

Dynamique spatio-temporelle des écosystèmes dans la Forêt classée de Bana, Ouest nigérien

**Abdoul Rachid DJIBO IDE^{1*}, Maman Maarouhi INOUSSA¹, Amani ABDOU²,
Abdoul-Latif Hamani NOMA¹, Malick AMADOU INOUSSA³, Abdoulaye Abdou SIRADJI¹
et Yacoubou BAKASSO¹**

¹ *Université Abdou Moumouni de Niamey, Département de Biologie, Faculté des Sciences et Techniques,
Laboratoire Garba Mounkaila, BP 10662 Niamey, Niger*

² *Institut National de la Recherche Agronomique du Niger, Département Gestion des Ressources Naturelles
(DGRN), Laboratoire des Analyses des Sols, Eaux, Végétaux et Engrais, BP 429 Niamey, Niger*

³ *Université de Diffa, Institut Supérieur en Environnement et Écologie, Laboratoire d'Agroécologie et
d'élevage, BP 78, Diffa, Niger*

(Reçu le 02 Janvier 2026 ; Accepté le 27 Avril 2026)

* Correspondance, courriel : idedjiboabdoul1992@gmail.com

Résumé

Au Sahel, la dégradation de la végétation résulte généralement des activités anthropiques cumulativement aux impacts du changement climatique. Niger, cette situation met en péril l'utilisation durable et l'équilibre écologique des écosystèmes même dans les aires protégées. Pour l'aménagement dans ces aires protégées, il est essentiel d'acquérir des données sur les formations forestières qu'ils regorgent. L'objectif de cette étude est d'évaluer la dynamique spatio-temporelle des écosystèmes dans la forêt classée de Bana. La méthode utilisée est la numérisation visuelle pour délimiter les unités homogènes. Les images satellitaires Landsat 4 (1992), Landsat 7 (2002 et 2012) et Landsat 9 (2022) ont été exploitées à l'aide des SIG et de la télédétection. Une analyse diachronique des données satellitaires a été réalisée et l'approche de la classification supervisée par les méthodes de maximum de vraisemblance à partir des compositions colorées a été retenue en vue de la discrimination des classes et de la réalisation des cartes d'occupation du sol de la forêt. Six classes d'occupation du sol ont été discriminées. Les précisions globales et les coefficients Kappa obtenus pour les images classifiées respectivement de 97,61% (0,96) ; 94,85% (0,92) ; 95,11% (0,93) et 96,26% (0,95) pour 1992, 2002, 2012 et 2022. Ces résultats montrent que des changements majeurs ont été observés comme la réduction des superficies des savanes arborées, la savanisation de la forêt protégée et la progression des champs et des jachères. La tendance évolutive des formations végétales est essentiellement régressive pour les savanes arborées et arbustives avec une diminution de 423,27 ha à 246,6 ha entre 2002 et 2012, soit un taux de régression de 41,88%. Par contre, elle est progressive pour les mosaïques champs/jachères dont les superficies ont passé de 141,03 ha en 2002 à 293,95 ha en 2012, soit un taux de progression de 108,43% en 10 ans. Les facteurs de cette dégradation sont principalement d'ordre anthropique (surpâturage et agriculture).

Mots-clés : *forêt classée, dynamique, gestion durable, imagerie satellitaire, Bana.*

Abstract

Spatio-temporal dynamics of ecosystems in the Bana Classified Forest, Western Niger

