

OCCUPATION DU SOL DU SOUS-BASSIN DE NDRIGI DANS LE BASSIN VERSANT DU LAC ALBERT EN ITURI (REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO)

Par

Germain KABABO KAKANI

*Chef de Travaux à l'Institut Supérieur Pédagogique de Bunia
Mention : Géographie et Gestion de l'Environnement,*

Honoré BELESI KATULA

*Professeur à l'Université de Kinshasa, Faculté des Sciences et Technologies
Mention : Environnement*

Fils MAKANZU IMWANGANA

*Professeur à l'Université de Kinshasa, Faculté des Sciences et Technologies
Mention : Géosciences
Directeur Scientifique au Centre de Recherches Géologiques et Minières (CRGM)*

RESUME

Ce travail sur l'« Occupation du sol du bassin versant du lac Albert : Cas du sous bassin de Ndrigi en Ituri (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 en 2008 et 2016, 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. La précision globale moyenne de classification est 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 négative des activités anthropiques.

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

ABSTRACT

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. 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 environnementaux¹. Pour bien assurer cette recherche, nous avons d'abord recouru à la consultation bibliographique sur des phénomènes environnementaux en utilisant le système d'information géographique et la revue de littérature pour explorer l'état de lieu de la question au plan théorique, conceptuel et méthodologique². La présente recherche consacre son attention surtout sur l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol d'un bassin versant dans une région très peu explorée par les chercheurs à savoir le sous-bassin versant de Ndrigi un affluent du lac Albert³.

¹ Assemian E. 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.*, 2017, 44, (2) : 279-292.

² Djagnikpo K, Ousmane Drabo, Awa Pounyala Ouoba, Dapola Constant E. Da, Thiou Tanzidani 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 », in *Cahiers du Cerleshs*, 2017, XXXI (55), p.204.

³ Mbuluyo M., « Carte morphostructurale de la plaine de Kasenyi (Ituri - RD Congo) », *Geo-Eco-Trop*, 2018, 42, 1 p.8.

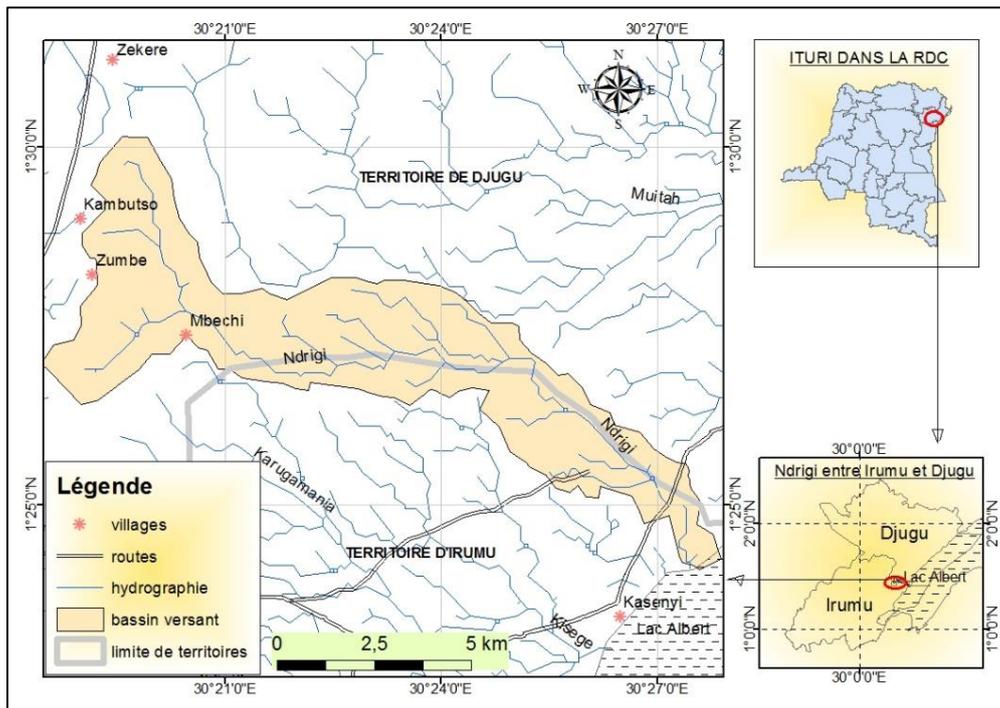
Ce thème se justifie par le fait que le milieu d'étude est un bassin lacustre et les lacs africains exercent des fonctions variées selon qu'ils sont dans un milieu rural ou urbain. Comme leur dégradation dépend de celle de leurs bassins versants, et que la dégradation de l'environnement en général, constitue un problème majeur auquel de nombreux pays font face, il est important d'y mener une étude. Cette situation de dégradation est aussi observée en RDC où les dernières décennies sont caractérisées par l'instabilité économique et politique, faisant que le contrôle de la dégradation des écosystèmes tant urbains que ruraux n'est pas pris en priorité⁴ ; pourtant c'est un phénomène visible et alarmant même dans nos milieux ruraux notamment dans le bassin versant de Ndrigi. C'est ce qui fait poser les questions sur les différents aspects de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Ndrigi et les changements y afférents observés actuellement sur le plan de la végétation. A ces questions les hypothèses proposent les réponses dont la plus cruciale stipule que les aspects de l'occupation du sol sont régressifs et les superficies des classes d'occupation du sol sont les changements les plus observés dans l'évolution environnementale. A partir des questions posées et des hypothèses qui en découlent la présente étude s'assigne comme objectif celui de « relever les aspects actuels de l'occupation du sol et de décrire leurs changements observés dans le bassin versant de Ndrigi ».

