



Mise à contribution des automates cellulaires et de la chaîne de MARKOV dans la modélisation de l'occupation du sol dans les bassins versants aval de Lom Pangar

Dr. NDIKWÉ DOURWÉ Maurice. Enseignant-Chercheur à l'Université de Bertoua. Département de Géographie et Géomatique

Dr. ANABA BANIMB Christian Robert. Enseignant-Chercheur à l'Université de Ngaoundéré. Département de Géographie

Pr. AOUDOU DOUA Sylvain. Enseignant-Chercheur à l'Université de Ngaoundéré. Département de Géographie

Résumé : L'anthropisation des écosystèmes est devenue un problème majeur qui impacte la biodiversité dans le monde. Bien aborder cette problématique nécessite le suivi de l'utilisation des terres. Dans les bassins versants aval de Lom Pangar, la conversion des unités paysagères s'est intensifiée depuis la mise en eau de l'ouvrage hydraulique en 2015. Dans ce contexte, la prise de décisions pour l'utilisation rationnelle des ressources naturelles devient difficile. Ainsi dit, une étude visant à générer des informations sur l'évolution des types d'occupations du sol a été menée. L'approche méthodologique a consisté à la collecte, au traitement et à l'analyse des données géospatiales sous ERDAS (traitement d'image), IDRISI (Projection) et QUANTUM GIS (montage et finition des documents graphiques). Il ressort de cette étude que l'amplification de l'exploitation de l'or et l'arrivée massive des pêcheurs dans la localité d'Ouami pendant et après la mise en eau sont les principaux facteurs des mutations spatiales qui ont conduit à l'anthropisation de Lom Pangar. Ce constat a conduit à la mise en place de la modélisation des types d'occupation du sol en 2030 à travers l'algorithme CA_Markov. Les unités d'occupation du sol à l'échelle du Buffer (5 km) se présentent ainsi qu'il suit : forêt/galerie (22,63%) ; savane arborée (19,44%) ; savane arbustive (16,78%) ; savane herbeuse/champ (0,92%) ; îlot de bois mort (9,50%) ; le sol nu (0,29%) ; le bâti (0,29%) ; plan d'eau (30,15%). Dans ce contexte, la mise sur pied d'un plan de gestion devient un impératif.

Most clés : Télédétection, CA Markov, Dynamique, Modélisation, Lom Pangar

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.18862900>

1 Introduction

La biodiversité planétaire est perturbée par les activités humaines pour répondre aux besoins socio-économiques Fahrig (2003). La problématique de l'anthropisation des écosystèmes occupe une place importante dans les pays en voie de développement. Les conséquences des activités humaines sur la biodiversité suscitent des interrogations fortes (Scouvert et Lambin, 2006 ; Toko, (2008). La FAO (2001) identifie l'Afrique tropicale comme la plus durement touchée par cette crise environnementale. Au Cameroun, plusieurs travaux visant à mesurer les mutations spatiales ont été effectués par Aoudou (2010) ; Djoufack (2012) ; Gueguim (2018).

En 2013, l'État du Cameroun a entrepris la mise en œuvre du barrage hydroélectrique en aval des bassins versants de Lom Pangar, avec pour objectif de réguler la Sanaga en période d'étiage. La mise en eau de cet ouvrage hydraulique de grande importance, a accentué la dynamique des unités d'occupation du sol. Cette forte pression anthropique amène à s'interroger sur le devenir de cet espace notamment en termes de types d'occupation du sol. Dans ce contexte, la prise de décision par rapport à la gestion des terres dans les bassins versants aval de Lom Pangar devient extrêmement difficile. Doter les décideurs d'un outil d'aide à la décision apparaît comme un impératif. L'objectif de cette étude est de modéliser l'occupation du sol en 2030 dans cet espace devenu très attractif.

2 Matériels et méthodes

2.1 Périmètre d'étude

L'étude est menée à l'Est Cameroun, plus précisément dans les bassins versants aval de Lom Pangar (BVALP). Pour minimiser les marges d'erreur dans le processus simulation de l'occupation du sol à l'horizon 2030, le périmètre d'étude a été réduit à un Buffer de 5 km délimité autour de la retenue d'eau de Lom Pangar et s'étale sur 186 348,24 ha (figure 1).

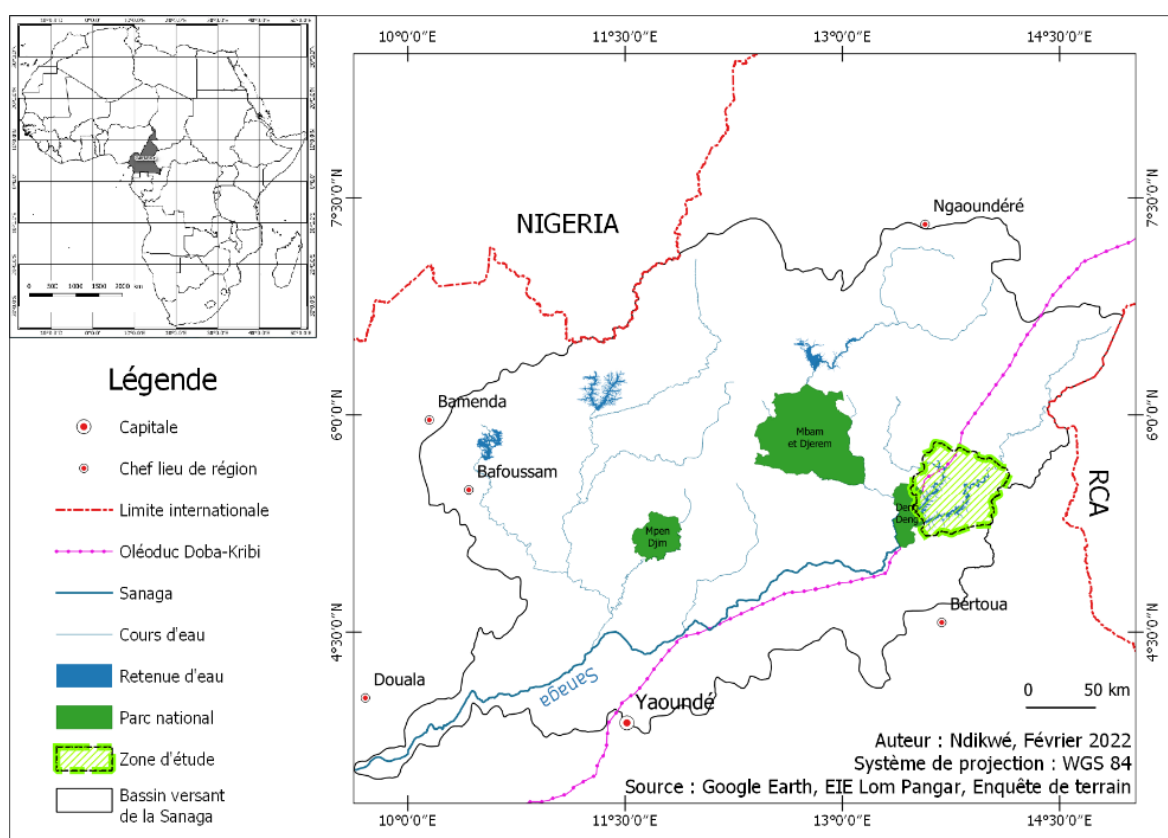
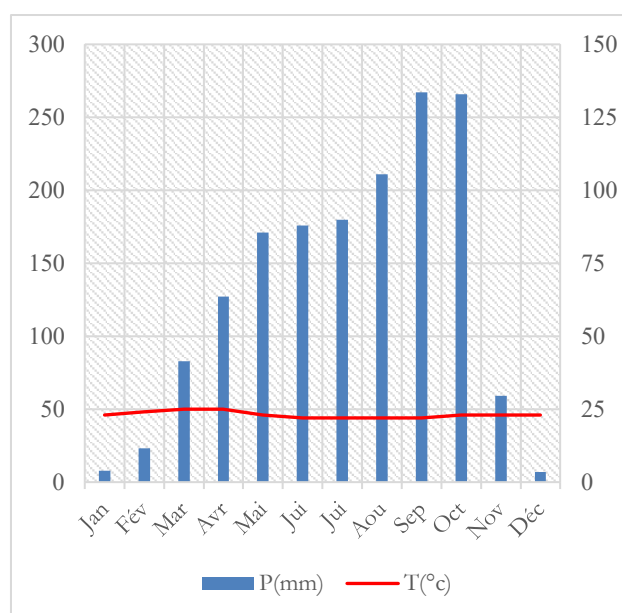


Figure 1. Localisation du BVALP

Le climat est caractérisé par deux (02) saisons : une saison sèche qui va de Décembre à Février avec une température moyenne de 23,08°C. La saison pluvieuse compte neuf (09) mois. Elle s'étale de Mars à Novembre. Les mois d'Août, Septembre et Octobre sont les mois de fortes pluies où les précipitations totales annuelles peuvent atteindre 267 mm (figure 2).