In the Sahel, vegetation degradation is primarily driven by human activities coupled with the impacts of climate change. In Niger, this dynamic poses a threat to the sustainable use and ecological balance of ecosystems, including those within protected areas. Effective management of these zones requires precise data on their internal forest formations. This study aims to assess the spatio-temporal dynamics of ecosystems within the Bana Classified Forest. The methodology employed manual digitization to delineate homogeneous units, utilizing Landsat 4 (1992), Landsat 7 (2002 and 2012), and Landsat 9 (2022) satellite imagery processed through GIS and remote sensing techniques. A diachronic analysis of the satellite data was conducted, and a supervised classification approach—using maximum likelihood algorithms based on color composites—was selected to distinguish between classes and generate land cover maps. Ultimately, six lands use classes were distinguished. The overall accuracies and Kappa coefficients obtained for the classified images were 97.61% (0.96), 94.85% (0.92), 95.11% (0.93), and 96.26% (0.95) for 1992, 2002, 2012, and 2022, respectively. The results indicate that major land cover changes have occurred, notably a reduction in wooded savanna areas, the savannization of protected forests, and the expansion of agricultural and fallow lands. The vegetation dynamic is predominantly regressive for wooded and shrubby savannas, which decreased from 423.27 ha to 246.6 ha between 2002 and 2012—reflecting a regression rate of 41.88%. Conversely, there is a progressive expansion of field and fallow mosaics, whose area increased from 141.03 ha in 2002 to 293.95 ha in 2012, representing a growth rate of 108.43% over ten years. The primary drivers of this degradation are anthropogenic, specifically overgrazing and agricultural expansion.

Keywords : *classified Forest, dynamics, sustainable management, satellite imagery, Bana.*

1. Introduction

Les aires protégées sont des écosystèmes destinés à la conservation des ressources naturelles [3, 25]. Ces dernières sont des écosystèmes qui visent à promouvoir des solutions conciliant la conservation de la biodiversité et son utilisation durable [13]. Elles sont porteuses de valeurs écologiques et environnementales, et constituent un réservoir important de la biodiversité [4, 25]. En dépit de leur importance, la pression anthropique sur les ressources constitue aujourd'hui une menace pour la pérennité des biens et services qu'elle fournit [30]. En effet, l'exploitation incontrôlable couplée aux impacts du changement climatique n'est pas sans conséquences sur les écosystèmes semi-arides à arides [35]. Ces écosystèmes soudano-sahéliens subissent une dégradation, en raison de la variabilité climatique et des fortes activités humaines [14, 17, 34]. Cependant, la régression de la biodiversité constitue une problématique majeure dans les zones arides d'Afrique de l'Ouest [4, 11]. Dans cette zone où les écosystèmes sont fragiles, les défis socio-économiques et écologiques sont liés à la gestion durable des ressources naturelles limitées [13]. À l'instar des pays sahéliens, le Niger est confronté au problème de la dégradation et de la disparition progressive de son couvert végétal avec un taux annuel de réduction de 3,7% entre 1990 et 2000 [12]. Cette dégradation sans précédent est due à une forte pression anthropique des exploitations des espaces agricoles, de la carbonisation et des bois de chauffe [2, 4, 15]. Ainsi, l'État du Niger a créé un certain nombre d'aires protégées dans sa politique de conservation de la biodiversité pour une gestion durable des ressources naturelles ; c'est dans ce cadre que la forêt classée de Bana a été créée [14]. Bien qu'elles constituent des réservoirs de biodiversité des écosystèmes nationaux, les aires protégées nigériennes et leurs périphéries font preuve d'une grande vulnérabilité [22, 24]. Elles sont en effet menacées par la sécheresse et la pression humaine, des facteurs qui dégradent leurs capacités de régénération et entraînent une disparition critique d'espèces [24]. De nos jours,

