

Mutations Spatiales Du Paysage Et Prospective Territoriale Dans Le Secteur Habité De La Commune De Karimama Au Nord Bénin

[Spatial Changes Of The Landscape And Territorial Prospective In The Inhabited Sector Of The Municipality Of Karimama In Northern Benin]

Abdel Aziz OSSENI¹, Côovi Aimé Bernadin TOHOZIN^{2*}

¹ Ecole d'Horticulture et d'Aménagement des Espaces Verts (EHAEV), Université Nationale d'Agriculture (UNA), BP 43 Kétou, Bénin.

² Institut Régional Africain des Sciences et Technologies de l'Information Géospatiale (AFRIGIST) précédemment RECTAS, Ilé-Ife, Nigeria.



Résumé – La télédétection est très sollicitée ces dernières années pour le suivi de l'occupation du sol à différentes échelles. Mais au-delà de cet enjeu, elle joue un rôle important dans la planification spatiale en apportant des réponses aux préoccupations environnementales. Le présent travail a pour objectif de faire l'analyse diagnostique des mutations spatiales du paysage et pour prédire les changements futurs de l'occupation du sol dans le secteur habité de la commune de Karimama, en vue d'un aménagement durable du territoire. L'approche méthodologique utilisée repose sur les techniques de la télédétection, et a permis de faire le traitement des images Landsat de 1988 ; 2003 et 2018 sous le logiciel Envi 5.3. Une modélisation prédictive a été réalisée à partir de l'extension « Land Change Modeler » disponible sous IDRISI pour générer les probabilités futures de ces changements. Les résultats obtenus montrent que sur les trente dernières années, le paysage a considérablement changé. On y observe un phénomène d'anthropisation provoqué par une conversion des formations végétales en zones de cultures et de jachères. Aussi, le secteur habité de la commune est en pleine mutation, notamment les zones de plaines inondables autrefois occupées par les galeries forestières et les savanes arborées arbustives, se sont transformées en zones marécageuses sous l'effet des aléas naturels. L'analyse prospective réalisée sur les données montre que si aucune mesure d'aménagement n'est prise, les deux tendances évoquées vont se poursuivre jusqu'en 2033 et risquent de compromettre l'aménagement du territoire.

Mots clés – Télédétection ; mutations spatiales ; aménagement du territoire ; Karimama, Bénin.

Abstract – Remote sensing is very requested over last years for land-use and land cover monitoring at several spatial levels. But beyond this stake, it plays a significant role in spatial planning while bringing answers to the environmental concerns. This study aims to analyze the landscape changes and to predict the future land-use changes in the inhabited sector of the of Karimama common, for a sustainable spatial planning. The methodological approach used is based on remote sensing technics, which allowed to make Landsat image processing of the years 1988;2003 and 2018 with Envi 5.3 software. A predictive modeling was carried out starting from the extension "Land Change Modeler" available on IDRISI to generate the future probabilities of these changes. The obtained results show that over the thirty last years, the landscape area has considerably changed. It is observed a crucial anthropization phenomenon caused by a conversion of the forest units into crop and fallow areas. In addition, the inhabited sector of the commune is in full change, in particular the easily flooded zones of plain formerly occupied by the forest galleries and shrubby raised savannas, were transformed into marshy zones under the effect of the natural risks. The prospective analysis carried out on the data shows that if no measurement of installation is taken, the two evoked tendencies will continue until 2033 and are likely to compromise the regional planning.

Keywords – Remote sensing; Spatial changes; Regional planning; Karimama, Benin.

I. INTRODUCTION

Les zones soudaniennes béninoises sont sujettes à de remarquables changements environnementaux qui sont liés pour la plupart à la forte demande de terre par les populations pour répondre aux besoins d'agriculture (A. Mama *et al.*, 2013, p.85). Ce phénomène qui, déjà était à la base de la déforestation et la dégradation des terres, s'intensifie avec les événements climatiques extrêmes tels que la sécheresse ou les inondations (A.P. Ouoba, 2013, p.21). Ainsi, à l'échelle globale, les inondations et les sécheresses prolongées agissent comme risques additionnels à la vulnérabilité des milieux naturels et les espaces occupés par les populations (Y.C.H. Hountondji, 2008, p.15). Il convient donc de réfléchir sur les outils de planification spatiale et de gestion environnementale appropriés afin de garantir les conditions d'un développement durable aux populations de ces régions.

Karimama est l'une de communes du nord-ouest du Bénin qui se situe dans la zone soudanienne, et dont la majeure partie du territoire est occupée par le parc national W, avec un statut d'aire protégée. Ainsi, malgré l'accroissement démographique et les besoins en terre pour l'agriculture, le secteur habité de cette commune, localisé entre le parc national W et le fleuve Niger, se retrouve inextensible dans ses limites pour répondre aux exigences de l'aménagement du territoire et de développement socioéconomique. En conséquence, les ressources naturelles sont soumises à de fortes pressions dues à l'expansion de l'agriculture et le surpâturage pour nourrir la population de plus en plus croissante (Mama *et al.*, 2013 p.85 ; J. Avakoudjo *et al.*, 2014, p.2620). De plus, la dynamique des berges du fleuve Niger dans le secteur, accentue également les phénomènes de l'érosion (M. Gandonou *et al.*, 2006, p.7). D'autres aléas naturels tels que les inondations prolongées s'observent depuis quelques années dans la commune de façon récurrente, provoquant la destruction des cultures et le déplacement massif des populations. L'espace habité de cette commune se retrouve ainsi soumis à de fortes pressions, à la fois naturelles et anthropiques, dont les effets sont perceptibles à travers la dégradation des écosystèmes, la régression du couvert végétal, l'érosion des terres. Ce qui menace gravement la disponibilité ressources et des services écosystémiques pour les populations. Cette situation, qui se révèle critique pour l'environnement, rend vulnérable les communautés, et est susceptible de s'aggraver à l'avenir si rien n'est fait. Et pour résorber ces problèmes, l'une des approches les plus utilisées est la télédétection, qui constitue un véritable outil de planification et d'aménagement des villes, via les nombreuses applications qui lui sont subordonnées (occupation des sols, gestion des risques, gestion des sols imperméabilisés, etc.), faisant d'elle un outil de planification d'avenir (E. Kieffer et A. Serradj, 2013, p. 68).

De nombreux travaux de recherches sont effectués sur l'occupation du sol dans les pays ouest africains à partir de la télédétection, considérée comme outil d'observation continue de la terre et de l'environnement à différentes échelles. Au Bénin, on peut citer les travaux de C. Adeyemi *et al.* (2010, p.1) et de E.A. Tchibozo & P. Toundoh (2014, p.477) qui sont orientés vers l'inventaire des agrosystèmes par détection pour l'évaluation des ressources naturelles. Plus spécifiquement au nord-ouest du Bénin, ces travaux se rapportent à l'analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol et des paysages en zone soudanienne (Y.C.H. Hountondji, 2008, p.83 ; A. Mama *et al.*, 2013, p.78 ; J. Avakoudjo *et al.*, 2014, p.2620; H. Schulte To Buhne *et al.*, 2017, p. 195). En dehors du Bénin, d'autres travaux de recherche se sont focalisés sur l'appréciation de la dégradation de la végétation, des mutations de l'espace et leurs causes à partir des outils de la télédétection (A.S. Mamadou, 2009, p.11; H. Saadat *et al.*, 2011, p.609; P.K. Lira *et al.*, 2012, p.81; K.F. Munyemba & Bogaert, 2014, p.18; D.K. Kpedenou *et al.*, 2017, p.221).