Source : Station de Bétaré-Oya, 2019

Figure 2. Diagramme ombrothermique

Lom Pangar est une zone de contact forêt-savane avec un relief peu accidenté dont les altitudes varient entre 650 à 950 m.

2.2 Données géospatiales mises à contribution

Dans le cadre de cette étude, cinq (05) images satellites ont été exploitées : deux (02) scènes LANDSAT de 2000 et 2013 et trois (03) scènes SENTINEL 2A de 2015 ; 2017 et 2020. Ces données géospatiales nous ont fourni des informations sur l'état des unités d'occupation du sol avant la mise en eau du barrage de Lom Pangar (2000 ; 2013). Les scènes SENTINEL 2A nous ont permis d'apprécier l'évolution des types d'occupation du sol pendant et après la mise en eau de l'ouvrage (2015 ; 2017 et 2020). Ces données présentent des caractéristiques distinctes (tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques des principales données géospatiales retenues dans le cadre de cette étude

Capteur	Date	Résolution spatiale	Identifiant de la donnée
LANDSAT	2000	30m	LE07 L1TP 184056 20000205
	2013		LC08 L1TP 184056 20131217
SENTINEL 2A	2015	20m	L1C_T33NUF_A002664_20151226
			L1C_T33NUG_A002664_20151226
	2017		L1C_T33NUF_A008527_20170208
			L1C_T33NUG_A008527_20170208
	2020		L1C_T33NUF_A018537_20200109
			L1C_T33NUG_A018537_20200109

2.3 Observation de terrain

Une descente sur le terrain a été effectuée dans le cadre de cette étude. Celle-ci nous a permis de faire des prises de vue et de lever les parcelles test en utilisant un récepteur de poche afin de valider les résultats des traitements des images satellites retenues.

3 Méthode de traitement des images satellitaires

L'application ERDAS IMAGINE (2013) a été mise à contribution pour traiter les données satellites. Cette opération est structurée en deux (02) phases. L'opération de prétraitement constitue la première étape. Cette étape a consisté à l'assemblage des différentes bandes pour en faire un MetaData. S'est suivi l'extraction de la zone d'étude. C'est à la suite de celle-ci que les compositions colorées ont été appliquées afin de procéder à la visu-interprétation. La classification supervisée est la principale opération de traitement que nous avons appliquée. Son but est de définir les propriétés des signatures spectrales de chacune des classes thématiques au moyen d'échantillons de l'image de classes connues (Bénié, 2004). L'algorithme Maximum de Vraisemblance a été

convoqué pour discriminer les unités d'occupation du sol. Il estime la moyenne et la variance à partir des parcelles d'entraînement.

3.1 Analyse de la dynamique des unités d'occupation du sol

3.1.1 Taux de Changement Global (TG)

Taux de Changement Global (TG)

Le taux de changement global des superficies des classes d'occupation du sol entre deux années Bernier (1992) est couramment employé pour mesurer la croissance des agrégats macroéconomiques entre deux périodes (Mama *et al.*, 2003). Il est donné par la formule suivante : $TG = (S2-S1)/(S1) \times 100$.

3.1.2 Modélisation de l'occupation du sol

La chaîne de Markov fait partie des modèles stochastiques qui tendent à rendre compte de la variabilité des phénomènes à l'aide de probabilités de transition (Lopez *et al.*, 2001). Markov en 1907 met en évidence quatre (04) hypothèses pour prédire la dynamique d'un phénomène : tout le passé du système se trouve résumé dans son état au dernier moment où on le connaît ; c'est un processus discret ; c'est un processus homogène dans le temps ; le nombre d'états possibles du système est fini, ce nombre sera noté r .

La conversion d'une unité d'occupation du sol dépend aussi de l'unité voisine. La chaîne de Markov n'intègre cependant pas ce paramètre. Ainsi, pour combler ce manquement, nous avons convoqué les Automates Cellulaires, qui sont un algorithme de simulation des unités d'occupation du sol qui prend en compte l'effet de voisinage. En amont de toute chose, signalons que la simulation de l'occupation du sol est un exercice délicat et doit être abordée avec beaucoup de recul. Conscient de cette réalité, nous avons restreint l'analyse à un Buffer de 5 km autour de la zone d'attraction pour réduire les marges d'erreur. Le schéma méthodologique relatif à cet exercice est structuré comme suit (figure 3).

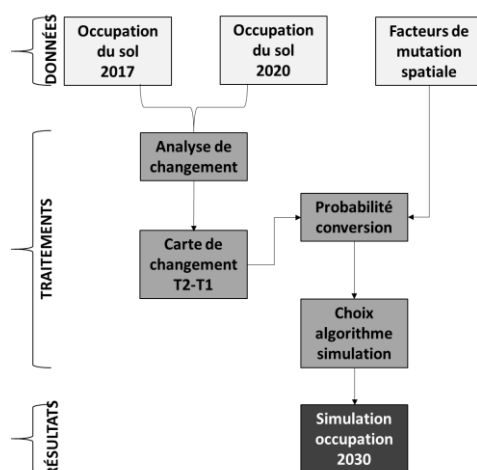


Figure 3. Schéma méthodologique de projection de l'occupation du sol (2030)

4 Résultats

4.1 Deux (02) facteurs principaux commandent l'artificialisation du paysage à Lom Pangar

4.1.1 L'exploitation de l'Or

L'orpaillage (figure 4) est une activité ancienne dans les bassins versants aval de Lom Pangar. Cependant cette activité s'est accentuée à la veille de la mise en eau de l'ouvrage, suite à la campagne d'exploitation massive de l'Or lancée par l'État camerounais dans l'optique d'éviter l'ennoiment de ce minerai après la mise en eau.



Source : Ndikwé, avril 2020. 14,06929E ; 5,62375N

Figure 4. Bulldozer dans une mine à ciel ouvert (chantier aurifère) de Bétaré-Oya

La photo 4 met en évidence un Bulldozer dans une mine à ciel ouvert dans la localité de Bétaré-Oya. Le Bulldozer est un engin très sollicité dans les chantiers aurifères, car peut excaver les couches minéralisées à un temps réduit. L'exploitation des photographies aériennes d'avant et d'après la mise en eau nous a permis d'apprécier qualitativement l'étalement des puits aurifères le long du cours d'eau Lom (figure 5 et 6).



Figure 5. Image satellite BING du chantier aurifère de Bétaré-Oya (2013)



Figure 6. Image satellite ESRI du chantier aurifère de Bétaré-Oya (2020)

Les figures 5 et 6 mettent en exergue une portion de la localité de Bétaré-Oya. Il s'agit des images satellites de type BING à gauche et ESRI à droite acquise à la veille et après la mise en eau du barrage hydroélectrique de Lom Pangar. Les taches blanchâtres renseignent sur l'emprise spatiale des puits aurifères. Force est de constater que la proportion des chantiers aurifères n'était pas considérable en 2013. En revanche, en 2020 la proportion desdits chantiers a considérablement augmenté.

4.2 Activité de pêche

Depuis la mise en eau du barrage, 10 000 pêcheurs (MINEPIA, 2017), pour la plupart venus de l'Extrême-Nord Cameroun, se sont installés aux alentours du réservoir du barrage, où la pêche est bonne. La plupart vivent à Ouami, et ils sont désormais plus nombreux que les autochtones (figure 7).



Source : Ndikwé, avril 2020. 13,56695E ; 5,25030N

Figure 7. Aperçu de la localité d'Ouami

La figure 7 met en exergue en arrière-plan le bâti de la ville d'Ouami, constitué en majorité des bois prélevés dans le parc de Deng-Deng de façon clandestine (observation de terrain). Au premier plan cette prise de vue laisse observer une piste agricole qui mène à l'ouvrage hydraulique de Lom Pangar, situé à 30 km de là.

La mise à contribution des images satellites a été d'une grande utilité dans cette rubrique. Elles nous ont permis de suivre l'étalement de l'espace bâti de 2000-2013-2015-2017-2020. De ce fait, le tableau 2 récapitule l'évolution de l'espace bâti dans la localité d'Ouami. La figure 8 présente découle du tableau 2. Elle met en évidence l'ordre croissant de l'espace bâti dans la localité d'Ouami de 2000-2013-2015-2017-2020.

