKOKPONHOUE, V. OREKAN et V. H. N'GUESSAN, Contribution de la télédétection et d'un SIG à la cartographie des unités de l'occupation du sol et ses changements face au problème d'inondation sur le plateau d'Allada au Bénin entre 1986-2020, *International Journal of Innovation and Scientific Research*, (65) (2) (2023) 164 - 177
- [23] - J. BETBEDER, Evaluation des données de télédétection pour l'identification et la caractérisation des continuités écologiques, Thèse, UEB, (2015) 357 p.
- [24] - Z. SOUIDI, A. HAMIMED et F. DONZE, Cartographie du risque de dégradation des terres en région semi-aride, Cas des Monts de Beni Chougrane dans le Tell occidental Algérien), in *Geo-Eco-Trop*, 38, 1 (2014) 85 - 102
- [25] - S. CORGNE, Étude des changements d'occupation et d'usage des sols en contexte agricole par télédétection et fusion d'informations. Géographie. Université Rennes 2, (2014) 137 p. + Annexes
- [26] - A. MAMA, B. SINSIN, C. DE CANNIERE et J. BOGAERT, Anthropisation et dynamique des paysages en zone soudanienne au nord du Bénin, *Tropicultura*, 31 (1) (2013) 78 - 88
- [27] - Y. J. N'GUESSAN, K. R. KABLAN, N. D. OUATTARA, K. G. C. DOUFFI, E. GNAHORÉ et M. KONÉ, Anthropisation et dynamique de l'occupation du sol de la forêt classée de la Sangoué au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire *Afrique SCIENCE*, 21 (6) (2022) 80 - 91
- [28] - R. E. A. ALMOND, M. GROOTEN, J. BIGNOLI, D. et T. PETERSEN, Rapport Planète Vivante 2022 - Pour un bilan « nature » positif. (Eds). WWF, Gland, Suisse, (2022) 115 p.
- [29] - T. LUBALEGA, Évolution naturelle des formations herbacées mises en défens à Ibi-village, sur le plateau des Batéké, en République Démocratique du Congo, thèse de Doctorat en sciences forestières, Université de Laval, (2016) 143 p.
- [30] - G. HOUNTO, S. MOUZOUN et I. YABI, Implications socio-environnementales de la dynamique d'occupation du sol des zones humides du site RAMSAR 1017, Sud-Ouest du Bénin, *Afrique SCIENCE*, 15 (4) (2019) 317 - 329
- [31] - M-S. GREGORY et C. PHUZUMOYA, Étude de l'état initial n°3 : Production, commerce et exportation de l'or en Province Orientale, République Démocratique du Congo- Rapport OCDE, 9ème Forum sur les chaînes d'approvisionnement en minerais responsables, (2013) 35 p.
- [32] - E. G. BONKOUNGOU, Analyse du cadre de la gouvernance forestière en République Démocratique du Congo dans le contexte de la REDD+ : Diagnostic de base et propositions d'intervention, USAID, CARPE, UICN, Forest Carbon Partnership, (2013) 180 p.
- [33] - B. T. AGBANOU, O. VINCENT, A. DJAFAROU, M. PAEGELOW, B. TENTE, Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol en zone d'agriculture extensive : cas du secteur Natitingou-Boukoumbe au nord-ouest du Benin, *La géographie au service du développement durable*, Abomey-Calavi, Bénin, (2018) 22 - 34

- [34] - A. JACQUIN, Dynamique de la végétation des formations herbacées en lien avec l'usage des feux à. Analyse par série temporelle d'images de télédétection, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, (2010) 144 p.
- [35] - A. NDIAYE et P. NDIAYE, changement climatique, dégradation environnementale et quête d'utilisation des ressources naturelles, Fondation pour le Renforcement des Capacités en Afrique, Harare, 39 p.
- [36] - L. NIBIGIRA, Etude des risques naturels liés aux interactions entre les mouvements de masse et le réseau hydrographique dans la région des lacs Kivu et Tanganyika, Thèse de doctorat, Université de Liège, (2018) 245 p.
- [37] - M. MENNICHE, Etude théorique et numérique d'une classe de méthodes de points intérieurs pour la programmation linéaire, Thèse de Doctorat en Sciences en mathématique, Université Ferhat Abbas Setif-1, (2017) 79 p.
- [38] - A. MOSNIER, R. MANT, J. PIRKER, Modélisation des changements d'utilisation des terres pour la République Démocratique du Congo 2000–2030, Rapport du projet REDD-PAC, (2016) 105 p.