Il ressort de la littérature que dans la commune de Karimama, la dynamique des terres est peu étudiée, et rarement mise en évidence par les techniques de la télédétection. Mais il n'existe pas encore des travaux de recherche utilisant la télédétection spécifiquement sur le secteur habité qui concentre les enjeux environnementaux et de développement, avec des tendances prédictives pour soutenir l'aménagement du territoire. C'est pour combler cette lacune que cette étude est initiée pour analyser les mutations spatiales du paysage et pour prédire les changements futurs de l'occupation du sol, en vue d'une gestion durable du territoire.

II. MATERIEL ET METHODES

2.1. Cadre d'étude

La commune de Karimama est située à l'extrême nord de la république du Bénin. Elle est subdivisée en cinq arrondissements et présente deux paysages tranchés : le parc national W qui constitue un espace naturel protégé et le secteur habité dédié à l'occupation humaine et constitué d'infrastructures de développement. Ce dernier, qui fait l'objet de cette étude est localisé entre le fleuve Niger au Nord-Est et le parc national W du Bénin au Sud-Ouest. Il est situé entre 11° 55' et 12° 24' latitude Nord et entre 2° 45 et 3°18 longitude Est (Figure 1). D'une superficie de 8500 ha, il représente à peu près le sixième de la superficie totale de la commune,

dont le reste est occupé par le parc W. Avec une altitude moyenne de 157 m, le relief est constitué en majorité de plateaux couverts par les sols ferrugineux, surmontés par endroit de collines dont les hauteurs peuvent atteindre 213 m (A. Mama *et al.*, 2013, p.79). Le substratum géologique est caractérisé par les formations du socle granito-gneissique très ancien et des dépôts du quaternaire (J. Avakoudjo *et al.*, 2014, p. 2610). Le climat dans cette zone est de type soudanien, avec deux saisons tranchées. Il est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle est de 833,24 mm et une température moyenne de 28 °C (ASECNA, 2010). Le secteur est limité au Nord par le fleuve Mékrou et au Sud par le fleuve Alibori, tous deux appartenant au bassin hydrographique du Fleuve Niger qui constitue la limite Nord-Est de la commune et sa frontière avec la République du Niger. Les formations végétales rencontrées sont composées de galeries forestières, de savanes saxicoles, des savanes arborées et arbustives. Ces formations sont entrecoupées des mosaïques de champs et de jachères.

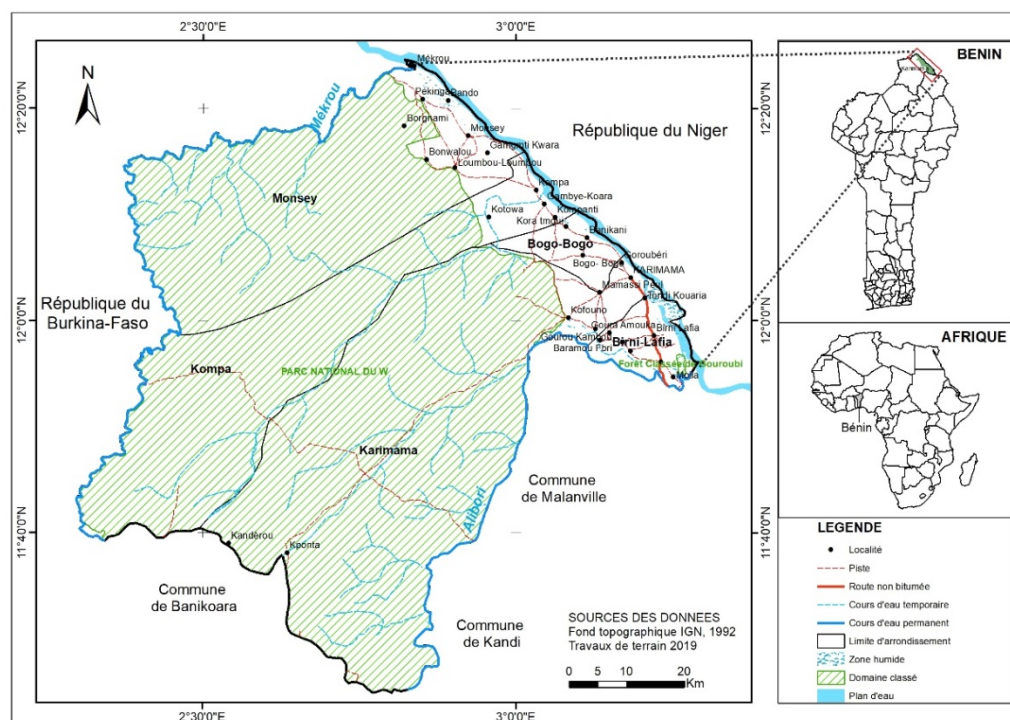


Figure 1. Situation géographique de la commune de Karimama et de son secteur habité

2.2. Données utilisées

Plusieurs données multi-sources ont été utilisées pour caractériser l'occupation du sol dans le secteur habité de la commune de Karimama. Il s'agit des feuilles topographiques au 1/200000 de Kirtachi ND-31-III ; Sabonga ND-31-IV ; Kandi NC-31-XXI et Gaya NC-31-XXII qui sont utilisées pour identifier le cadre de référence et l'analyse de l'état de surface. Ensuite, la scène 192-52 de l'imagerie satellite Landsat a été utilisée pour trois dates : 1988 (TM) ; 2003 (ETM+) et 2018 (OLI) pour faire la classification de l'occupation du sol. Les images utilisées sont choisies en fonction de la période de saison sèche pour limiter les contrastes phénologiques (C.O. Justice *et al.*, 1985, p.1278; J.I. Fisher *et al.*, 2006, p.268; E. Simonetti *et al.*, 2014, p.3). Enfin, les relevés de terrain sont effectués pour l'échantillonnage et le contrôle.

2.3. Traitement des données

Un prétraitement a été réalisé sur les feuilles topographiques et les images satellites. En effet, les feuilles ont été géo-référencées dans le système de référence WGS 84 UTM 31 N, numérisées et assemblées afin d'enrichir le SIG avec le cadre de référence du milieu. Sur les images satellites, des corrections géométriques et radiométriques ont été faites pour éliminer les biais atmosphériques et pour faciliter leur superposition aux feuilles topographiques. Ensuite, le rehaussement a été fait dans le but d'augmenter le contraste de couleur dans l'image, ce qui permet d'en faciliter le traitement et l'interprétation (Lebœuf *et al.*, 2015, p.3).

Le traitement numérique des images est réalisé sous le logiciel ENVI 5.3. Pour faire une bonne discrimination des unités d'occupation du sol, une photo-interprétation est réalisée, afin d'obtenir une reconnaissance des classes d'occupation de sol par

création de couches numériques de points de contrôle sur image. Ensuite, des compositions colorées en vraies couleurs sont réalisées par combinaison des bandes (C.A.B. Tohozin, 2016, p. 45). Sur la base conventionnelle de la signature spectrale affectée à chaque composition colorée, couplée à la connaissance du terrain, les valeurs radiométriques des pixels ont permis d'identifier les classes d'occupation du sol, confirmés par la couche numérique des points de contrôle relevés sur le terrain.

Une classification supervisée de l'image Landsat a été effectuée à travers la sélection des parcelles d'entraînement et l'utilisation de l'algorithme Maximum de Vraisemblance qui repose sur le principe de calcul de la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée ou non. Une matrice de confusion a été générée pour évaluer la qualité de la classification dans sa précision globale. Enfin, les données issues du traitement numérique sont vectorisées et exportées vers ArcMap 10.5 pour être intégrées dans le SIG et pour la production des cartes, le calcul des superficies et les analyses statistiques.