les activités humaines entraînent une diminution progressive des ressources naturelles. La surexploitation des écosystèmes réduit davantage le potentiel productif et désarticule les systèmes séculaires de production et de gestion des milieux naturels. Ainsi, la forêt classée de Bana est entourée des terroirs villageois destinés aux activités agropastorales. Cette dernière devrait être dotée d'un plan d'aménagement inclusif et participatif afin de contrôler et restreindre les activités de la communauté locale, pour ce faire, chaque aire protégée devrait avoir des données scientifiques fiables. Elles constitueront des bases solides pour la mise en œuvre des plans d'aménagements et de gestion durable de la biodiversité. Dans une telle situation, il est nécessaire de faire l'état des lieux de la végétation de la zone à travers des analyses cartographiques pouvant servir de support aux activités d'aménagement des écosystèmes. L'objectif de la présente étude, est d'analyser les dynamiques de l'occupation du sol entre 1992 et 2002, 2002 et 2012 et 2012 et 2022, afin d'apprécier les différentes tendances de l'évolution subie par les écosystèmes durant ces périodes. Plus spécifiquement, il s'agit de faire une cartographie entre 1992, 2002, 2012 et 2022 et de ressortir la dynamique spatio-temporelle des différents types d'occupation du sol.

2. Matériel et méthodes

2-1. Zone d'étude

La forêt classée de Bana est localisée dans la commune rurale de Bana. Elle est située au Nord-Est du département de Gaya dans le sud de la région de Dosso entre les longitudes 3°24'04" et 3°39'14" est et les latitudes 11°55'46" et 12°08'04" nord. Elle couvre une superficie de 241 km². Elle est limitée à l'Est par la République Fédérale du Nigéria, au Sud par la commune rurale de Bengou, à l'Ouest par la commune urbaine de Gaya et au Nord par la commune rurale de Yélou (*Figure 1*). La forêt classée de Bana est protégée et créée le 25/04/1955. La végétation de la commune de Bana est caractérisée par une savane arbustive constituée de Combretaceae et d'un important peuplement de rônier, rônieraie du dallol maouri et Fogha. Elle peuple majoritairement les plateaux latéritiques au nord-est de la commune. Le département de Gaya est la zone la plus arrosée du pays, c'est une zone favorable au maintien de la biodiversité. Le climat est de type sahélo-soudanien avec une pluviométrie moyenne annuelle de 786,3 ± 171,0 mm sur 30 ans d'observation de 1989 à 2022. La pluviométrie des trente années a connu une évolution en dents de scie et le nombre d'années humides est plus élevé que le nombre d'années sèches. En 2018, on a enregistré les plus fortes précipitations et en 2004 les plus faibles (*Figure 2*).