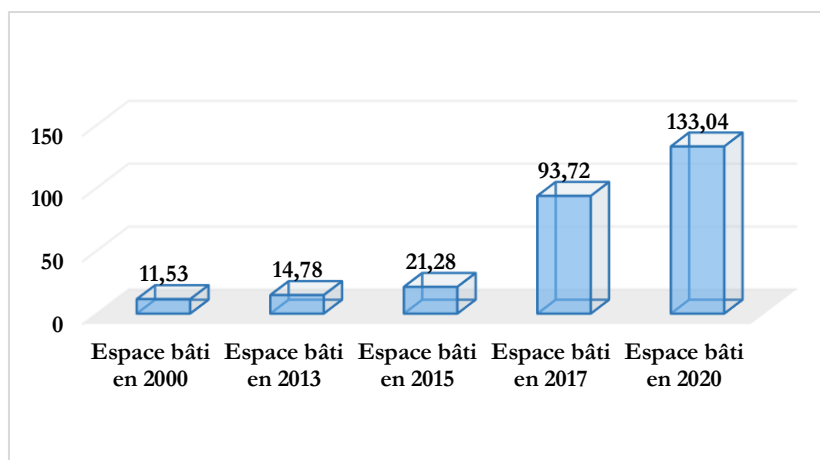


Figure 8. Étalement de l'espace bâti de 2000 à 2020 dans la localité d'Ouami (ha)

La figure 8 met en évidence l'évolution de l'espace bâti de 2000 à 2020 dans la localité d'Ouami. Située dans la région de l'Est Cameroun, département de Lom et Djérem, arrondissement de Bélabo ; Ouami est une localité qui existe depuis les années 2000. Cependant, à cette époque elle était sans intérêt et ne subissait pas de pressions anthropiques. L'espace bâti représentait 11,53 ha.

À la veille de la mise en eau du barrage hydroélectrique de Lom Pangar (2013), deux (02) observations intéressantes méritent d'être mises en évidence : premièrement, la localité d'Ouami ne semble pas attirer l'attention des populations ayant pour activité principale la pêche. La preuve en est que de 2000 à 2013, l'espace bâti est passé de 11,53 ha à 14,78 ha. Soit une différence de 3,25 ha seulement. Pendant la mise en eau (2015), l'espace bâti d'Ouami est passé de 14,78 ha à 21,28 ha, soit une augmentation de 6,5 ha. La population de la localité d'Ouami est devenue majoritairement des pêcheurs. C'est en 2017 que la localité d'Ouami a accueilli un nombre considérable des pêcheurs venus de divers horizons (Extrême-Nord Cameroun, Mali, Niger etc.). L'on note l'augmentation rapide de l'espace bâti deux (02) ans après la mise en eau du barrage de Lom Pangar. Cette unité d'occupation du sol est passée de 21,28 ha à 93,72 ha ; soit une augmentation de 74,44 ha.

Il est à noter que cinq (05) ans après la mise en eau dudit barrage, l'espace bâti du nouveau village de pêcheurs est passé de 93,72 ha à 133,04 ha. Soit une augmentation de 39,32 ha.

4.3 Évolution de l'occupation du sol de 2000-2013-2015-2017-2020 à l'échelle du Buffer (5 km)

Les figures 9 ; 10 ; 11 ; 13 et 14 ; dressent l'état d'occupation du sol en 2000 ; en 2013 ; 2015 ; 2017 et 2020 dans le périmètre d'étude. Au total Sept (07) types d'occupation du sol pour les années avant la mise eau et huit (08) types d'occupation du sol pour les années après la mise en eau ont été retenus.

4.3.1 État des unités d'occupation du sol en 2000

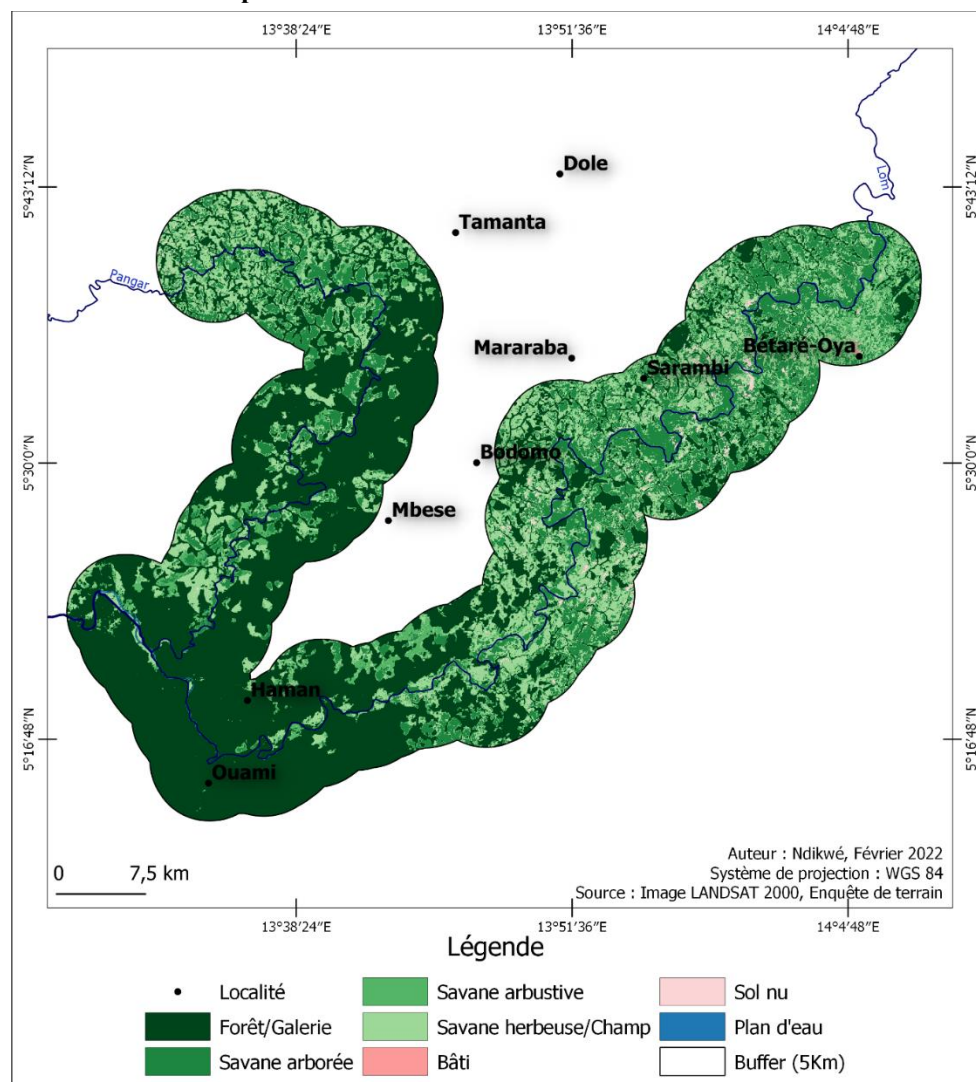


Figure 9. Occupation du sol en 2000

La figure 9 dresse l'état d'occupation du sol en 2000. Les proportions en pourcentage des types d'occupation du sol se présentaient comme suit : la forêt/galerie (50,29%) ; la savane arborée (16,99%) ; la savane arbustive (11,29%) ; la savane herbeuse/champ (19,34%) ; le sol nu (1,02%) ; le bâti (0,03%) ; et le plan d'eau (1,03%).