2. MATERIELS ET METHODE

2.1. Milieu d'étude

Le sous-bassin de Ndrigi est situé sur deux formes de relief : celle de la chaîne de Monts Bleus (1460m) d'où Ndrigi tire sa source, et de la plaine lacustre de Kasenyi dont l'altitude moyenne varie entre 600 et 700 m avant de se jeter dans le Lac, 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. 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 (Robert, 2000) 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.

⁴ Tchatchou B., et al., « Déforestation et dégradation des forêts dans le Bassin du Congo : État des lieux, causes actuelles et perspectives », Papier occasionnel 120, 2015, Bogor, Indonésie : CIFOR., p.23



Source : Digitalisation sur Arc Gis par Kababo

Figure 1 : Localisation régionale du bassin versant de Ndrigi

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'agriculture et au surpâturage.

2.2. Matériels d'acquisition et de traitement des données

2.2.1. Matériels

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 étaient 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 dans cette étude

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

Le présent travail est fondé sur la photo-interprétation assistée par ordinateur des données numériques spatiales (images satellitaires) en 2D et 3D, utilisant la méthode d'observation et la technique analytique. Pour 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) et la classification par Maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood).

Pour se rassurer de la qualité de la classification, le Coefficient Kappa « K » était calculé en utilisant la formule (1). Et la précision globale (Pg) était générée par la formule (2).

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

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

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 l'Equation 3.