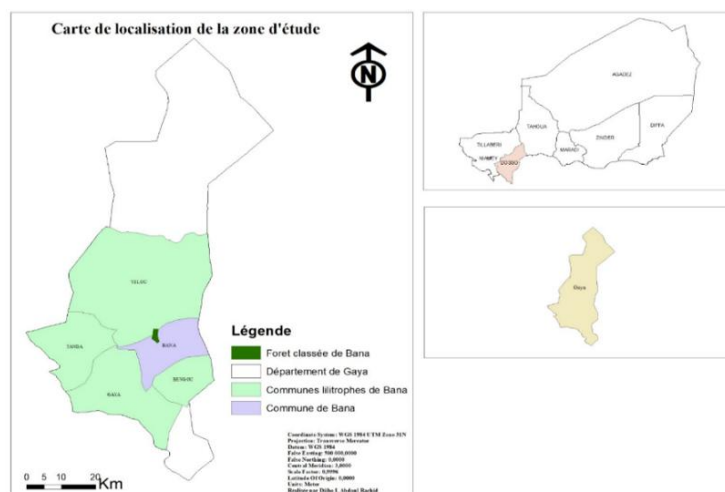


Figure 1

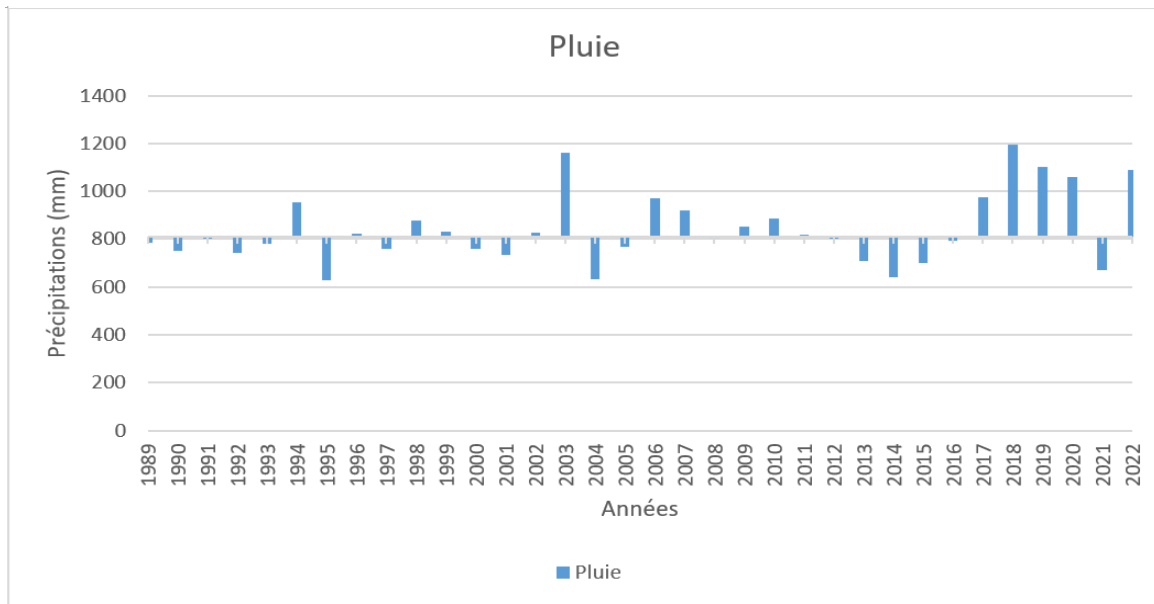


Figure 2 : Variation pluviométrique en fonction des années de 1989 à 2022
(source : Direction nationale de la météorologie)

Les nombres de jours de pluie varient d'une année à une autre ; ces irrégularités de pluie dans le temps et dans l'espace ont souvent des conséquences sur le milieu et particulièrement sur la flore. Les températures varient considérablement au cours de l'année en fonction des saisons, les températures maximales sont enregistrées pendant les mois d'Avril et les températures minimales au cours des mois de décembre-février. Par ailleurs, l'humidité relative varie en fonction de la saison au cours de l'année mais peut aussi varier en fonction de la journée. Le diagramme ombrothermique (**Figure 3**) montre qu'il existe deux périodes, la première est une période humide de cinq mois (de juin à octobre) et la seconde une période sèche de sept mois (novembre à mai). Le mois d'août est le plus pluvieux, avec une moyenne allant jusqu'à 450 mm.