4.3.2 État des unités d'occupation du sol en 2013

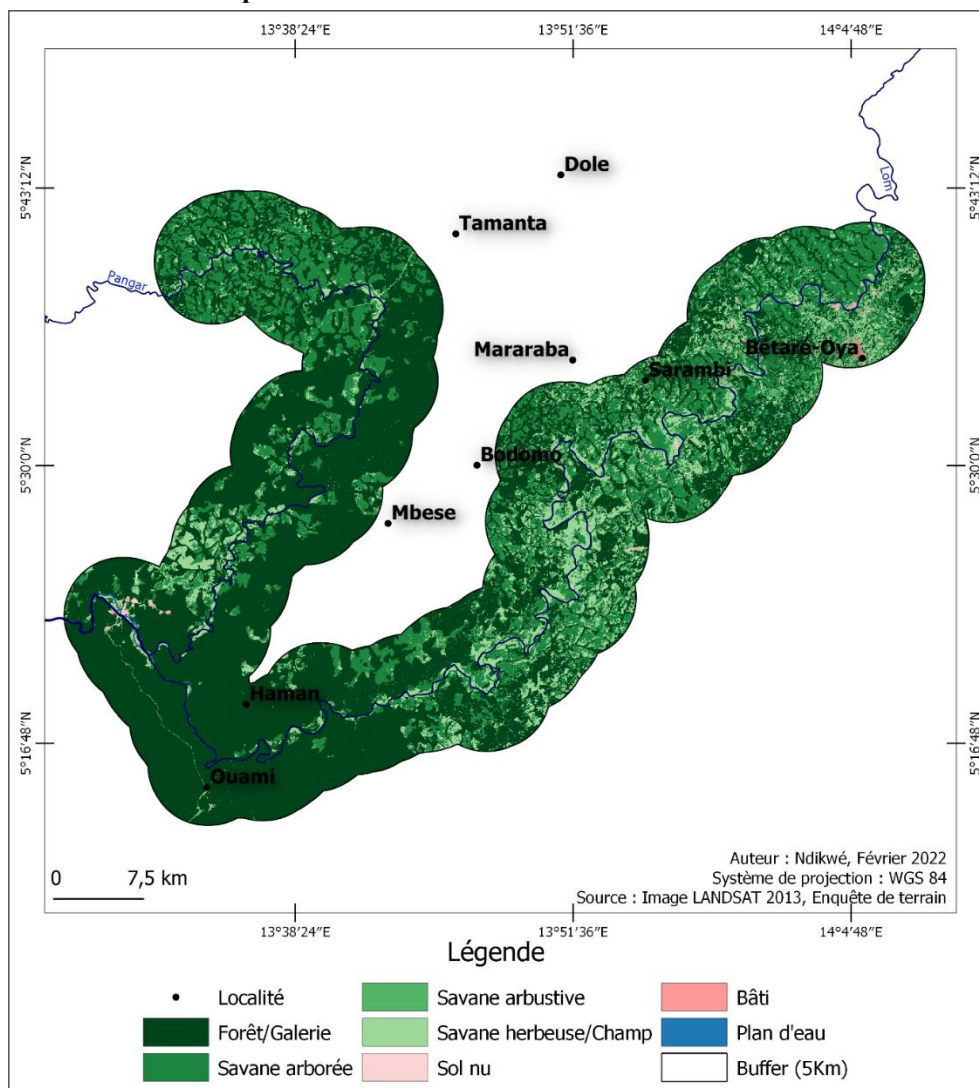


Figure 10. Occupation du sol en 2013

La figure 10 met en lumière l'occupation du sol à la veille de la mise en eau (2013). Les proportions en pourcentage des types d'occupation du sol se présentaient comme suit : la forêt/galerie (59,80%) ; la savane arborée (25,79%) ; la savane arbustive (1,46%) ; la savane herbeuse/champ (11,66%) ; le sol nu (0,16%) ; le bâti (0,21%) ; et le plan d'eau (0,92%).

4.3.3 État des unités d'occupation du sol en 2015

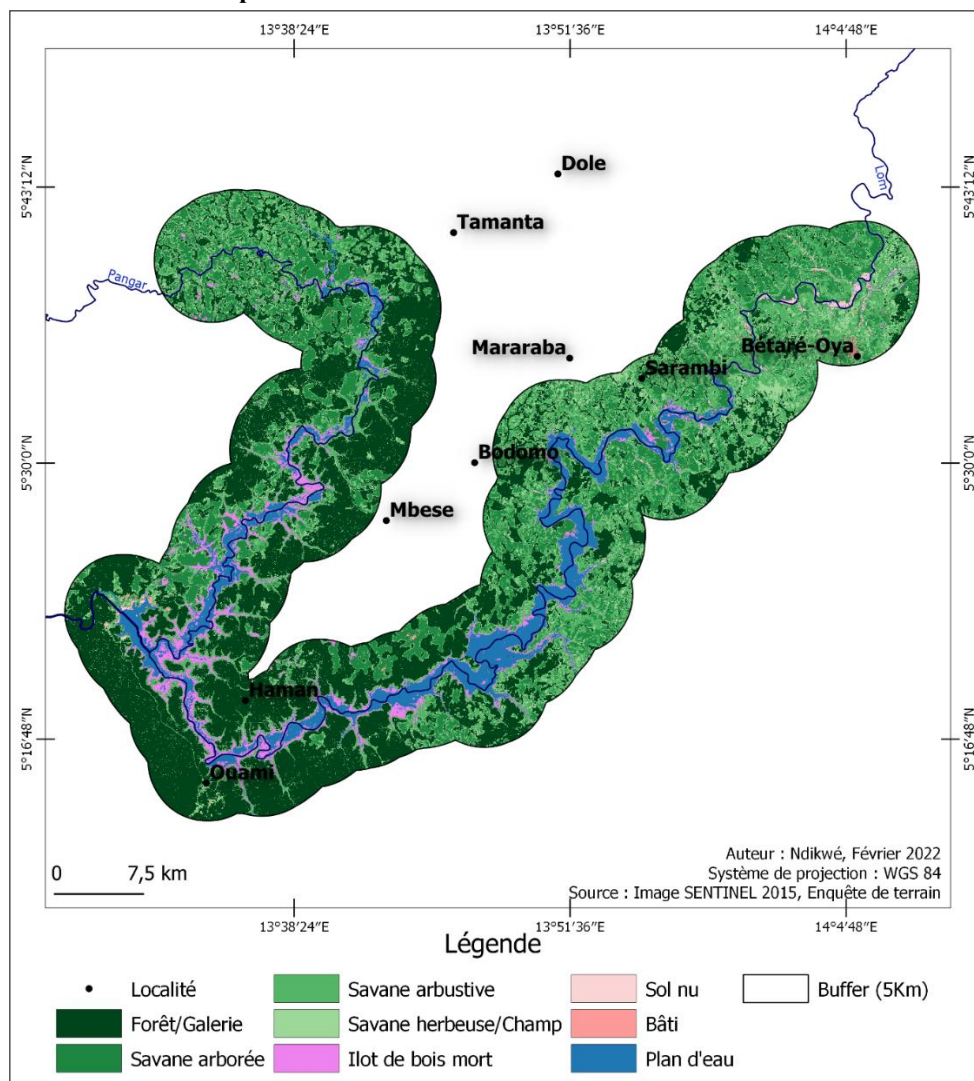


Figure 11. Occupation du sol en 2015

La figure 11 met en évidence l'occupation du sol en 2015. Suite à la mise en eau du barrage hydroélectrique de Lom Pangar, l'on constate l'introduction d'un nouvel élément dans le paysage (figure 12). Il s'agit des bois morts que nous regroupons sous le vocable « îlot de bois mort ».



Source : Ndikwé, avril 2020. 13,57921E ; 5,25552N

Figure 12. Galerie forestière ennoyée dans la localité d'Ouami

La figure 12 donne un aperçu de la problématique du bois mort induite par la mise en eau du barrage de Lom Pangar. Les proportions en pourcentage des types d'occupation du sol à cette année se présentaient comme suit : la forêt/galerie (40,23%) ; la savane arborée (14,90%) ; la savane arbustive (20,71%) ; la savane herbeuse/Champ (11,01%) ; ilot des bois morts (4,34%) ; le sol nu (0,36%) ; le bâti (0,30%) ; et le plan d'eau (8,14%).

4.3.4 État des unités d'occupation du sol en 2017

En 2017, l'état des unités d'occupation du sol se présentait comme suit (figure 13).

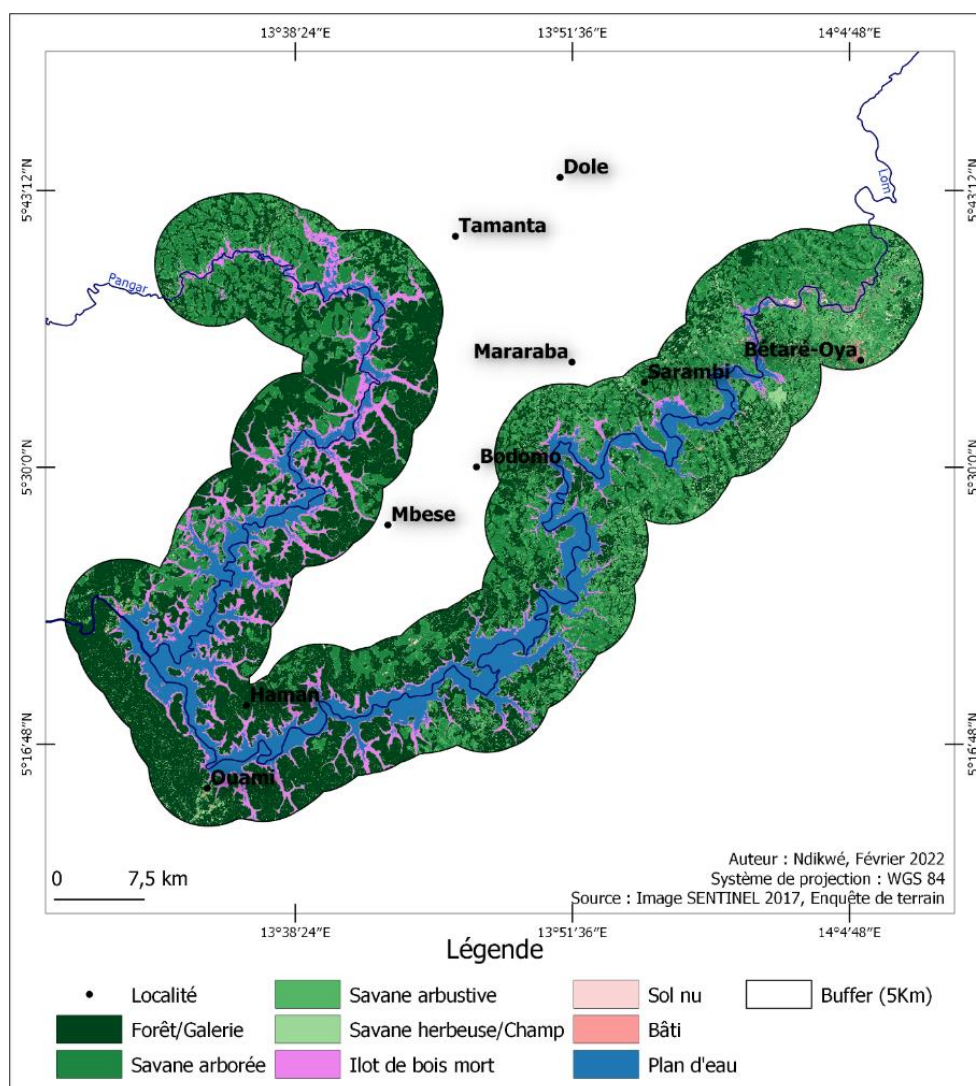


Figure 13. Occupation du sol en 2017

Deux (02) ans après la mise en eau du barrage hydroélectrique de Lom Pangar (2017). Les proportions en pourcentage des types d'occupation du sol se présentaient comme suit : la forêt/galerie (40,58%) ; la savane arborée (16,22%) ; la savane arbustive (16,28%) ; la savane herbeuse/champ (3,27%) ; les îlots des bois morts (8,91%) ; le sol nu (0,28%) ; le bâti (0,34%) ; et le plan d'eau (14,13%).