2.3.1. Analyse statistique des changements d'état de la végétation

Les analyses statistiques sont faites à partir du croisement des superficies générées pour les différentes dates.

(1) Taux global d'évolution Tg

Soit S1, la superficie d'une formation végétale à la date t1 et S2, la superficie de la même formation à la date t2 :

Le taux global Tg d'évolution est obtenu par la formule :

$$Tg = \frac{S2 - S1}{S1} \times 100$$

Avec Tg le taux global d'évolution, ΔS la variation de la superficie de la formation végétale étudiée entre t2 et t1 et S1 la superficie d'une formation végétale à la date t1.

(2) Taux moyen annuel d'expansion spatiale (Ta)

Dans le but obtenir une évaluation des mutations intervenues au sein de chaque unité d'occupation, le taux moyen annuel d'expansion spatiale a été calculé. Ce taux de changement s'évalue à partir de la formule de Bernier (1992), adoptée par J. Oloukoi (2012, p.75). Elle s'établit comme suit :

$$Ta = \frac{\ln S_2 - \ln S_1}{t_2 - t_1} \times 100$$

S1 et S2 : Superficie d'une unité paysagère à la date t1 et t2 respectivement ; t2-t1 : Nombre d'année d'évolution ; ln : Logarithme népérien ; e : Base des logarithmes népériens (e = 2,71828).

(3) Matrice de transition

La matrice de transition a permis de mettre en évidence les différentes formes de conversion qu'ont subies les unités paysagères entre deux dates. Elle est constituée de x lignes et de y colonnes. Le nombre x de lignes de la matrice indique le nombre d'unités paysagères présentes à la date t1 tandis que le nombre y de colonnes de la matrice indique le nombre d'unités paysagères converties à la date t2. Quant à la diagonale, elle renseigne sur les superficies des unités paysagères restées inchangées dans le temps. Dans cette matrice, les transformations se font des lignes vers les colonnes. Cette matrice s'obtient à partir du croisement des cartes de 1988 à 2003 ; de 2003 à 2018 et de 1988 à 2018.

2.3.2. Analyse prospective de l'occupation du sol

L'analyse prospective de l'occupation du sol repose sur une modélisation prédictive. Sur le sujet, plusieurs méthodes existent, parmi lesquelles « Land Change Modeler » (LCM), disponible sur IDRISI et comme extension de ArcGIS est largement expérimenté pour l'étude des changement d'occupation ou d'utilisation des sols (J-F. Mas *et al.*, 2014, p.100). Ces modèles reposent tous sur un processus commun de modélisation des changements des modes d'occupation et d'utilisation des sols. Le processus se décline en quatre modules qui servent à l'estimation quantitative des transitions, des probabilités, de la distribution des changements et de la reproduction des caractéristiques du paysage.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Mutations spatiales dans le secteur habité de la commune de Karimama entre 1988 et 2018

3.1.1.1. Cartographie de l'occupation du sol dans le secteur habité de Karimama entre 1988 et 2018

L'état de l'occupation du sol dans le secteur habité de Karimama entre 1988 et 2018 est cartographié et présenté sur la figure 2. On note sur cette figure, trois (03) cartes du secteur d'étude, respectivement pour les années 1988, 2003 et 2018. L'analyse de cette figure montre que les formations végétales constituées des savanes arborées, arbustives, les savanes saxicoles et les galeries forestières dominent le paysage jusqu'en 1988. Mais, sur les trois (03) décennies qui ont suivi, la structure spatiale de cette région a subi une forte anthropisation et les formations végétales ont cédé place aux mosaïques de champs et jachères, ainsi que les formations marécageuses. Plus précisément, sur les huit (08) classes d'occupation identifiées, les agglomérations, les zones marécageuses, les champs et jachères, et les plans d'eau ont connu une augmentation de leurs superficies, tandis que les savanes arborées arbustives, savanes saxicoles, les forêts galeries et les sols nus ont connu une diminution de leurs superficies. Les statistiques issues de ces observations sont présentées sur la figure 3.

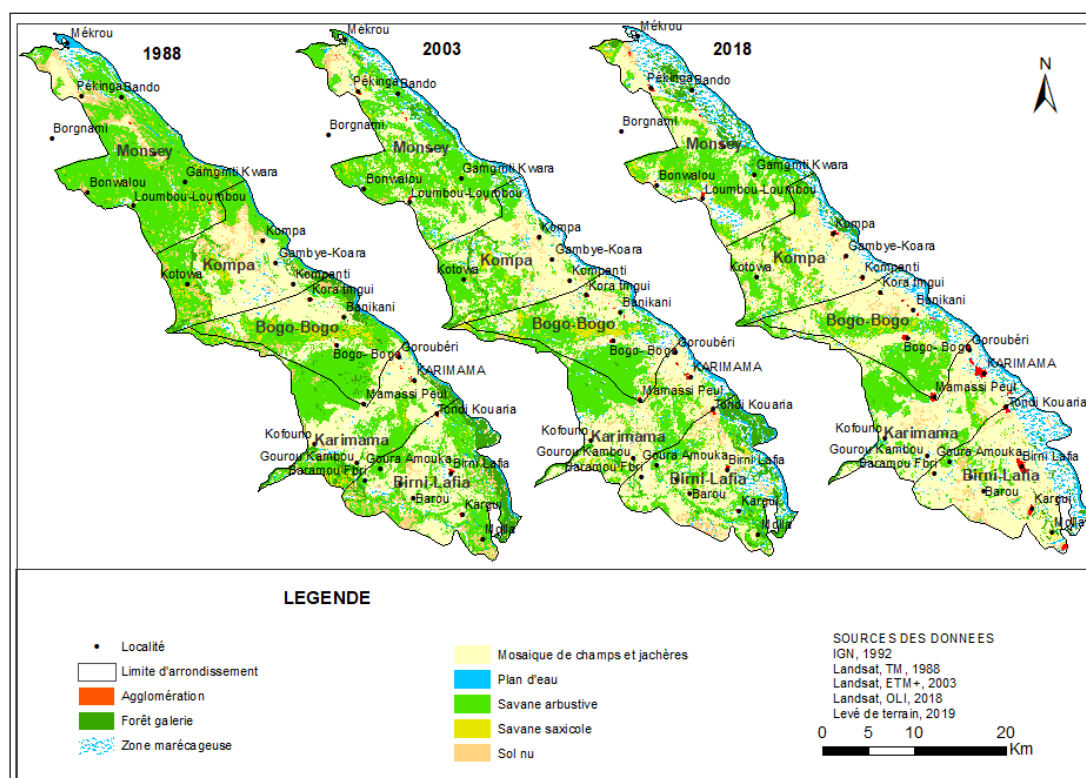


Figure 2. Cartes d'occupation du sol du secteur habité de Karimama pour les périodes 1988, 2003 et 2018