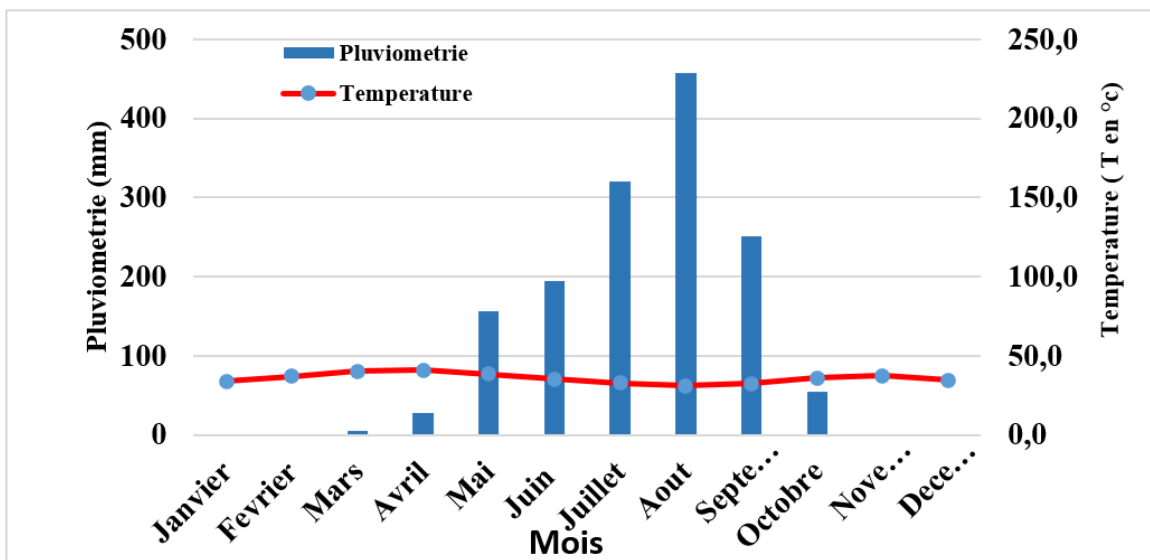


Figure 3 : Diagramme ombrothermique de Gaya de 1990 à 2022
(source des données : Direction nationale de la météorologie)

2-2. Méthodologie

2-2-1. Acquisition des données satellitaires

Les données sont des images Landsat (5, 7 et 8) téléchargées pour les années 1992, 2002, 2012 et 2022. Pour la date de 1992, la série d’images acquises est le 04 octobre ; pour l’année 2002, c’est le 02 février et le 14 février pour la date de 2012. Les images téléchargées en 2022 sont du 26 décembre. Toutes ces images proviennent de l’United States Geological Survey (USGS : <https://earthexplorer.usgs.gov> consulté le 14/04/2023). Ce choix de l’imagerie Landsat pour cette étude se base sur la disponibilité des archives conséquentes gratuitement accessibles.

Tableau 1 : Références des images Landsat utilisées (Caractéristiques des données)

Satellite	Date	Référence	Wrs Path	Wrs Row	For mat	Résolution (m)
Landsat 4 Tm	04/10/1992	LT04_L2SP_192052_19921004_20200914_02_T1	192	52	Tif	30
Landsat 7 ETM+	02/02/2002	LE07_L2SP_192052_20020202_20200916_02_T1	192	52	Tif	30
Landsat 7 ETM+	14/02/2012	LE07_L2SP_192052_20120214_20200909_02_T1	192	52	Tif	30
Landsat 9 OLI/TIRS	26/12/2022	LC02_L2SP_192051_20221226_20221228_02_T1	192	51	Tif	30

2-2-2. Collecte des données vérité terrain

Pour confirmer les conclusions de la classification et apporter des éclaircissements sur les zones délicates à interpréter pour les compositions colorées, des données phytoécologiques ont été recueillies sur le terrain. Au total, 113 points ont été explorés, avec un classement du type de végétation basé sur la typologie de Yangambi modifiée par [10]. Pour la cartographie de la végétation. En parallèle, les données suivantes ont été collectées : espèces végétales dominantes sur le site, coordonnées géographiques (avec un GPS), géomorphologie (plateaux, bas-fond, bassin versant), états de surface du sol, texture du sol et autres perturbations telles que les activités agricoles, les pâturages.

2-2-3. Prétraitement

Les prétraitements des données ont été réalisés après l’obtention des scènes. Cette étape s’est faite dans le but de rendre la base de données de la zone d’étude lisible et bien superposable. Les images satellitaires sont sous forme de canaux numériques caractérisant chaque bande du spectre électromagnétique du visible et de l’infrarouge. Il s’agit des corrections géométriques et radiométriques, du mosaïquage et de l’extraction de la zone d’étude. Selon [9] le traitement radiométrique corrige les erreurs de mesure (artefacts), alors que le traitement géométrique garantit la concordance spatiale avec les documents de référence. Ce choix s’explique du fait que ces longueurs d’onde contiennent à elles seules 90% des informations spectrales relatives à la végétation vivante [6]. Ainsi, pour avoir une image multispectrale, les bandes individuelles obtenues aux formations Geo-Tiff ont été compilées sur le logiciel ENVI5.2. Des compositions colorées combinant les bandes 4-3-2 pour l’année 1992, 5-4-3 pour les années 2002, 2012 et 2022 [4] furent réalisées.