4.3.5 L'état des unités d'occupation du sol en 2020

La figure 14 dresse l'état des unités d'occupation du sol en 2020 à Lom Pangar.

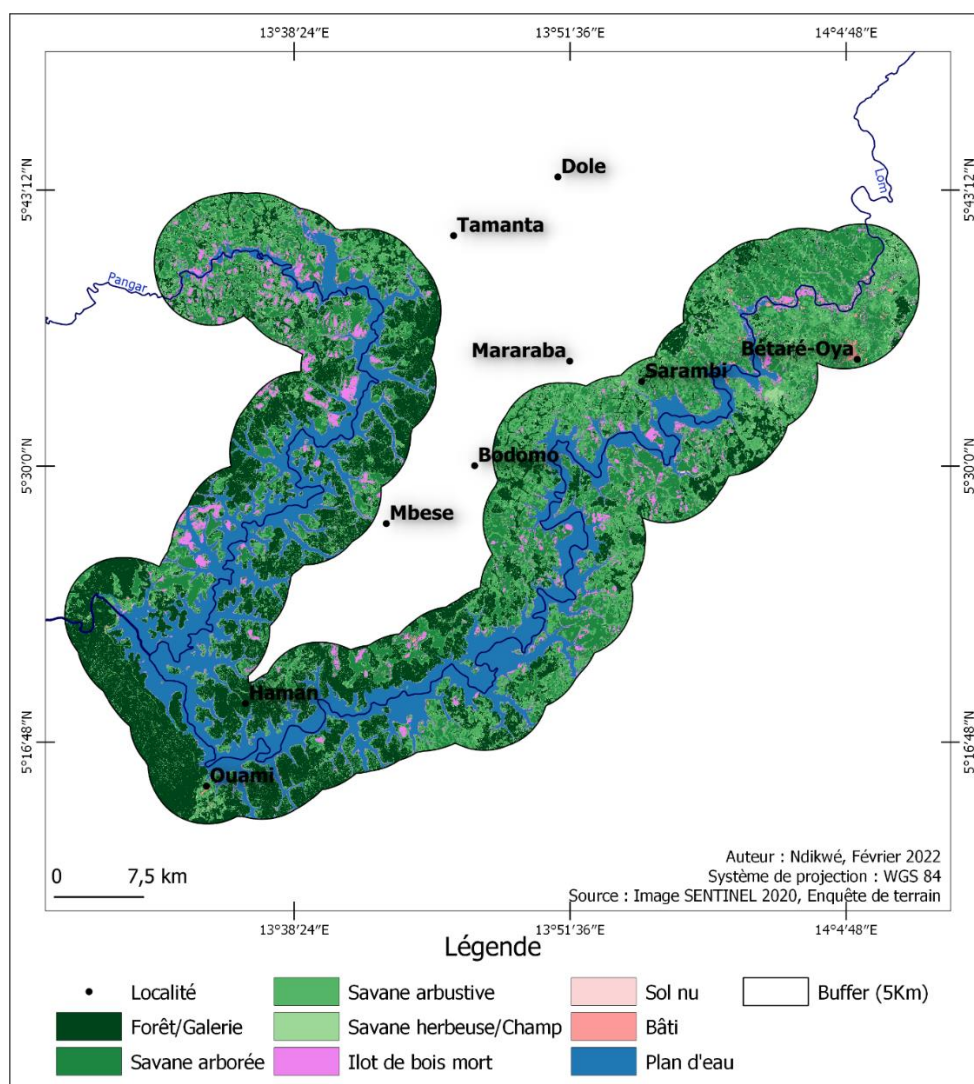


Figure 14. Occupation du sol en 2020

Cinq ans (05) après la mise en eau du barrage hydroélectrique de Lom Pangar (2020), les proportions en pourcentage des types d'occupation du sol à l'échelle locale se présentent comme suit : la forêt/galerie (28,15%) ; la savane arborée (15,80%) ; la savane arbustive (24,23%) ; la savane herbeuse/champ (4,20%) ; îlot des bois morts (5,89%) ; le sol nu (0,09%) ; le bâti (0,38%) ; et le plan d'eau (21,27%).

4.4 Taux Changement Global des unités d'occupation du sol de 2000-2013-2015-2017-2020

Les tableaux 2 ; 3 ; 4 et 5 dressent le comportement des unités d'occupation du sol en termes de changement global avant la mise en eau du barrage hydroélectrique de Lom Pangar (2000-2013) ; pendant la mise eau (2013-2015) et après la mise en eau (2015-2017-2020).

Tableau 2. Taux de Changement Global de 2000-2013

Unité d'occupation du sol	TG
Forêt/Galerie	+0018,92
Savane arborée	+0051,78
Savane arbustive	-0087,07
Savane herbeuse/Champ	-0039,71
Ilot de bois mort	+0000,00
Sol nu	-0084,43
Bâti	+0690,25
Plan d'eau	-0010,40

L'examen du tableau 2 révèle que, de 2000 à 2013, la savane arbustive ; la savane herbeuse/Champ ; le sol nu et le plan d'eau ont connu une dynamique régressive. Ces éléments paysagers ont respectivement un taux de changement global de -0087,07 ; -0039,71 ; -0084,43 ; -0010,40. Alors que la forêt/galerie ; la savane arborée et le bâti ont connu une dynamique progressive, avec respectivement un taux de changement global de +0018,92 ; +0051,78 ; +0690,25.

Tableau 3. Taux de Changement Global de 2013-2015

Unité d'occupation du sol	TG
Forêt/Galerie	-0032,73
Savane arborée	-0042,23
Savane arbustive	+1318,96
Savane herbeuse/Champ	-0005,60
Ilot de bois mort	+0000,00
Sol nu	+0125,98
Bâti	+0047,25
Plan d'eau	+0784,99

De 2013 à 2015 les unités d'occupation du sol : forêt/galerie (-0032,73) ; la savane arborée (-0042,23) ; la savane herbeuse/champ (-0005,60) ont enregistré un taux de changement négatif. Cependant durant cette même période, la savane arbustive ; le sol nu ; le bâti et le plan d'eau ont enregistré un taux de changement global positif avec respectivement les valeurs +1318,96 ; +0125,98 ; +0047,25 ; +0784,99.

Tableau 4. Taux de Changement Global de 2015-2017

Unité d'occupation du sol	TG
Forêt/Galerie	+0000,87
Savane arborée	+0008,88
Savane arbustive	-0021,42
Savane herbeuse/Champ	-0070,34
Ilot de bois mort	+0105,09
Sol nu	-0022,05
Bâti	+0010,21
Plan d'eau	+0073,65

L'ordre décroissant des unités d'occupation du sol qui ont connu une dynamique régressive entre 2015 à 2017 se décline comme suit : ilot de bois mort (+0105,09) ; plan d'eau (+0073,65) ; bâti (+0010,21) forêt galerie (+0000,87). En revanche l'ordre croissant des unités paysagères ayant connues de progression en termes de superficie se présente comme suit : la mosaïque savane herbeuse/champ (-0070,34) ; le sol nu (-0022,05) et la savane arborée (+0008,88).

Tableau 5. Taux de Changement Global de 2017-2020

Unité d'occupation du sol	TG
Forêt/Galerie	-0030,65
Savane arborée	-0002,62
Savane arbustive	+0048,89
Savane herbeuse/Champ	+0028,48
Ilot de bois mort	-0033,91
Sol nu	-0068,68
Bâti	+0012,71
Plan d'eau	+0050,60

Le tableau 5 met en évidence le Taux de Changement Global des unités d'occupation du sol du périmètre d'étude de 2017 à 2020. De ce fait, force est de constater que, la forêt/galerie (-0030,65) ; la savane arborée (-0002,62) ;

l'ilot de bois mort (-0033,91) et le sol nu (-0068,68) ont enregistré un bilan négatif. Par contre, la savane arbustive (+0048,89) ; la savane herbeuse/champ (+0028,48) ; le bâti (+0012,71) et le plan d'eau (+0050,60), ont enregistré un bilan positif.