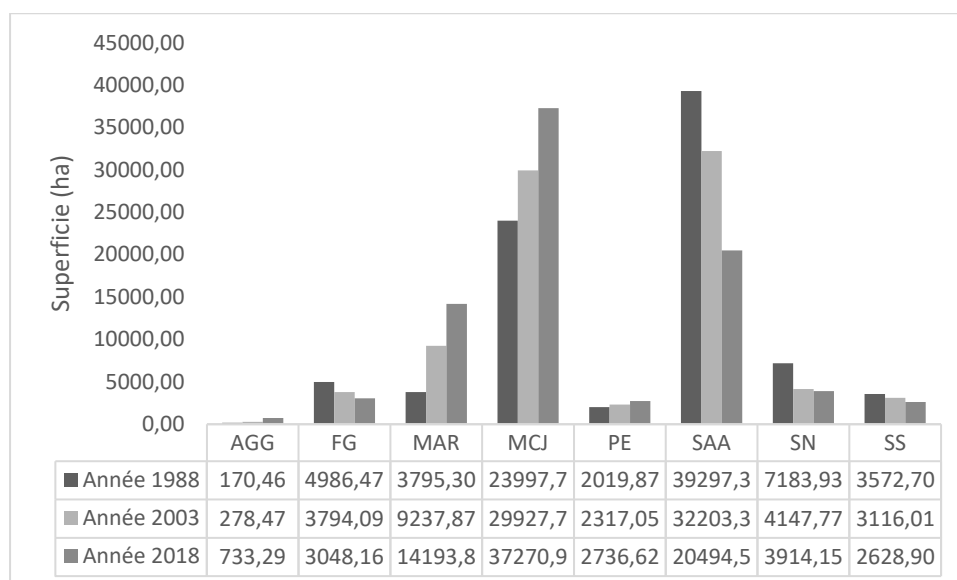


Figure 3. Variation des superficies d'occupation du sol à Karimama entre 1988 et 2018

AGG : Agglomération ; FG : Forêt galerie ; MAR : Marécage ; MCJ : Mosaïque de champs et jachères ; PE : Plan d'eau ; SAA : Savane arborée arbustive ; SN : Sol nu ; SS : Savane saxicole.

On note que sur une période de trente (30) ans, le fort taux d'évolution des superficies enregistré sur la classe des agglomérations dont la superficie est passée de 170,46 à 733,29 ha, soit une augmentation de 330,19%. La superficie des zones marécageuses est passée de 3795,30 à 14193,8 ha, soit une augmentation de 273,98%, celle des mosaïques de champs et jachères est passée de 23997,7 à 37270,9 ha, soit une évolution de 55,31%, puis celle des plans d'eau est passée de 2019,87 à 2736,62 ha, soit une augmentation de 35,48%. Par contre, au cours de la même période, les forêts galeries sont passées de 4986,47 à 3048,16 ha, soit une diminution de 38,87% de leur superficie. La même observation est faite pour les savanes saxicoles qui ont vu leur superficie passée de 3572,70 à 2628,90 ha, soit une diminution de 26,42%. La plus grande diminution de superficie est observée au niveau des savanes arborées et arbustives qui sont passées de 39997,7 à 20494,5 ha, soit une régression de 48,52% de leur superficie. Cependant, ces variations ne sont pas constantes sur la période considérée.

3.1.1.2. Analyse de la dynamique spatiale du secteur habité de Karimama entre 1988 et 2018

Les mutations spatiales du paysage sont analysées à travers les tableaux de matrice de transition des unités d'occupation des terres entre 1988 et 2003 ; entre 2003 et 2018, puis entre 1988 et 2018. Ces matrices renseignent sur la conversion des superficies d'une unité vers une autre et les proportions de superficies qui sont demeurées stables.

L'analyse du tableau I montre qu'entre 1988 et 2003, toutes les classes d'occupation ont connu une modification de leur superficie et le taux moyen de conversion des superficies est de 6,18 %. Le bilan des changements observés révèle 18,95 % de régression concernant surtout les formations végétales. Les surfaces ayant connu une progression représentent 30,12 % et celles en stabilité représentent 50,93%. La plus grande stabilité est observée au sein des savanes arborées arbustives, tandis que les forts taux de progression sont notés sur les mosaïques de champs et jachères, ce qui suggère une anthropisation du milieu. Entre 2003 et 2018, le processus d'anthropisation s'est poursuivi avec une modification des superficies de toutes les classes d'occupation. Le taux moyen de conversion des superficies au cours de cette période est de 6,21 % (Tableau II). Le bilan des changements observés révèle que le taux de régression des superficies est de 18,07 %, concernant toujours les formations végétales. Le taux de progression au cours de cette période est de 31,65 % alors que 50,28 % des terres sont restées stables. La plus grande stabilité est observée au sein des mosaïques de champs et jachères. Cependant, une augmentation remarquable superficies des zones marécageuses qui sont passées de 4,46 % à 16,69 % en 30 ans. Cette particularité dénote d'une mutation environnementale prononcée, attribuable aux inondations prolongées que connaît la zone et qui est due au débordement du fleuve Niger et aux grandes quantités de pluie qui tombent dans la région en peu de temps.

L'analyse du tableau III montre qu'entre 1988 et 2018, le taux moyen de conversion des superficies est de 6,62 %. Le bilan des changements observés révèle 14,83 % de régression concernant surtout les formations végétales. Les surfaces ayant connu une progression représentent 38,16 % et celles en stabilité représentent 47,01 %. La plus grande stabilité ainsi que les forts taux de régression et de progression sont observés au sein des mosaïques de champs et jachères. Globalement, il ressort de ces analyses que les changements spatiaux des classes d'occupations se sont opérés avec un rythme constant tous les 15 ans.

Tableau I : Matrice de transition des unités d'occupations du sol (%) entre 1988 et 2003

1988 - 2003	AGG	FG	MAR	MCJ	PE	SAA	SN	SS	Total (2003)
AGG	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21
FG	0,00	2,16	1,12	0,55	0,18	1,59	0,03	0,20	5,84
MAR	0,00	0,06	0,71	2,80	0,10	0,62	0,29	0,03	4,61
MCJ	0,08	0,02	2,14	18,07	0,09	4,67	3,02	0,30	28,40
PE	0,00	0,16	0,11	0,06	1,99	0,14	0,01	0,00	2,46
SAA	0,02	1,70	5,22	9,66	0,34	26,39	0,80	2,20	46,33
SN	0,02	0,07	1,16	3,60	0,00	2,43	0,65	0,21	8,16
SS	0,00	0,27	0,23	0,37	0,04	2,35	0,02	0,75	4,01
Total (1988)	0,34	4,44	10,68	35,10	2,74	38,19	4,81	3,70	100

AGG : Agglomération ; FG : Forêt galerie ; MAR : Marécage ; MCJ : Mosaïque de champs et jachères ; PE : Plan d'eau ; SAA : Savane arborée arbustive ; SN : Sol nu ; SS : Savane saxicole.

Tableau II : Matrice de transition des unités d'occupations du sol (%) entre 2003 et 2018

2003 -2018	AGG	FG	MAR	MCJ	PE	SAA	SN	SS	Total (2018)
AGG	0,32	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34
FG	0,00	1,12	2,24	0,42	0,22	0,30	0,04	0,12	4,48
MAR	0,09	0,70	4,46	3,27	0,35	1,25	0,42	0,20	10,73
MCJ	0,31	0,25	4,27	24,07	0,17	3,50	2,17	0,40	35,14
PE	0,00	0,07	0,32	0,04	2,22	0,04	0,04	0,01	2,75
SAA	0,04	1,38	4,53	12,05	0,21	16,99	1,25	1,60	38,05
SN	0,07	0,00	0,67	3,39	0,01	0,23	0,44	0,03	4,83
SS	0,00	0,03	0,32	0,97	0,02	1,59	0,10	0,66	3,68
Total (2003)	0,83	3,55	16,81	44,23	3,20	23,92	4,45	3,01	100

AGG : Agglomération ; FG : Forêt galerie ; MAR : Marécage ; MCJ : Mosaïque de champs et jachères ; PE : Plan d'eau ; SAA : Savane arborée arbustive ; SN : Sol nu ; SS : Savane saxicole.