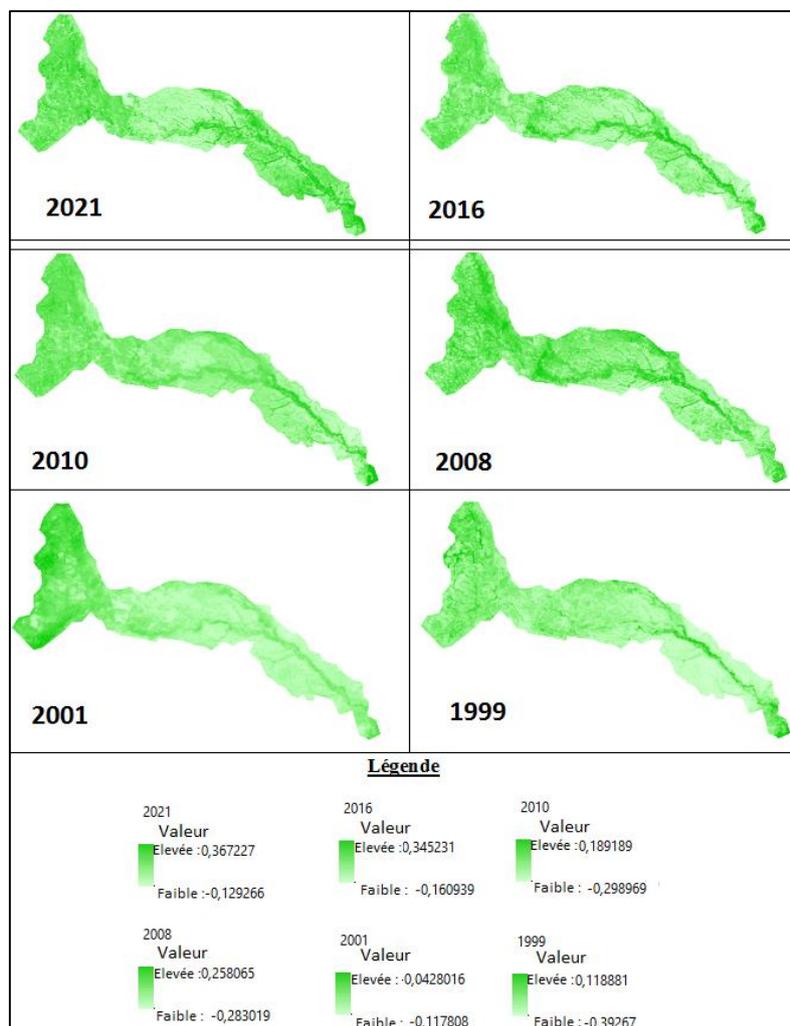
$$T = [(lnS_2 - lnS_1) / ((t_2 - t_1) \times lne)] \times 100 \quad (\text{Equation 3})$$

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. RESULTAT

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 3 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.



Source : Analyse sur Envi par Kababo

Figure 2 : Les NDVI du bassin versant de Ndrigi

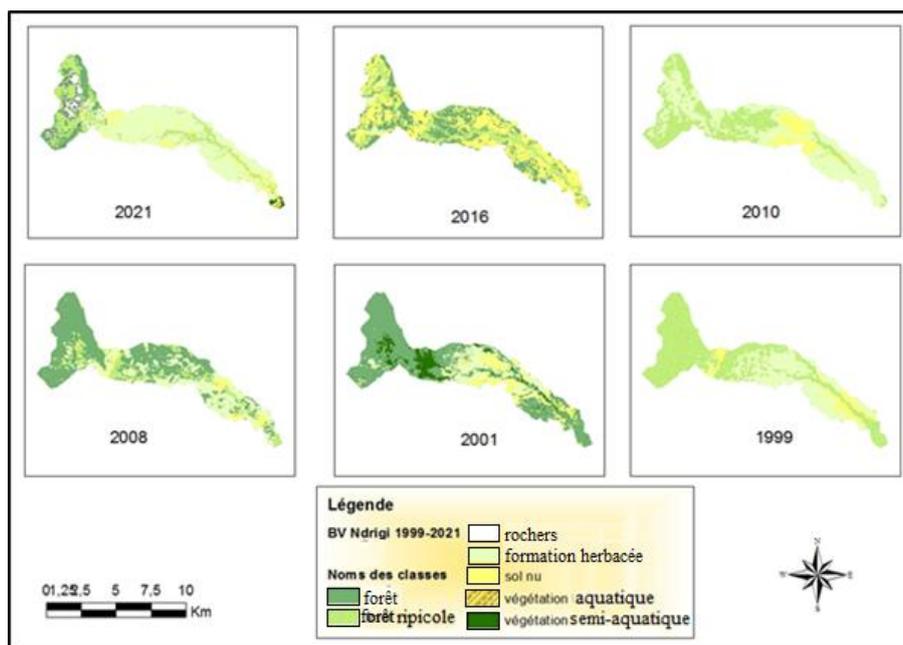
Tableau 2 : Valeurs de NDVI

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).



Source : Analyse sur Envi par Kababo

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

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% pour un coefficient de Kappa moyen de 0,94. Cette 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	Superficies en m ²						
	Années	1999	2001	2008	2010	2016	2021
Forêt		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 4, il ressort que la forêt 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.