4.5 Simulation de l'occupation du sol dans les bassins versants aval de Lom Pangar en 2030

4.5.1 La matrice de transition

Les tableaux 6 et 7 décrivent les conversions des unités d'occupation du sol qui se sont opérées pendant la mise en eau (2015-2017) et après la mise en eau (2017-2020).

Tableau 6. Matrice de transition de 2015-2017 en pourcentage

		2015								
		Bâti	Forêt/ Galerie	Ilot de bois mort	Plan d'eau	Savane arborée	Savane arbustive	Savane herbeuse/Champ	Sol nu	Total général
2017	Bâti	00,10	0,00	00,00	00,00	00,09	00,05	00,01	00,08	00,33
	Forêt/ Galerie	00,00	33,46	00,00	00,00	00,01	00,91	06,36	00,00	40,76
	Ilot de bois mort	00,01	03,09	00,43	00,18	00,65	03,19	01,31	00,00	08,86
	Plan d'eau	00,01	00,08	03,59	07,95	00,48	01,90	00,09	00,27	14,37
	Savane arborée	00,10	00,05	00,25	00,00	12,07	03,55	00,09	00,00	16,12
	Savane arbustive	00,03	01,86	00,06	00,00	01,40	10,96	01,87	00,06	16,18
	Savane herbeuse/Champ	00,00	01,83	00,00	00,00	00,01	00,19	01,05	00,00	03,09
	Sol nu	00,04	00,00	00,01	00,00	00,18	00,04	00,00	00,00	00,27
	Total général	00,30	40,38	04,33	08,14	14,90	20,79	10,79	00,36	100,00

Le tableau 6 décrit les conversions des unités d'occupation du sol entre 2015 et 2017. Elles se sont opérées de la manière suivante. Le bâti avait un pourcentage de 00,30% en 2015 ; en 2017 il occupait une proportion de 00,33%. Soit une augmentation de 0,03%. Cette augmentation provient en majeure partie de la savane arborée (00,09%) et de la savane arbustive (00,05%). La forêt galerie est restée plus ou moins stables. Les ilots de bois mort sont passés de 04,33% en 2015 à 08,86 % en 2017. Ce gain provient en majeure partie des forêts/galerie (03,09%) et de la savane arbustive (03,19%). Le plan d'eau est l'élément paysager qui a le plus gagné en termes d'espace. En 2015 il avait un pourcentage de 08,14 ; en 2017 il est passé à 14,37%, soit une augmentation de (06,23%). En effet 03,59% des ilots de bois mort ont disparu pour laisser la place à la retenue d'eau de Lom Pangar. La savane arborée a connu une progression. Elle est passée de 14,90% en 2015 à 16,12% en 2017. Soit une augmentation de 01,22%. Dans les 01,22% ; une bonne partie provient de la savane arbustive (01,40%). La savane arbustive quant à elle a connu une régression. En 2015 elle avait une proportion de 20,79% ; en 2017 elle occupait 16,18%. Au total, 01,87% de savane arbustive s'est convertie en savane herbeuse/champ et 01,40% s'est transformés en savane arborée. La savane arbustive/champ est passée de 10,79% en 2015 à 03,09% en 2017. En réalité 06,36% des galeries forestières mises en valeurs par le passé ont été reconstituées. Le sol nu, de 2015 à 2017 est resté plus ou moins stable. Signalons tout de même que 00,27% a été de sol a été submergé.

Tableau 7. Matrice de transition de 2017-2020 en pourcentage

		2017								
		Bâti	Forêt/ Galerie	Ilot de bois mort	Plan d'eau	Savane arborée	Savane arbustive	Savane herbeuse/Champ	Sol nu	Total général
2020	Bâti	00,15	00,00	00,02	00,00	00,11	00,01	00,00	00,08	00,37
	Forêt/ Galerie	00,00	26,80	00,00	00,00	00,00	00,06	01,51	00,00	28,38
	Ilot de bois mort	00,01	00,04	01,67	00,01	02,91	01,18	00,00	00,00	05,83
	Plan d'eau	00,00	00,02	07,08	14,12	00,00	00,06	00,00	00,19	21,47
	Savane arborée	00,12	00,04	00,09	00,00	12,49	02,89	00,04	00,00	15,65
	Savane arbustive	00,01	10,74	00,05	00,00	00,72	11,94	00,77	00,00	24,23
	Savane herbeuse/Champ	00,00	03,11	00,00	00,00	00,00	00,09	00,77	00,00	03,97
	Sol nu	00,06	0,00	00,00	00,00	00,02	00,01	00,00	00,00	00,09

	Total général	00,33	40,76	08,92	14,13	16,24	16,24	03,09	00,27	100,00
--	------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------

Le tableau 7 décrit les conversions des unités d'occupation du sol qui se sont opérées durant la période de 2017 à 2020. Le bâti avait un pourcentage de 00,33% en 2017 ; en 2020 il occupait une proportion de 00,37%. Soit une augmentation de 0,04%. Cette augmentation provient en majeure partie de la savane arborée (00,11%). La forêt galerie avait 40,76% en 2017, en 2020 elle avait 28,38%. Soit une régression de 12,38%. Une bonne partie s'est transformée en formations savanicoles. Les îlots de bois mort sont passés de 08,92% en 2017 à 05,83% en 2020. Ici il sied de mentionner qu'une portion de formations savanicoles envoyée par le passé s'est reconstituée et 01,51% a été mise en valeurs. Le plan d'eau est passé de 14,13% en 2017 à 21,47% en 2020. En effet 07,08% des îlots de bois mort ont disparu laissant la place à la lame d'eau. La savane arborée quant à elle est passée de 16,24% en 2017 à 15,65% en 2020. Cette unité s'est dégradée au profit de la savane arbustive. La savane arbustive est passée de 16,24% en 2017 à 24,23% en 2020. Cette progression provient en majorité des galeries forestières (10,74%). La mosaïque savane herbeuse/champs est restée plus ou moins stable. En 2017 elle avait 03,09% et 03,97 en 2020. Le sol nu est passé de 00,27% à 00,09% de 2017 à 2020. Au total, cette unité a été envoyée suite à l'élargissement de la retenue d'eau de Lom Pangar.

4.5.2 La matrice de probabilité de conversion des unités d'occupation du sol

La mise à contribution de l'application IDRISI a permis de déterminer la matrice de probabilité transition à l'échelle du périmètre d'étude (tableau 8) de 2017 à 2020. Les valeurs se rapprochant de 0,0000 renseigne sur l'instabilité de l'unité d'occupation du sol ; et les valeurs se rapprochant de 1,0000 indique la stabilité de l'unité paysagère.

Tableau 8. Matrice de probabilité de transition de 2017 à 2020

	Forêt / Galerie	Savane arborée	Savane arbustive	Savane herbeuse/ Champ	Îlot de bois mort	Sol nu	Bâti	Plan d'eau
Forêt/ Galerie	0,3066	0,1240	0,4391	0,0532	0,0478	0,0004	0,0011	0,0279
Savane arborée	0,0007	0,4521	0,0707	0,0006	0,1380	0,0023	0,0091	0,3265
Savane arbustive	0,0097	0,3122	0,3883	0,0044	0,1086	0,0011	0,0041	0,1716
Savane herbeuse/ Champ	0,3135	0,1237	0,4302	0,0562	0,0471	0,0004	0,0011	0,0277
Îlot de bois mort	0,0002	0,0097	0,0033	0,0001	0,0061	0,0003	0,0008	0,9796
Sol nu	0,0013	0,4709	0,0551	0,0006	0,1299	0,0196	0,0632	0,2593
Bâti	0,0014	0,5384	0,0565	0,0007	0,1385	0,0335	0,1077	0,1235
Plan d'eau	0,0001	0,0001	0,0003	0,0000	0,0010	0,0000	0,0000	0,9986

La matrice de probabilité de transition de 2017-2020, met en évidence les probabilités de transition des types d'occupation du sol. Il s'agit de : forêt galerie (0,3066) ; la savane arborée (0,4521) ; la savane arbustive (0,3883) ; la savane herbeuse/champ (0,0562) ; les îlots de bois mort (0,0061) ; le sol nu (0,0196) ; le bâti (0,1077) et le plan d'eau (0,9986). De ce fait il sied de signaler que toutes les unités d'occupation du sol sont instables dans le périmètre d'étude. Cependant la savane arborée et surtout le plan d'eau apparaissent comme les unités paysagères les moins instables.

L'algorithme CA_Markov a été mis à contribution pour simuler l'occupation du sol en 2030. Il est organisé de la manière suivante : la matrice de transition de surface obtenue (à l'aide du module de Markov) à partir des deux cartes antérieures d'occupation du sol (2017-2020), établit la quantité de changement attendue d'une classe à une autre dans la prochaine période de simulation. L'image de 2017 est utilisée comme point de départ pour la simulation de changement en 2030 (figure 15).