Tableau III : Matrice de transition des unités d'occupations du sol (%) entre 1988 et 2018

1988 - 2018	AGG	FG	MAR	MCJ	PE	SAA	SN	SS	Total (2018)
AGG	0,19	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21
FG	0,00	0,76	2,88	0,79	0,34	0,72	0,11	0,25	5,84
MAR	0,04	0,14	1,68	2,20	0,08	0,18	0,28	0,01	4,61
MCJ	0,46	0,05	1,91	22,09	0,06	1,70	1,85	0,28	28,40
PE	0,00	0,09	0,30	0,02	2,03	0,01	0,01	0,01	2,46
SAA	0,05	2,12	7,64	14,26	0,60	18,76	1,28	1,63	46,33
SN	0,10	0,24	2,02	4,07	0,02	0,73	0,82	0,16	8,16
SS	0,00	0,17	0,33	0,75	0,03	1,94	0,10	0,68	4,00
Total (1988)	0,84	3,56	16,76	44,18	3,16	24,04	4,44	3,01	100

AGG : Agglomération ; FG : Forêt galerie ; MAR : Marécage ; MCJ : Mosaïque de champs et jachères ; PE : Plan d'eau ; SAA : Savane arborée arbustive ; SN : Sol nu ; SS : Savane saxicole.

En terme d'expansion, l'analyse du tableau IV confirme que les forêts galeries, les savanes arborées arbustives les sol nus et les savanes saxicoles ont regressé au profit des agglomérations, des zones marécageuses, des mosaïques de champs et jachères et des plans d'eau. Le plus fort taux d'expansion est noté sur les zones marécageuses (5,83%) entre 1988 et 2003 et sur la classe des agglomération (6,46%) entre 2003 et 2018. Toutefois, la plus grande expansion annuelle des terres est observée sur la classe d'agglomération avec un taux de 4,86% sur toute la période de 1988 à 2018.

Tableau IV : Taux annuel d'expansion spatiale des classes d'occupation du sol

Classes	Taux annuel d'expansion spatiale (%)		
	1988-2003	2003-2018	1988-2018
AGG	3,27	6,46	4,86
FG	-1,82	-1,46	-1,64
MAR	5,93	2,86	4,40
MCJ	1,47	1,46	1,47
PE	0,92	1,11	1,01
SAA	-1,33	-3,01	-2,17
SN	-3,66	-0,39	-2,02
SS	-0,91	-1,13	-1,02

AGG : Agglomération ; FG : Forêt galerie ; MAR : Marécage ; MCJ : Mosaïque de champs et jachères ; PE : Plan d'eau ; SAA : Savane arborée arbustive ; SN : Sol nu ; SS : Savane saxicole.

3.1.2. Modélisation prospective des mutations spatiales dans le secteur habité de karimama : une scénarisation vers l'horizon 2033

3.1.2.1. Probable état de l'occupation du sol à l'horizon 2033 dans le secteur habité de Karimama

La modélisation spatiale du sol à l'horizon 2033 révèle que le secteur habité de Karimama sera toujours constitué de huit (08) classes d'occupation (Figure 3). Ainsi, entre 2018 et 2033, la superficie des agglomérations serait passée de 733,29 à 1082,83 ha, soit une augmentation de 47,67%, ce qui fait de cette classe, celle qui aurait connu le fort taux d'évolution. Les faibles taux d'évolution seront notés sur les champs et jachères verront leur superficie passée de 37270,9 à 42224,9 ha, soit une augmentation de 13,29 %. La superficie des sols nus passera de 3914,15 à 4165,15 ha, soit une augmentation de 6,43%, les plans d'eau aussi passeront de 2736,62 à 2950,45 ha, soit une progression de 7,83 % et enfin les marécages passeront de 14193,8 à 14596,9 ha, soit une augmentation de 2,84 %. Par contre les savanes arborées arbustives connaîtront le fort taux régression (24,83 %) avec une diminution de leur superficie de 20484,5 à 15405,6 ha. Viendront ensuite les savanes saxicoles qui sont passées de 2628,9 à 2043,15 ha, soit une diminution de 22,28 %. La même tendance sera observée sur les forêts galeries qui passeront de 3048,16 à 2548,06 ha, soit une régression de 16,41%.

Face à cette dynamique, on y observera que les grandes entités spatiales seront constituées de champs et jachères (50 %), de savane arborée arbustive (18 %) et de marécages (17 %). Les autres entités spatiales seront constituées des agglomérations (4 %), des plans d'eau (4%), des forêts galeries (3 %), des sols nus (5 %), des savanes saxicoles (2 %) et de 1 % d'agglomération (Figure 4).

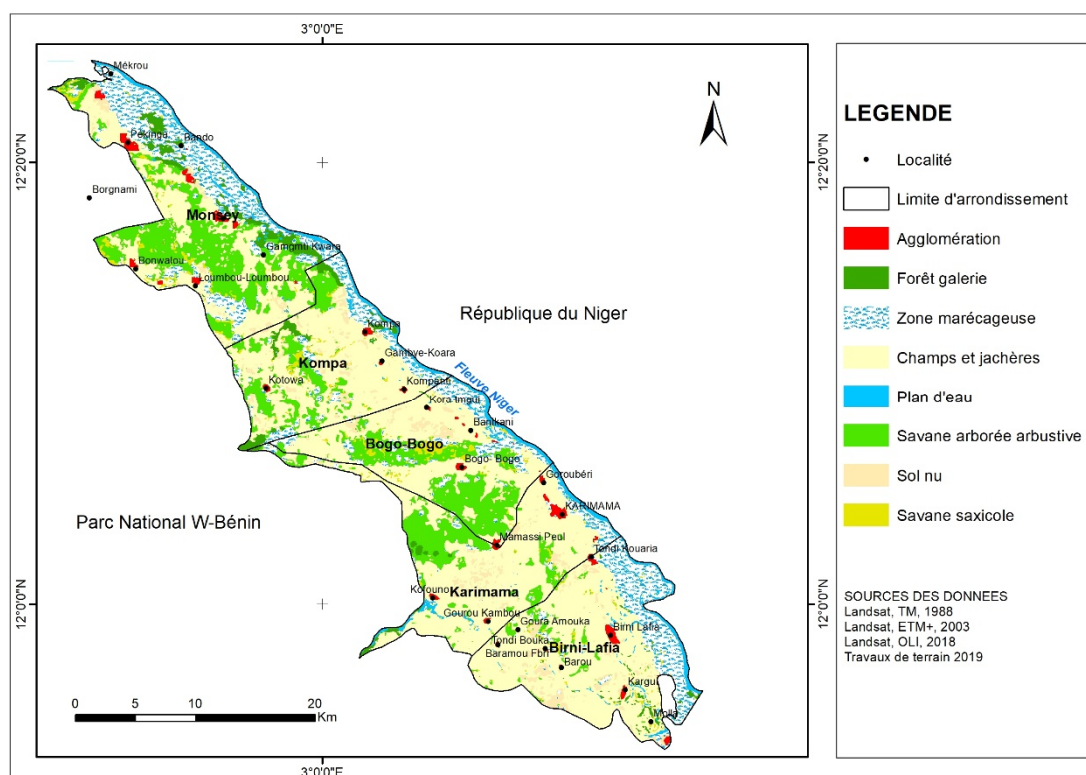


Figure 3. Prédiction de l'occupation du sol du secteur habité de Karimama en 2033