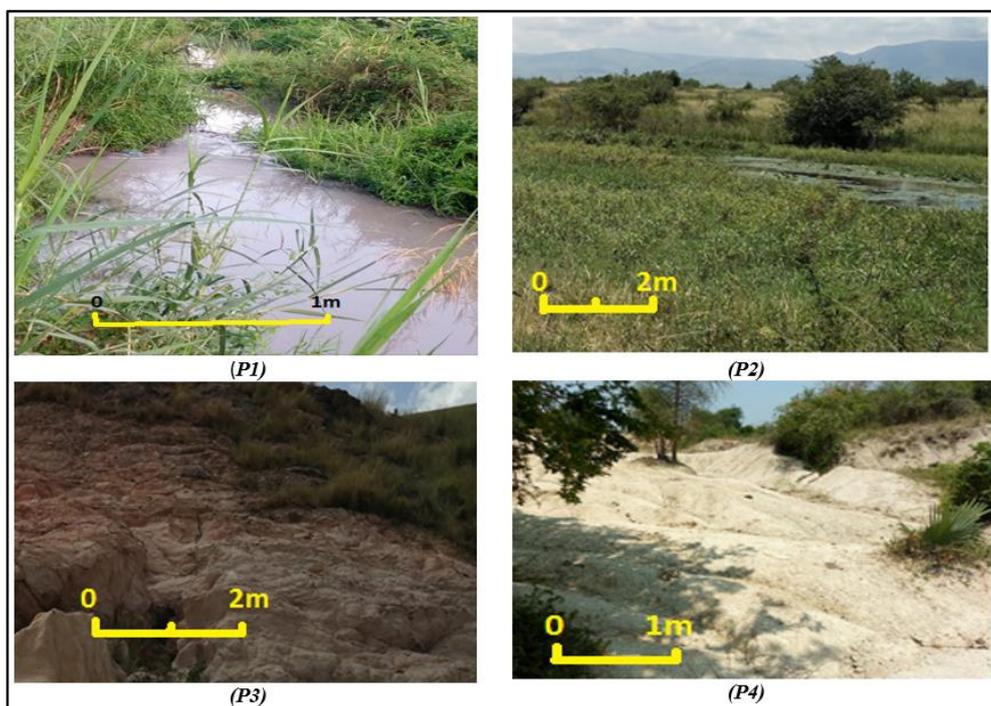


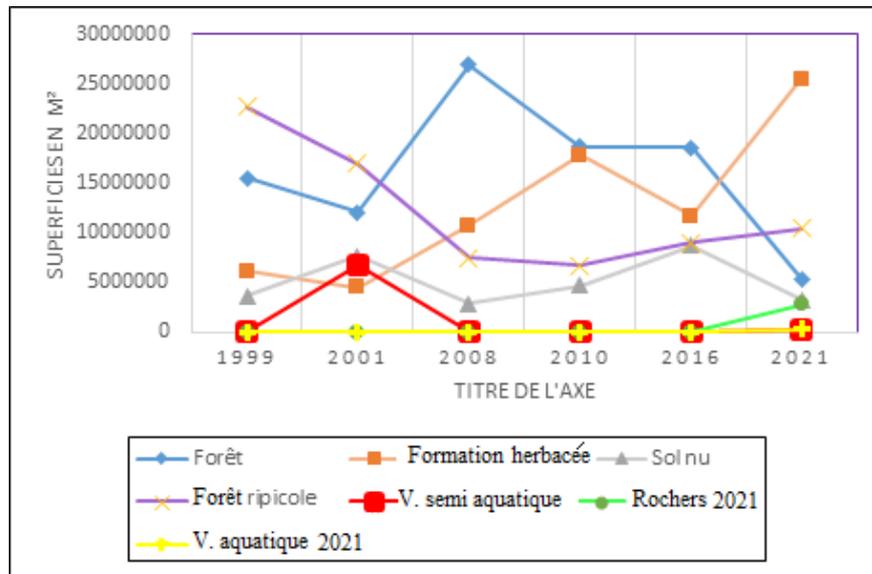
Figure 4 : Images de la couverture du sol dans la vallée de Ndrigi (P1) de la forêt ripicole, (P2) de la forêt ripicole dégradée combinée aux marécages, (P3) de la formation herbacée et du sol nu et (P4) du sol nu dominant la surface.