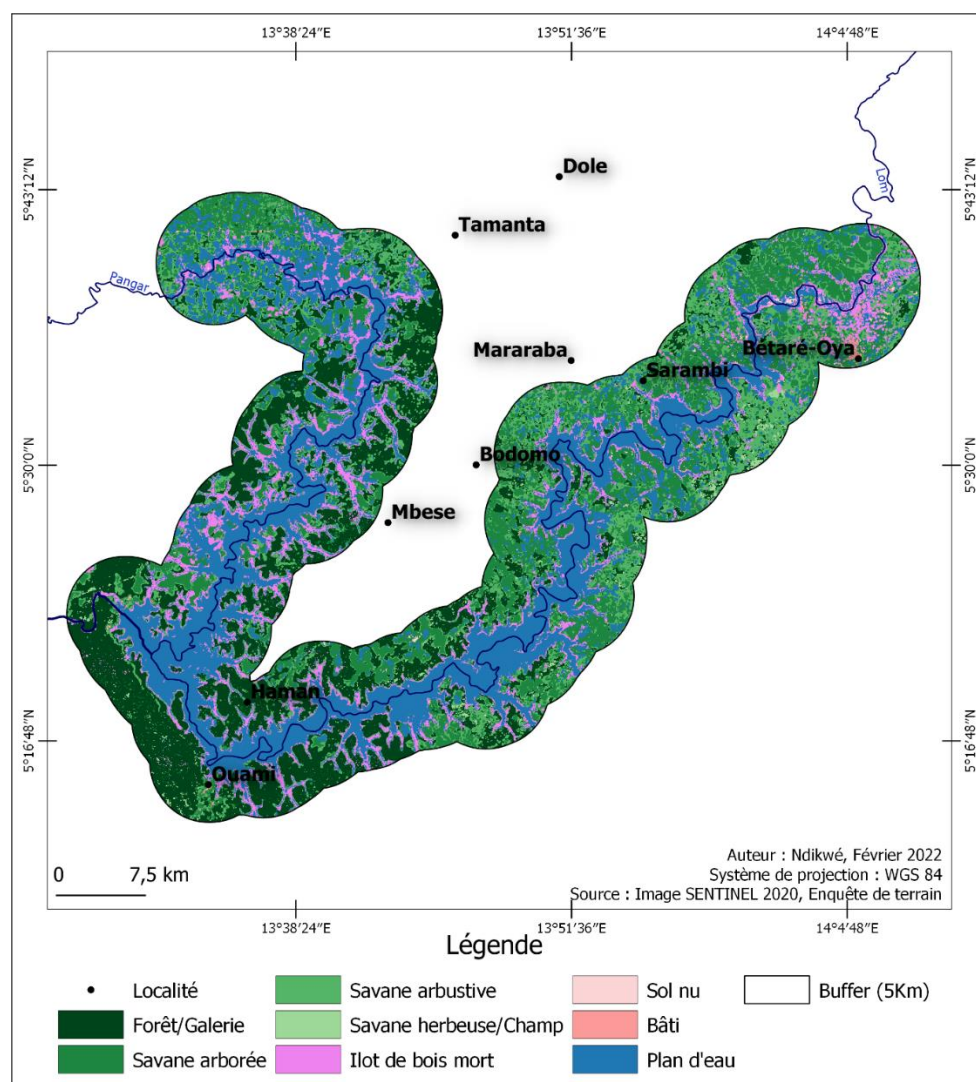


Figure 15. Simulation de l'occupation du sol en 2030 dans les bassins versants aval de Lom Pangar
 Les proportions en pourcentage des unités d'occupation du sol à l'horizon 2030 dans les bassins versants aval de Lom Pangar se présenteront comme suit si le système précédent, responsable de la dynamique est maintenu : la forêt/galerie (22,63) ; la savane arborée (19,44) ; la savane arbustive (16,78) ; la savane herbeuse/champ (0,92) ; l'îlot de bois mort (9,50) ; le sol nu (0,29) ; le bâti (0,29) et le plan d'eau (30,15). Le croisement de l'état des types d'occupation du sol de 2020 à celui simulé de 2030 dans les bassins versants aval de Lom Pangar est donné par la figure 16.

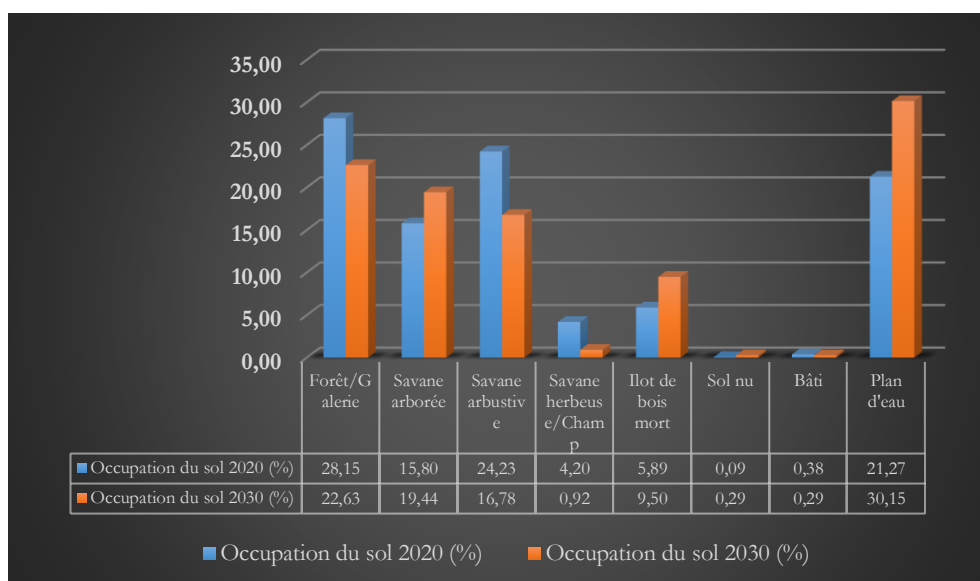


Figure 16. Matrice d'évolution des unités d'occupation du sol (%) de 2020 et 2030

À l'horizon 2030, la forêt/galerie ; la savane arbustive ; la savane herbeuse et le bâti connaîtront une dynamique régressive. Par contre, les îlots de bois ; le sol nu et le plan d'eau vont gagner en termes de superficie. Le volume d'eau de la retenue de Lom Pangar à l'horizon 2030 connaîtra une augmentation, laquelle va davantage élargir la superficie inondable des bassins versants aval de Lom Pangar. Cette situation va pousser les populations vivant à proximité du lac artificiel à s'éloigner de celui, d'où la réduction de la pression anthropique sur les formations végétales. Ainsi dit le tableau 9 met en évidence le modèle de conversion des unités d'occupation du sol à l'échelle du Buffer (5 km) à l'horizon 2030.

Tableau 9. Modèle de conversion des unités d'occupation du sol à l'échelle du Buffer (5 km) à l'horizon 2030

Paysage	Unité d'occupation du sol	Facteur explicatif	Dynamique envisagée
Lom Pangar (Buffer 5 km)	Couvert végétal	Pression anthropique (exploitation forestière, mise en valeur des surfaces végétalisées)	Rétrécissement du couvert végétal
	Espace artificialisé	Élargissement de la lame d'eau (retenue d'eau)	Rétrécissement de l'espace bâti
	Retenue d'eau	Mise en eau complète	Élargissement de la lame d'eau (retenue d'eau)
	Ilots de bois mort	Élargissement de la lame d'eau (retenue d'eau)	Élargissement de l'élément paysager

5 Discussion

5.1 La précision du traitement d'image

La télédétection apparaît de nos jours comme une condition sine qua non pour suivre l'évolution des unités d'occupation (Leroux, 2012). La validation du processus de discrimination des classes d'occupation retenues pour

une étude passe par le contrôle des certains paramètres dont les plus importants sont : la précision globale et l'indice kappa. Au total, les valeurs du kappa inférieures à 0,4000 environ peuvent être considérées comme un mauvais accord au-delà du hasard, celles comprises entre 0,4000 et 0,7500 peuvent être considérées comme représentatives d'un accord juste à bon au-delà du hasard, et les valeurs supérieures à 0,7500 peuvent être considérées comme un excellent accord au-delà du hasard (Fleiss et *al.*, 2003). En se référant à cette échelle, les classifications supervisées des images retenues dans le cadre de cette étude ont généré des valeurs kappa acceptables (0,9889 pour l'image de 2000 ; 0,9794 pour l'image de 2013 ; 0,9359 pour celle de 2015 ; 0,9532 pour celle de 2017 et 0,9762 pour l'image de 2020).