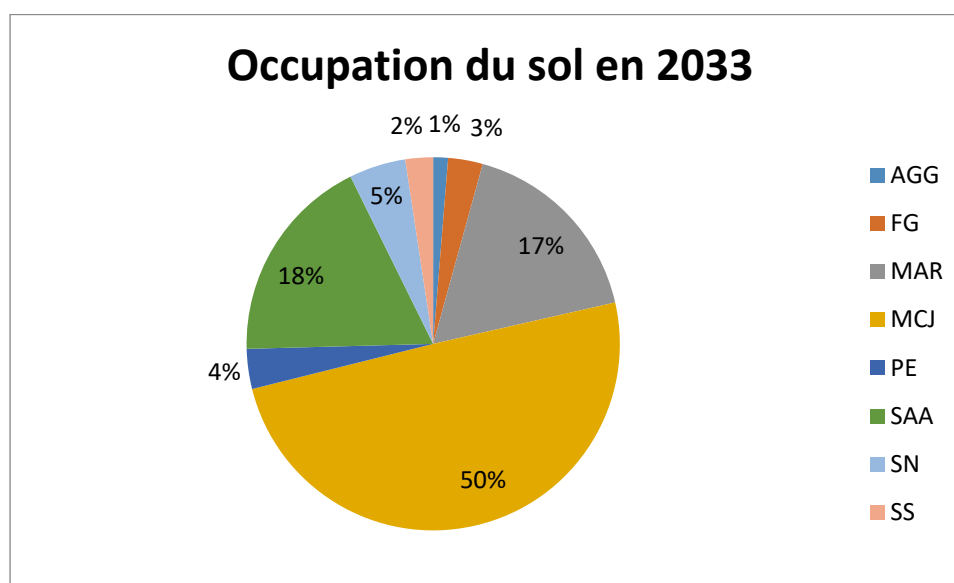


Figure 4. Proportion des superficies d'occupation du sol à Karimama à l'horizon 2033

AGG : Agglomération ; FG : Forêt galerie ; MAR : Marécage ; MCJ : Mosaïque de champs et jachères ; PE : Plan d'eau ; SAA : Savane arborée arbustive ; SN : Sol nu ; SS : Savane saxicole.

3.1.2.2. Tendances évolutives des classes d'occupation à l'horizon 2033

La plupart des classes conservent une probabilité de stabilité supérieure à 0,5, à l'exception des savanes saxicoles ($p = 0,28$), des forêts galeries ($p = 0,2$) et des sols nus ($p = 0,13$) dont la chance de stabilité est faible dans le futur (Tableau V). Ainsi, la

probabilité de conversion des forêts galeries en marécage est la plus forte ($p = 0,59$). Elle est suivie de la conversion remarquable des sols nus ($p = 0,44$) et des marécages en ($p = 0,37$) en champs et jachères. Il en résulte que si les facteurs de dégradation sont maintenus jusqu'à l'horizon 2033, les forêts galeries, les sols nus vont considérablement perdre de superficies alors que zones marécageuses et les champs et jachères verront leurs superficies augmentées, et par conséquent, constituent les tendances évolutives de l'occupation du sol dans le secteur habité de la commune de Karimama.

Tableau V : Matrice de probabilité des changements des classes d'occupation à l'horizon 2033

	AGG	FG	MAR	MCJ	PE	SAA	SN	SS
AGG	0,97	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
FG	0,00	0,20	0,59	0,00	0,05	0,11	0,00	0,05
MAR	0,00	0,03	0,50	0,37	0,01	0,03	0,05	0,00
MCJ	0,01	0,00	0,04	0,83	0,00	0,04	0,07	0,01
PE	0,00	0,02	0,06	0,00	0,91	0,00	0,00	0,00
SAA	0,00	0,06	0,14	0,19	0,01	0,55	0,02	0,04
SN	0,01	0,03	0,29	0,44	0,00	0,08	0,13	0,02
SS	0,00	0,05	0,01	0,04	0,00	0,59	0,02	0,28

AGG : Agglomération ; FG : Forêt galerie ; MAR : Marécage ; MCJ : Mosaïque de champs et jachères ; PE : Plan d'eau ; SAA : Savane arborée arbustive ; SN : Sol nu ; SS : Savane saxicole.

3.2. Discussion

L'utilisation de l'approche par télédétection dans cette étude a été d'une grande utilité dans la quantification des unités d'occupation du sol sur une trentaine d'année depuis 1988 à nos jours et sur les probables changements dans le futur. Ainsi, même si les images Landsat utilisées, de par leur faible résolution ne permettent pas de discriminer les moindres détails de l'espace étudié, elles ont permis d'identifier les grandes tendances de l'occupation du sol entre 1988, 2003 puis 2018, et d'apprécier les formes de changement intervenus dans le paysage du secteur habité de la commune de Karimama. Du fait de sa fiabilité, cette approche est couramment utilisée pour l'observation de la terre, notamment pour informer sur les changements d'état de la végétation (L.M. Rebelo *et al.*, 2009, p. 2149 ; A. Mama *et al.*, 2013, p.84 ; E.A. Tchibozo & P. Toundoh, 2014, p.480). Ceci à cause de la précision qu'offrent les algorithmes de classification supervisée des images qui conduisent à des statistiques spatiales proches de la réalité (V.T.S.Kabba & J. Li, 2011, p. 106).

3.2.1. Etat de l'occupation du sol et sa dynamique dans le secteur habité de Karimama

Dans la zone d'étude, huit (08) classes d'occupation du sol retenues (Agglomération, forêt galerie, savane arborée arbustive, savane saxicole, marécage, mosaïque de champs et jachères, plan d'eau et sol nu). Mais, la photo-interprétation des scènes de 1988 a laissé entrevoir quelques pixels assimilables aux forêts claires et aux forêts denses dégradées, comme l'avaient observé J. Avakoudjo *et al.* (2013, p. 2620) dans la même zone en 1990. Cependant, ces classes présentent des valeurs radiométriques très proches qui ne permettent pas de les dissocier des forêts galeries ou des savanes arborées arbustives dont les pixels sont largement représentatifs. De plus, elles n'apparaissent plus en 2003 et 2018, ce qui explique qu'elles étaient en phase de conversion totale vers d'autres classes. Cette contrainte n'a pas facilité la différenciation de certains type d'occupation du sol (H. Diallo *et al.*, 2011, p.105), et a motivé le regroupement des unités d'occupation de sol suivant l'homogénéité de la texture de l'image, telle que décrit par K. E. N'guessan *et al.* (2006, p. 320). La complexité de la discrimination entre les classes de végétation provient aussi de l'impact des inondations prolongées en zone humides qui confère les mêmes caractères phénologiques à certaines classes (L.M. Rebelo *et al.*, 2009 p.2150). Toutefois, la validation du choix des classes obtenues a été conditionnée par la corrélation du résultat de la photo-interprétation avec la vérité de terrain.