2-2-4. Classification

Les quatre images ont été classées en utilisant la méthode de classification dirigée (ou supervisée) par le maximum de vraisemblance. La nature et le nombre des classes sont définis par l’opérateur à travers le tracé

de polygones d'apprentissage (ou zones d'entraînement) [1, 13]. Pour évaluer la probabilité d'appartenance de chaque pixel à l'une des classes, on a utilisé la méthode du « maximum de vraisemblance » qui utilise les statistiques des zones d'entraînement [16].

2-2-5. Evaluation de la classification

La précision globale et l'indice Kappa ont été utilisés pour évaluer la précision du processus de la classification. La précision globale est calculée en faisant la somme du nombre de pixels correctement classifiés et en divisant le tout par le nombre total de pixels évalués.

- Le coefficient Kappa (K) : mesure l'intensité de la concordance « réelle » entre deux jugements catégoriels appariés (qualitatifs sur les mêmes objets) [9].

(1)

- Précision globale (P) : C'est la proportion du nombre total de pixels correctement classifiés par rapport au nombre total de pixels de la matrice et elle détermine la précision de la classification [9]

(2)

Xii : le nombre de pixels classifiés correctement.

- Les erreurs d'omission représentent le nombre de pixels incorrectement attribués aux classes autres que celles représentées par la ligne. Elles sont calculées à l'échelle des classes [27].

(3)

$\sum EO_j$ représente le nombre de pixels incorrectement attribués à une classe, R_j : la somme des totaux des rangées.

- Les erreurs de commission, ce sont les pixels appartenant à une autre classe mais qui sont étiquetés comme appartenant à la classe d'intérêt. Elles complètent l'indice de précision en comparant le nombre de pixels de chaque cellule de la matrice avec une distribution aléatoire de pixels [27].

(4)

$\sum EO_j$ le : nombre de pixels incorrectement attribués à la classe représentée par la colonne. R_i est la somme des totaux des colonnes.

2-2-6. Analyses cartographiques

L'analyse cartographique de l'occupation des sols a été faite à partir du calcul du taux moyen annuel d'expansion spatiale [26]. La variable mise en évidence est la superficie de l'occupation des sols de la forêt classée. La carte de changement a été élaborée à travers un croisement automatique entre les cartes de l'occupation des sols de quatre périodes : 1992 et 2002 ; 2002 et 2012 ; 2012 et 2022. Elle consiste à mettre en évidence les transformations survenues entre deux périodes suite au croisement des cartes de 1992, 2002, 2012 et 2022. Après la vectorisation automatique, les résultats de la classification sont exportés en format vectoriel pour les traitements cartographiques à l'aide d'un logiciel Arc 10.4. Le croisement de quatre cartes d'occupation du sol de 1992, 2002, 2012 et 2022 a permis d'établir la carte d'évolution de toutes les unités paysagères durant ces 30 années [1]. Ainsi, pour décrire ces changements d'occupation du sol intervenus entre 1992 et 2002, entre 2002 et 2012, entre 2012 et 2022, des statistiques descriptives sur les superficies de différentes unités d'occupation du sol pour les quatre périodes ont été faites. Le croisement à l'aide du logiciel ArcGIS 10.4 des quatre cartes d'occupation du sol a permis d'obtenir une matrice de transition qui a renseigné sur les changements spatiaux des thématiques au cours des intervalles 1992-2002, 2002-2012, 2012-2002. Ces valeurs proviennent de la superposition des deux cartes en vue de détecter les changements opérés dans l'occupation des sols entre les dates [4]. Dans la matrice de transition, le nombre de lignes de la

matrice représente le nombre d'unités d'occupation des sols t0 qui est la date de départ. Le nombre de colonnes, quant à lui, représente le nombre d'unités d'occupation à la période t1. Le calcul de la superficie ayant transité a été réalisé à partir de l'union des deux couches d'occupation des sols concernées. Les matrices de confusion confrontant les différentes classes ont servi à la vérification de la performance des classifications. Ainsi, quelques indices de structure spatiale ont été calculés [5] :