3.3. Détection du changement (Change Detection)

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. Evolution 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 savaniques (Figure 5).



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

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

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. 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 identifie les changements entre elles en terme de surface. En utilisant le taux moyen annuel d'expansion spatiale (formule 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	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 4 montrent que les changements annuels de la forêt 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 environnementaux⁵. Aussi, dans ce contexte, les pressions exercées sur les ressources naturelles sont de plus en plus grandes, accentuées notamment par une 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 végétaux⁶. 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 pose plusieurs problèmes dont celui de la forte nébulosité pendant la période des pluies. Ce type de difficulté est rencontré aussi par Djoufack⁷ pendant son étude à Yaoundé. En effet, la nébulosité limite la capacité de développement géométrique et radiométrique des images. Il faut donc un prétraitement qui, selon Tiesse⁸, a l'avantage d'être généralement plus précis dans l'identification des zones de changement spectral. La correction radiométrique permet quant à elle de réduire les bruits d'images dus au capteur ou à l'atmosphère liée aux nuages, poussière atmosphérique, vent de sable, etc.⁹.

⁵ Gamera V. et al., *L'adaptation au changement climatique*, Éd. La Découverte, 2014, Paris p.11.

⁶ Mamane B., « 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, p.1669.

⁷ Djoufack V., *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, p. 192.

⁸ Tiesse C., *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, INP, Côte d'Ivoire, 2020, p.10.

⁹ Idem, p.42.

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 terrestre¹⁰.

4.2. Classification thématique des images

La classification est facilitée par les données de terrain et les images de Google Earth. Ces derniers fournissent des précisions sur les zones d'études et permettent d'extraire les régions d'apprentissage (Region of Interest)¹¹. Cette classification est réalisée en deux étapes notamment 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 et la classification par Maximum de vraisemblance^{12,13}. 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 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 spatiale¹⁴. Selon Souidi¹⁵, les images bien classifiées permettent de rassembler les pixels en un nombre limité de classes correspondant aux grands éléments structuraux. Enfin, une fusion « post-classification » a été adoptée pour ne pas altérer l'information spectrale originale. Betbeder¹⁶ soutient cette étape de post-classification car, selon lui, permet d'atteindre les objectifs définis préalablement et de détecter les précisions de l'utilisateur et les erreurs à minimiser. 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.

¹⁰ Péloquin S., *Utilisation de la télédétection, des SIG et de l'intelligence artificielle pour déterminer le niveau de susceptibilité aux mouvements de terrain : application dans les Andes de la Bolivie*, Thèse de doctorat en Télédétection, Université de Sherbrooke. 1999, p.95.

¹¹ Assemian E. 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.*, 2020, 44, (2), p.285.

¹² Derdjini H., *Cartographie des changements de l'occupation du sol dans la plaine de la Mitidja à partir des images Landsat*, Mémoire de Master, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, Algérie, 2017, p.10.

¹³ Betbeder, J., *Evaluation des données de télédétection pour l'identification et la caractérisation des continuités écologiques*, Thèse de doctorat en géographie, Université Européenne de Bretagne, 2015, p.35.

¹⁴ Derdjini H., *op. cit.*, p.23.

¹⁵ Souidi Z., « *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*, 2014, 38, 1, n.s. p.92.

¹⁶ Betbeder, J., *op. cit.*, p.199.

4.3. Détection du changement (Change Detection)

4.3.1. Evolution 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 en 2001 et 2008, tandis que la formation herbacée a dominé en 2016 et 2021. Cette évolution de l'occupation du sol est selon Paegelow¹⁷, 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. Son argument est soutenu par Blanc¹⁸ et Vintrou¹⁹ 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. Ces justifications, selon Tchatchou et *al.*²⁰ (2015), ne sont pas suffisantes car, les causes de la dégradation des forêts ne sont pas toujours facilement identifiables d'emblée. Il faut leur suivi permanent. Corgne²¹ considère que 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 succédé dans le temps.