5.2 La dynamique des unités d'occupation du sol

L'exploitation des données géospatiales a permis de cartographier l'état des types d'occupation du sol dans les bassins versants aval de Lom Pangar de 2000 à 2020. Les résultats issus du traitement d'image mettent en évidence que la dynamique des types d'occupation du sol dans les bassins versants aval de Lom Pangar a connu un tournant considérable pendant et après la mise en eau du barrage hydroélectrique de Lom Pangar. En effet, c'est pendant la mise en eau dudit barrage que la localité d'Ouami est devenue une zone attractive. Bon nombre des pêcheurs venant de divers horizons en l'occurrence de l'Extrême-Nord Cameroun, du Niger et de la région de l'Adamaoua se sont installés dans cette localité. Cette affluence s'est soldée par une pression considérable sur les ressources naturelles. Ceci a donc conduit à la dynamique des unités d'occupation du sol. Il sied de mettre en évidence que : avant la mise en eau du barrage hydroélectrique de Lom Pangar (2000-2013), les unités naturelles d'occupation du sol du périmètre d'étude n'ont pas été perturbées. À titre illustratif, les classes forêt/galerie (+0018,92) et savane arborée (+0051,78) ont enregistré un taux de changement global positif. En revanche, pendant et surtout après la mise en eau, le processus de conversion des types d'occupation du sol s'est traduit par la conversion des unités naturelles (forêt/galerie ; savane arborée ; savane arbustive en unités anthropiques (agglomération, retenue d'eau mosaïque savane herbeuse et champs). Cela s'exprime par l'extension des terres agricoles et l'explosion démographique. Ces résultats concordent avec ceux de ; Aoudou (2010) ; Mama (2013) ; Tenté (2015) qui montrent une régression des formations végétales fermées au profit des champs et agglomérations.

5.3 Modélisation de l'occupation du sol

La prédiction de la dynamique des types d'occupation du sol apparaît comme un outil efficace qu'il faudrait dans l'avenir intégrer dans des études de moyen ou long terme couvrant le passé, le présent et le futur afin de contribuer à une meilleure compréhension de l'historicité des changements d'occupation et d'utilisation des terres et prendre des décisions rigoureuses et raisonnées dans la gestion des espaces naturels (Konan et *al.*, 2019). Dans cette étude nous avons opté pour la combinaison de deux (02) méthodes que sont les Automates Cellulaires et les chaînes de Markov. Les chaînes de Markov mettent l'accent sur les probabilités de transition des unités paysagères en se basant sur l'évolution de celles-ci dans le passé. Cependant la proximité d'une unité paysagère d'une autre peut être un facteur de mutation pour cette dernière. Par exemple la proximité des agglomérations des formations végétales est un facteur de déforestation. Conscient de cette réalité l'algorithme Automates Cellulaires a été convoqué dans le processus de modélisation de l'occupation du sol dans cette étude pour combler le manque dans la chaîne de Markov (Ladet et *al.*, 2004). Ainsi, les probabilités de transition de 2017 à 2020 révèlent que l'ordre croissant de probabilité de conversion est : le plan d'eau (0,9986) ; la savane arborée (0,4521) ; la savane arbustive (0,3883) ; la forêt/galerie (0,3066) ; le bâti (0,1077) ; la savane herbeuse/champ (0,0562) ; le sol nu (0,0196) et les îlots de bois mort (0,0061). Les valeurs de probabilité de transition témoignent de l'instabilité des unités d'occupation du sol de façon générale. La pression anthropique exercée sur les ressources naturelles à proximité de la retenue d'eau de Lom Pangar sont courantes dans toute l'Afrique et vont dans le sens des travaux de Ondo (2006) en Côte d'Ivoire ; Ouedraogo et *al.* (2010) au Burkina Faso ; Houessou et *al.* (2013) au Bénin. La modélisation de l'occupation s'est faite sans pondération des facteurs. Les études futures de la dynamique de l'occupation du sol dans les bassins versant aval de Lom Pangar devront intégrer la pondération des moteurs de mutations spatiales.

6 Conclusion

Cette étude a révélé que de 2000 à 2013, les formations forestières et les formations savaniques en l'occurrence la savane arborée ont connu un changement global positif avec respectivement un taux de +0018,92) et +0051,78). En revanche, l'on note une régression sans précédent de la couverture végétale au profit des espaces artificiels pendant et surtout après la mise en eau du barrage hydroélectrique de Lom Pangar. L'espace agricole, le bâti et le plan d'eau sont les unités d'occupation du sol qui ont progressé en termes de superficie avec respectivement un taux de progression de +0028,48 ; +0012,71 et +0050,60 de 2017 à 2020. La mise à contribution des Automates Cellulaires et de la chaîne de Markov dans la modélisation de l'occupation du sol dans notre périmètre d'étude a permis de prédire le devenir des unités d'occupation du sol à l'échelle locale. Il est important de signaler une forte pression sur la biodiversité et surtout l'envolement les formations végétales dû à l'extension de la retenue d'eau.

La mise à contribution des images RADAR paraît plus appropriée dans la détection des arbres en déclin à Lom Pangar.

Références

- [1] **Aoudou D S. (2010).** Suivi de l'évolution de la végétation ligneuse de la savane soudanienne dans la haute vallée de la Bénoué au Nord-Cameroun, Thèse de Doctorat /Ph.D en sciences sociales, Université de Ngaoundéré, 307p.
- [2] **Bénié B G. (2004).** Traitement numériques d'images de télédétection. Note de cours, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, 99-117.
- [3] **Congalton R G. (1991).** A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. Remote sensing of environment, 37-46.
- [4] **Djoufack M V. (2012).** Étude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun, Thèse de Doctorat /Ph.D en sciences sociales, Université de Yaoundé I, 322p.
- [5] **Fahrig L. (2003).** Effects of habitat fragmentation on biodiversity, Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics, 487-515.
- [6] **Fleiss J., Levin B., Paik M. (2003).** In Statistical Methods for Rates and Proportions. Statistical Methods for Rates and Proportions, <https://doi.org/10.1002/0471445428>.
- [7] **Gueguim C D., Tchamba M N., Fotso C R. (2018).** Dynamique spatio-temporelle des feux de brousse dans le Parc National du Mbam et Djerem (Cameroun), International Journal of Biological and Chemical Sciences, 728-748.
- [8] **Houessou L G., Teka O., Toko Imorou I., Lykke A M., Sinsin B. (2013).** Land Use and Land-Cover Change at "W" Biosphere Reserve and its Surroundings Areas in Benin Republic (West Africa), Environment and Natural Resources Research, 1927-0488.
- [9] **Konan K E., Mafou K C., Sylla D., Diomande G., Lida D S. (2019).** Modélisation prospective de la déforestation dans le Parc National du Mont Sangbé (Côte d'Ivoire), Actes de la conférence scientifique internationale, 95-116.
- [10] **Ladet S., Deconchat M., Monteil C., Lacombe J P., Balent G. (2004).** Les chaînes de Markov spatialisées comme outils de simulation usages, avantages et limites, ResearchGate pp1-15.
- [11] **Leroux L. (2012).** Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'Ouémé (Bénin) à partir de l'imagerie LANDSAT et MODIS: Cas d'étude du communal de Djougou. Hydro-sciences Montpellier, ANR ESCAPE, Rapport, 61p.
- [12] **Lopez E., Bocco G., Mendoza M., Duhau E. (2001).** Predicting landcover and landuse change in the urban fringe: a case in Morelia city, Mexico, Landscape and Urban Planning, pp271-285.
- [13] **Mama A., Sinsin B., De Cannière C., Bogaert J. (2003).** Anthropisation et dynamique des paysages en zone soudanienne au nord du Bénin, Tropicultura, 78-88.
- [14] **Oloukoi J A. (2006).** Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des collines au Bénin, Télédétection, 305-323.
- [15] **Ondo A E. (2006).** Dynamique paysages végétaux du littoral centre Ouest du Gabon autour de port Gentil, Thèse de Doctorat/Ph.D en sciences naturelles, Université Paul Valéry Montpellier 3, 302p.
- [16] **Ouedraogo I., Tigabu M., Savadogo P., Compaore H., Oden P C., Ouadba J M. (2010).** Land cover change and its relation with population dynamics in Burkina Faso, West Africa, Land Degrad, 453-462.
- [17] **Puyravaud J P. (2003).** Standardizing the calculation of annual rate of deforestation, ELSEVIER, 4p.
- [18] **Schlaepfer R. (2002).** Analyse de la dynamique du paysage, Fiche d'enseignement, Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes, École Polytechnique de Lausanne, Suisse 1p.

- [19] **Scouvar M., Lambin E F. (2006).** Approche systémique des causes de la déforestation en Amazonie brésilienne : syndromes, synergies et rétroactions, Environnement, 241-254.
- [20] **Tenté V O. (2015).** Dynamique actuelle et processus d'évolution des écosystèmes de la forêt de Djigbédans la commune de Zè, Mémoire de Maîtrise en sciences naturelles, DGAT/FLASH/UAC, 63p.
- [21] **Toko I. (2008).** Étude de la variabilité spatiale de la biomasse herbacée, de la phénologie et de la structure de la végétation le long des toposéquences du bassin supérieur du fleuve Ouémé au Bénin, Thèse de Doctorat en sciences naturelles, Université d'Abomey, 241p.