Du point de vue statistique, les plus grandes conversions sont observées au niveau des formations végétales : 47,85% pour les savanes saxicoles, 45,52% pour les savanes arborées et arbustives et 38,87% pour les galeries forestières. Ces unités se sont converties surtout en mosaïques de champs et jachères et en marécages. Ces résultats sont confirmés par les travaux de J. Avakoudjo *et al.*, (2014, p.2620) qui ont également observé que les savanes arborées et arbustives ont diminué tandis que les mosaïques de champs et jachères ont connu une augmentation de leur superficie, ce qui caractérise une tendance d'anthropisation de la zone. Une

particularité s'observe tout de même au sein des agglomérations et des marécages. En effet, les taux de conversion de ces deux unités sont respectivement estimés à 330,19% et 273,98%, ce qui signifie que leurs superficies ont plus ou moins triplées en trente (30) ans. D'une part, l'expansion considérable des agglomérations, qui n'est que la manifestation d'une croissance démographique dans la commune, dont les populations ont besoin d'espace pour se loger et vient confirmer le phénomène d'anthropisation évoqué dans les études de la dynamique de l'occupation du sol (K.F. Munyemba & J. Bogaert, 2014, p.19), et est une tendance commune aux zones soudaniennes (Y.C.H. Hountondji, 2008, p.52; A. Mama *et al.*, 2013, p.79). D'autre part, l'augmentation remarquable des zones marécageuses résulte du débordement régulier du fleuve Niger et de ses affluents (Mékrou et Alibori) en période de crue depuis l'an 2000, à cause des pluies diluviennes, souvent concentrées sur une courte période. Ce qui provoque des inondations prolongées, qui sont parfois aggravées par l'ensablement des cours d'eau et l'érosion des berges (B. Babadankpodji et S. Chabi, 2014, p.13). Les observations sur le terrain ont montré que ces inondations sont devenues récurrentes et touchent les cinq (5) arrondissements de la commune, avec de lourdes conséquences telles l'usure des infrastructures sociocommunitaires et le déplacement saisonnier des populations. Face à une telle situation une planification spatiale s'impose avec une vision à long terme.

3.2.2. Mutations spatiales et analyse prospective du paysage à Karimama

Cette étude a montré le rôle joué par les facteurs anthropiques et naturels dans la dynamique paysagère de Karimama. Le même constat est fait par D.K. Kpedenou *et al.* (2016, p.139) sur la dynamique spatiale du sud-est du Togo. En effet, dominé par des forêts galeries et des savanes arborées arbustives en 1988, une grande partie du territoire habité de la commune s'est progressivement convertie en champs et jachères et en marécage. Et depuis une dizaine d'année, la tendance est maintenue et semble irréversible. Il s'agit d'une mutation spatiale entretenue par le front agricole et les aléas climatiques. Du point de vue écologique, la transformation importante de certaines classes d'occupation en marécage depuis une dizaine d'années, et dont la probabilité indique une récupération des champs et jachères sur environ 37% met en place un nouvel écosystème de formations marécageuses et confirme le phénomène de mutation spatiale remarquable de l'espace, à prendre en compte pour les prises de décision. L'augmentation importante des superficies des zones marécageuses est attribuée aux inondations prolongées dans la région depuis 2010. Ce phénomène pourrait créer de nouvelles conditions sélectives pour la biodiversité sur place. En effet, les formations végétales ne supportant pas de grandes quantités d'eau se verront éliminées au profit des écosystèmes des zones humides. De même, les récoltes et les agglomérations sont détruites au cours de cette période et obligent les populations à migrer temporairement vers les terres élevées. Les statistiques sur les classes d'occupations ont montré que le rythme des changements est constant tous les 15 ans. La population étant majoritairement agricole, la demande en terre cultivable et l'utilisation des ressources évoluent avec la croissance démographique. Cela implique également que les ressources du secteur habité ne subissent pas autres pressions que celles provoquées par les aléas naturels et les communautés sur place. A ce rythme, les zones marécageuses et les champs et jachères verront leurs superficies augmentées pour les 15 prochaines années, et par conséquent, constituent les tendances évolutives de l'occupation du sol dans le secteur habité de la commune de Karimama.

3.2.3. Implications de l'étude pour l'aménagement du territoire dans la commune de Karimama

Une étude similaire réalisée sur l'ensemble de la commune de Karimama par J. Avakoudjo *et al.* (2013, p. 2609) avait déjà confirmé le phénomène d'anthropisation des terres, mais orientée sur la dégradation du parc national W qui représente une aire protégée. En effet, la prise en compte du secteur habité, considéré comme espace de développement et qui représente le cinquième de la superficie totale de la commune, réduit les erreurs de traitement, permet de circonscrire l'étude et apporte plus de précision dans l'analyse. Ce qui a permis de révéler des détails pertinents sur les changements d'état et sur la conversion des terres (E.F. Lambin *et al.*, 2003, p.220). Ainsi, à l'échelle réduite, l'étude a permis de mettre l'accent sur le phénomène des inondations récurrentes qui constitue une contrainte majeure pour le développement de la commune (B. Babadankpodji et S. Chabi, 2014, p.13). De plus la persistance des inondations et l'augmentation du taux de couverture des zones marécageuses favorisent l'apparition d'un écosystème typique de prairie marécageuses au cours de ces 30 dernières années dans le secteur d'étude, et confirme qu'il s'agit d'une mutation paysagère provoquée par les contraintes naturelles (B.L. Turner *et al.*, 1995, p. 20667). Malgré la conversion considérable des formations végétales en champs et jachères, de grandes taches de savanes arborées arbustives subsistent. La restauration des paysages forestiers, qui englobe la gestion des terres, la protection de la biodiversité et la lutte contre le changement climatique, apparaît désormais comme un élément central des stratégies dans ce domaine (P. Besseau *et al.*, 2018, p. 12). Il est alors impérieux de reconstituer le paysage afin de lui donner son sens. De telles informations sont utiles pour les décideurs et pour envisager la révision des documents stratégiques de développement territorial dans la commune. Ces informations pourront aider les décideurs à travers la définition de l'aménagement du territoire, qui selon J.M. Demba (2010, p. 16) a un caractère curatif, car

il vise à résorber un déséquilibre ou une anomalie sur le plan de l'organisation spatiale, conséquence des mauvais choix économico-politiques, et donc de développement.

IV. CONCLUSION

La disponibilité des images d'archives a rendu possible l'utilisation de l'approche diachronique à partir des techniques de télédétection pour la mise en évidence de l'occupation du sol passée, actuelle et future dans le secteur habité de la commune de Karimama. Les résultats ont montré que sur les trente dernières années, le paysage du secteur habité de cette commune a considérablement changé. D'une part, on y observe un phénomène d'anthropisation provoqué par une conversion des formations végétales en zones de cultures et de jachères. D'autre part l'étude a révélé que le secteur d'étude est en pleine mutation, notamment les zones de plaine inondables autrefois occupées par les galeries forestières et les savanes arborées arbustives qui se sont transformées en zones marécageuses sous l'effet des aléas naturels. L'analyse prospective réalisée sur les données montre que si aucune mesure d'aménagement n'est prise, les deux tendances évoquées vont se poursuivre jusqu'en 2033 et risquent de compromettre la disponibilité des services écosystémiques à travers l'érosion de la biodiversité sur place. Au regard de ces observations, la révision de tous les documents stratégiques de la commune s'impose, notamment le schéma directeur d'aménagement qui devra aboutir à des scénarii dont les options permettront un développement équilibré de la commune.

REMERCIEMENTS

Nous remercions très sincèrement les autorités de la Commune de Karimama pour leur franche et fructueuse collaboration.