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 déterminée²². 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. Toutefois, 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 savaniques (Figure 3 et Tableau 2). 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

¹⁷ Paegelow, *Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective*, Tome I. Thèse, Université de Toulouse, 2004, p.15.

¹⁸ Blanc P., *Développement de méthodes pour la détection de changement. Sciences de la Terre*, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1999, p.34

¹⁹ Vintrou E., *Analyse de séries temporelles d'images satellite à basse résolution spatiale pour la détection des changements d'occupation du sol au mali*, ENSAT, Université de Toulouse, 2008, p.46

²⁰ Tchatchou et *al.*, *op. cit.*, p.72

²¹ Paegelow, *op. cit.*, p.6.

²² Almond, R.E.A., Grooten, M., Juffe Bignoli, D. et Petersen, T., WWF, Rapport Planète Vivante 2022 - Pour un bilan « nature » positif. (Eds). WWF, Gland, Suisse. 2022, p.20

les causes sont souvent anthropiques²³. C'est pourquoi Djoufack²⁴ propose entre autre la solution de diminuer l'usage de feu pour éviter le « pyroclimax » et Hounto G. et al.²⁵ montrent par une simulation de l'occupation du sol de 2050 que la tendance régressive des ressources naturelles doit trouver des solutions afin d'éviter un déséquilibre total entre l'homme et son environnement.

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 comme Ezekere ou Kasenyi²⁶, en favorisant alors que la végétation naturelle soit refaite à leurs absences²⁷. 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.

Comme pour les classes d'occupation du sol, la détection de changement est validée par le calcul de Taux moyen d'expansion spatiale²⁸, de la même scène prise à différents moments (1999 et 2021). Le résultat du tableau 6 montre que les Taux moyens annuels d'expansion spatiale de la forêt (-2,97) et de la forêt ripicole (-2,35) sont négatifs au profit de la formation herbacée (14,24) et de sol nu (2,25). Cette expansion dangereuse pour l'environnement est due à la complicité des anthroposystèmes et de leur trajectoire dans le temps qu'il faut suivre pour bien gérer²⁹. Cette gestion réussie si la détection des changements

²³ Lubalega, T., *Évolution naturelle des formations herbacées mises en défens à Ibi-village, sur le plateau des Bateke, en République Démocratique du Congo*, thèse de Doctorat en sciences forestières, Université de Laval, 2016, p.8

²⁴ Djoufack V., *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, p. 192

²⁵ Hounto G., et al., *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, p.317.

²⁶ Gregory, et al., *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, p.7.

²⁷ Debroux, L. et al., *La forêt en République Démocratique du Congo Post-conflit : Analyse d'un Agenda Prioritaire*, Rapport collectif de la Banque Mondiale, 2007, p.18.

²⁸ Tabarroni, A., *Remote sensing and image interpretation change detection analysis: case study of Borgo Panigale and Reno Districts*, Master II. livello in Geographic Information System, 2009, 58p

²⁹ Jacquin A., *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, p.106

est effectuée en temps opportun et avec précision³⁰. Ce mode de gestion proposé est similaire à celui que Nibigira³¹ avait appliqué dans la région des lacs Kivu et Tanganyika. 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 comme le model proposé en Wallonie par Urdiain-Araiza³². Il a créé un algorithme mathématique sur la base de programmation linéaire en plusieurs années afin de résoudre les problèmes agricoles qui se posaient en Wallonie.

³⁰ Mousselmel Z., *Détection des changements dans les images satellitaires*, Mémoire de master en informatique, Université Ahmed Draia, Alger, 2020, p.2.

³¹ Nibigira L., *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, p.150

³² Urdiain-Araiza M., *Évaluation de deux méthodes de prédiction de l'occupation du sol basées sur les rotations de cultures dans une perspective de prédiction d'inondations boueuses*, Mémoire master, UC Louvain, 2018, p.17.