RÉFÉRENCES

- [1] Adeyemi C. Oloukoi J., Mama V.J. et Kiepe P. 2010. Inventaire par télédétection des agro-écosystèmes de bas-fonds dans le centre du Bénin. Cahiers Agricultures. Volume 19, Numéro 6, 446-53.
- [2] Avakoudjo J., Mama A., Toko I., Kindomihou V. & Sinsin B. 2014. Dynamique de l'occupation du sol dans le Parc National du W et sa périphérie au nord-ouest du Bénin. Int. J. Biol. Chem. Sci. 8(6): 2608-2625.
- [3] Babadankpodji B. & Chabi S. 2014. Plan de contingence communal de Karimama, Consortium Afrique Expertise-BFA Group. 66 p.
- [4] Bernier B., 1992. Introduction à la macroéconomie. Dunod, Paris, 217p.
- [5] Besseau P., Graham S. & Christophersen T. 2018. Restaurer les paysages forestiers : la clé d'un avenir durable, Partenariat mondial pour la restauration des paysages forestiers, Vienne, Autriche. ISBN 978-3-903258-02-0, 25 p.
- [6] Bonn F., Rochon R. 2000. Précis de Télédétection. Volume 1 : Principes et méthodes, Presses de l'Université du Québec / AUPELF, 485 p.
- [7] Burel F. & Baudry J., 2003. Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications. Paris, France : Tec & Doc. 359 p.
- [8] Demba J. M. 2010. Aménagement du territoire et prospective territoriale au Sénégal : enjeux, limites et perspectives. Mémoire de Master 2 en Aménagement du territoire, décentralisation et développement local à l'UCAD, Dakar, Sénégal, P. 60.
- [9] Diallo H., Bamba I., Barima Y.S.S., Visser M., Ballo A., Mama A., Vranken I., Maiga M., & Bogaert J. 2011. Effets combinés du climat et des pressions anthropiques sur la dynamique évolutive de la dégradation d'une aire protégée du Mali (la Réserve de Fina, Boucle du Baoulé). Sécheresse, 22, 97-107.
- [10] Fisher J.I., Mustard J.F. & Vadeboncoeur M.A. 2006. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. Remote Sensing of Environment 100, 265 -279.
- [11] Gandonou M. Bossou S. Zannou O. Hounkpèvi D. 2006. Schéma Directeur d'Aménagement de la Commune de Karimama. Rapport de Consultation PRODECOM/Union Européenne. CARTOGEST, 90 p.
- [12] Girard M. C. & Girard C. M., 1999, Traitement des données de télédétection. Dunod, Paris, 529 pages. Congalton, G. R., «A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data», Remote Sensing of Environment, 46, 1991, pp. 35-37.

- [13] Hountondji Y.C.H. 2008. Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Liège, 153 p.
- [14] Justice C.O., Townshend J.R.G. Holben B.N. & Tucker C.J. 1985, Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6:8, 1271-1318,
- [15] Kpédénou D.K., Drabo O., Ouoba P.A., Da C.E.D. & Tchamié T.T. K. 2017. 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.
- [16] Kabba S.T.V. & Li J. 2011. Analysis of land use and land cover changes, and their ecological implication in Wuhan, China. *Journal of Geography and Geology*, 3, 104-118.
- [17] Kieffer E. et Serradj A., 2013, La télédétection au service des études urbaines : expansion de la ville de Pondichéry entre 1973 et 2009. *Géomatique Expert*, N° 95, Novembre-Décembre 2013, pp. 68-79.
- [18] Lambin E.F., Geist H.J. & Lepers E. 2003: Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Annu. Rev. environ. Resour.*, Vol. 28, pp. 205-241. *Cahiers du Cerleshs*, Numéro 55, pp. 203-227.
- [19] Lebœuf A., Samson M.P., Paquet A. 2015. Guide d'interprétation des mosaïques d'images satellite Landsat, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs Secteur des forêts, Mars 2015, Québec, 22 p.
- [20] Lira P.K., Tambosi L.R., Ewers R.M., Metzger J.P. 2012. Land-use and land-cover change in Atlantic Forest landscapes. *Forest Ecology and Management* 278, 80–89.
- [21] Mama A., Sinsin B., De Canniere C., & Bogaert J. 2013. Anthropisation et dynamique des paysages en zone soudanienne au nord du Bénin. *TROPICULTURA*, 31, (1), 78-88.
- [22] Mamadou A. S. 2009. Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeo : European Journal of Geography Environnement, Nature, Paysage*, URL : <http://cybergeo.revues.org/22707> ; DOI : 10.4000/cybergeo.22707
- [23] Mas J-F., Kolb M., Paegelow M., Camacho Olmedo M. T. & Houet T., 2014. Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Elsevier, Environmental Modelling & Software*. 51 (2014), pp. 94-111.
- [24] Munyemba K. F. & Bogaert J. 2014. Anthropisation et dynamique spatiotemporelle de l'occupation du sol dans la région de Lubumbashi entre 1956 et 2009. *Revue électronique de l'Université de Lubumbashi. E-Revue UNILU e-revue UNILU* 1 : 3-23.
- [25] Maiga M., & Bogaert J. 2011. Effets combinés du climat et des pressions anthropiques sur la dynamique évolutive de la dégradation d'une aire protégée du Mali (la Réserve de Fina, Boucle du Baoulé). *Sécheresse*, 22, 97-107.
- [26] Nguyen H., Mcalpine C., Pullar D., Johansen K. & Duke N.C. 2013. The relationship of spatial-temporal changes in fringe mangrove extent and adjacent land-use: Case study of Kien Giang coast, Vietnam. *Ocean and Coastal Management*, 76, 12-22.
- [27] N'guessan K.E., Dibi N'dah H., Bellan M-F. & Blasco F., 2006, Pression anthropique sur une réserve forestière en Côte d'Ivoire: Apport de la télédétection. *Télédétection*, 5, 307-323.
- [28] Ouoba A.P. 2013. Changements climatiques, dynamique de la végétation et perception paysanne dans le Sahel burkinabè. Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou de Géographie, 305p.
- [29] Oszwald J., 2005, Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000) : Suivi par télédétection et développement d'une approche cartographique. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France. 304 p.
- [30] Pham T.H., Bonn F., & Dubois J.M. 2007. Démarche méthodologique pour la détection des changements d'un milieu morcelé en utilisant des images de moyenne résolution spatiale : application d'une région littorale au Viet-Nam. *Télédétection*, Vol. 7, No1-2-3-4, pp.303-323.

- [31] Rebelo L.M., Finlayson C.M. & Nagabhatla N. 2009. Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. *Journal of Environmental Management* 90, 2144-2153.
- [32] Saadat H., Adamowski J., Bonnell R., Sharifi F., Namdar M., Ale-Ebrahim S. 2011. Land use and land cover classification over a large area in Iran based on single date analysis of satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, 608–619.
- [33] Schulte To Bühne H., Wegmann M., Durant S.M., Ransom C., De Ornellas P., Grange S., Beatty H. & Pettorelli N. 2017. Protection status and national socio-economic context shape land conversion in and around a key transboundary protected area complex in West Africa. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 2017; 3 (4):190–201
- [34] Simonetti E., Simonetti D. & Preatoni D. 2014. Phenology-based land cover classification using Landsat 8 time series. EUR – Scientific and Technical Research series, 57p. Technical reports, Publications Office of the European Union.
- [35] Tchibozo E.A. & Toundoh O.P. (2014) Détection localisée des zones dégradées de végétation par télédétection : application à la zone de transition entre le bassin sédimentaire et le socle cristallin (Centre-Bénin). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 11. 477-493.
- [36] Tohozin C. A. B. (2016) Etalement urbain et restructuration de la ville de Porto-Novo. Thèse de Doctorat Unique de Géographie de l'Université d'Abomey-Calavi, 309 p.
- [37] Turner B. L., Lambin E. F., & Reenberg A., 2007: The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 104, No52, pp. 20666–20671.