CONCLUSION

Cette étude de l'occupation du sol du bassin versant de Ndrigi en Ituri (République Démocratique du Congo) avait pour objectif de décrire les aspects actuels et la dynamique spatiale en vue de prévenir et de limiter les catastrophes qui en découleraient. Les méthodes de l'observation sur le terrain et la technique d'analyse des images couvrant la zone ont permis de mettre en place plusieurs modèles de classification issus de l'apprentissage automatique des algorithmes du maximum de vraisemblance utilisés.

Ces analyses ont montré que la moyenne des Indices par Différence Normalisée de la Végétation (NDVI) varie entre -0,23044517 et 0,28443483 soit une différence de 0,51488. 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 en 2008 et 2016, la formation herbacée en 2016 et 2021. Les pixels correctement classés représentent une moyenne de 6717 sur un total de 7025 pixels donnant ainsi une précision globale moyenne de 89 % pour un coefficient de Kappa moyen de 0,94. Ces précisions de classification ont permis de détecter le changement. Les changements observés sont validés par le Taux moyen d'expansion spatiale. Ils sont négatifs de -2,97 pour la forêt et -2,35 pour la forêt ripicole et positifs de 14,24 pour la formation herbacée et de 2,25 pour le sol nu. Les tendances observées à l'échelle de la superficie, comme à celle du taux de changement spectral dans l'ensemble sont semblables. Les classes ont subi, depuis le début 1999, d'importantes modifications. Une expansion spatiale au niveau de la formation herbacée dans toutes les années d'observation peut permettre de prendre des décisions d'aménagement.

A partir de ces résultats et de l'analyse des cartes d'occupation du sol, fruit d'une classification supervisée des images Landsat TM5 et ETM+5, nous constatons que l'évolution et le changement du paysage du bassin de la Ndrigi sont régressifs. Gérer l'environnement implique nécessairement d'anticiper, de pouvoir se projeter dans l'avenir. Ce qui pousse à lister les perspectives de recherche telles que : (i) Une structure d'étude spatio-temporelle dans la région pour permettre de prédire et limiter la dégradation environnementale ; (ii) la création d'une base de données opérationnelle socio-économico-environnementales géoréférencées devant aider à la planification de l'exploitation des ressources naturelles du bassin versant de la Ndrigi en particulier et par extension du lac Albert en général et qui servirait comme outil de prise de décision. Car tous ces résultats obtenus prouvent à suffisance qu'il reste encore beaucoup de choses à faire pour une évaluation totale de la problématique. D'où, la contribution de cette recherche est de poser les fondements pouvant servir de base à d'autres études. Il est donc nécessaire que des études soient menées pour faire notamment les analyses sur les autres paramètres de l'occupation du sol, sur les modèles numériques du terrain, les glissements de terrain, l'évolution démographique, phytosociologique et climatique, et en priorité sur les stratégies d'aménagement du milieu.

BIBLIOGRAPHIE

1. Achour S., *Détection de changement en imagerie satellitaire multi-temporelle pour le suivi et la surveillance de l'environnement*, Thèse, UDL, Sidi Bel, Algérie, 2021, 191p
2. Almond, R.E.A., Grooten, M., Juffe Bignoli, D. et Petersen, T., WWF., *Rapport Planète Vivante 2022 - Pour un bilan « nature » positif*. (Eds). WWF, Gland, Suisse, 2022, 115p.
3. Assemian E. 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.*, 2020, 44, (2) : 279-292
4. Betbeder, J., *Evaluation des données de télédétection pour l'identification et la caractérisation des continuités écologiques*, Thèse UEB, 2015, 357p.
5. Blanc P., *Développement de méthodes pour la détection de changement*. *Sciences de la Terre*, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1999, 205p.
6. Brendan S., *Rift du Lac Albert, Ouganda, Rift Est Africain : déformation, érosion, sédimentation et bilan de matière depuis 17 Ma*. *Sciences de la Terre*, Université Rennes 1, 406p + Annexes, 2015.
7. Corgne S., *Étude des changements d'occupation et d'usage des sols en contexte agricole par télédétection et fusion d'informations*, *Géographie*. Université Rennes 2, 2014, 137p + Annexes.
8. Debroux, L., et al., *La forêt en République Démocratique du Congo Post-conflit : Analyse d'un Agenda Prioritaire*, Rapport collectif de la Banque mondiale, 2007, 82p.
9. Derdjini H., *Cartographie des changements de l'occupation du sol dans la plaine de la Mitidja à partir des images Landsat*, Mémoire de Master, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, Algérie, 2017, 78p.
10. Djagnikpo K, Ousmane Drabo, Awa Pounyala Ouoba, Dapola Constant E. Da, Thiou Tanzidani 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*, 2017, XXXI (55), pp.203-228.
11. Djoufack V., *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, 303p.
12. Gameren V., Weikmans R. et Zaccai E., *L'adaptation au changement climatique*, Éd. La Découverte, Paris, 2014, 123p.
13. Gregory M-S., Phuzumoya C., *Étude de l'état initial n°3 : Production, commerce et exportation de l'or en Province Orientale, République Démocratique du Congo*, Rapport OCDE, 9^{ème} Forum sur les chaînes d'approvisionnement en minerais responsables, 2013, 35p.
14. Hounto G., Mouzoun S. et Yabi I., « 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.

15. Jacquin A., *Dynamique de la végétation des formations herbacées en lien avec l'usage des feux à l'échelle régionale. Analyse par série temporelle d'images de télédétection*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010, 144p.
16. Lubalega, T., *Évolution naturelle des formations herbacées mises en défens à Ibiwillage, sur le plateau des Bateke, en République Démocratique du Congo*, thèse UNIKIN et Université de Laval, 2016, 134p.
17. Maki J.C et Dewitte O., « Vers un inventaire des glissements de terrain et des éléments à risque sur les versants du Rift à l'ouest du lac Kivu (RDC) », *Géo-Eco-Trop*, Tome 1, 2014, pp. 137-154.
18. Mamane B., « 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) : 1667-1687, August 2018, disponible sur <http://www.ifgdg.org>.
19. Mbuluyo M., « Carte morphostructurale de la plaine de Kasenyi (Ituri – RD Congo) », *Geo-Eco-Trop*, 2018, 42, 1 : 1-18.
20. Mousselmel Z., *Détection des changements dans les images satellitaires*, Mémoire de master en informatique, Université Ahmed Draïa, Alger, 2020.
21. Nibigira L., *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, 245p.
22. Paegelow, *Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective*, Tome I. Thèse, Université de Toulouse, 2004, 211p.
23. Palmberg C. et al., « Gestion durable des forêts et de la faune sauvage en Afrique : Améliorer la valeur, les avantages et les services », FAO, Vol. 30, N°2, 2016.
24. Péloquin S., *Utilisation de la télédétection, des SIG et de l'intelligence artificielle pour déterminer le niveau de susceptibilité aux mouvements de terrain : application dans les Andes de la Bolivie*, Thèse de doctorat en Télédétection, Université de Sherbrooke, 1999, 193p.
25. Souidi Z HAMIMED A. et DONZE F., « 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*, 2014, 38, 1, n.s. : 85-102.
26. Tabarroni, A., *Remote sensing and image interpretation change detection analysis: case study of Borgo Panigale and Reno Districts*, Master II. livello in Geographic Information System, 2009, 58p.
27. Tchatchou B, Sonwa DJ, Ifo S. et Tiani AM., « Déforestation et dégradation des forêts dans le Bassin du Congo : État des lieux, causes actuelles et perspectives ». Papier occasionnel 120. Bogor, Indonésie : CIFOR., 2015, 47p.

28. Tiesse C., *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, INP, Côte d'Ivoire, 2020, 170p.
29. Urdiain-Arraiza M., 2018, *Évaluation de deux méthodes de prédiction de l'occupation du sol basées sur les rotations de cultures dans une perspective de prédiction d'inondations boueuses*, Mémoire master, UC Louvain, 2018, 94p.
30. Vintrou E., *Analyse de séries temporelles d'images satellite à basse résolution spatiale pour la détection des changements d'occupation du sol au mali*, ENSAT, Université de Toulouse, 2008, 68p.