- L'aire totale

$$a_i = \sum_j a_{ij} \tag{5}$$

a_i = surface occupée par une tache

2-2-7. Dynamique de l'occupation du sol

La dynamique de l'occupation du sol peut être définie comme l'évolution dans le temps et dans l'espace des classes d'occupation, soit vers un stade de dégradation ou d'amélioration, soit vers un état d'équilibre plus ou moins stable. L'étude des processus spatiaux de transformation du paysage est une approche pour analyser la dynamique structurale de l'occupation du sol, l'algorithme « Arbre de décision » pour détecter ces processus de transformation du paysage a été proposé par [9] et comporte dix (10) processus de transformation spatiale. Cet algorithme qui utilise la surface, le périmètre et le nombre de taches pour déterminer les processus de transformation a été adopté dans la présente étude pour mieux comprendre la dynamique spatiale du paysage entre 1992, 2002, 2012 et 2022.

3. Résultats

3-1. Vérification de la classification

Les résultats de l'analyse de performance donnent pour chacune des images classifiées les précisions globales variant entre 94,85 % et 97,61 %, et des valeurs du coefficient de Kappa élevées avec 0,96 ; 0,92 ; 0,93 et 0,96 respectivement pour 1992, 2002, 2012 et 2022 (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Précision globale et coefficient kappa

Images Landsat	Précision globale (%)	Coefficient Kappa
1992	97,61	0,96
2002	94,85	0,92
2012	95,11	0,93
2022	96,26	0,95

Les **Tableaux 3, 4, 5 et 6** présentent les matrices de confusions indiquant que les précisions globales de classification sont de 94,85 ; 95,11 ; 96,26 et 97,61, respectivement pour les images de 2012, 2002, 2022 et 1992. Ils exposent au niveau de la diagonale le pourcentage de pixels bien classés et les pourcentages qui sont classés à l'extérieur de la diagonale de pixels mal classés. Les savanes arbustives claires et des savanes arborées sont assez bien différentes des autres classes, ces deux classes ont plus de 90% des pixels bien classés. Au niveau de 2012, les classes mosaïques champs et jachères présentent également de faibles pourcentages de pixels bien classés (86,67%). Les autres types d'occupation du sol sont en général bien discriminés ou classifiés.

Tableau 3 : Matrice de confusion et les erreurs d'omission et de commission des images 1992

Classes thématiques	A	B	C	D	E	Omission (%)
A	97,79	1,47	0,00	0,00	0,00	2,21
B	1,10	91,18	0,27	3,33	0,00	8,82
C	0,00	7,35	98,09	0,00	0,00	1,91
D	0,00	0,00	0,27	96,67	1,59	3,33
E	0,00	0,00	1,36	0,00	98,41	1,59
Commission (%)	1,67	2,11	4,00	6,45	7,46	

A Sol Nu ; B Savane Arbustive Claire ; C Savane Arborée ; D Point d'eau ; E Zone Brûlée.

Tableau 4 : Matrice de confusion et les erreurs d'omission et de commission des images 2002

Classes thématiques	A	B	C	D	E	F	Omission (%)
A	92,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,46
B	0,00	100	0,00	14,29	0,00	0,00	0
C	0,00	0,00	92,31	14,29	0,00	3,08	7,69
D	0,00	0,00	0,00	71,43	0,00	0,00	28,57
E	0,00	0,00	0,00	0,00	100	0,00	0
F	7,56	0,00	7,69	0,00	0,00	96,92	3,08
Commission (%)	0	1,79	2,11	0	0	16	

A Sol Nu ; B Savane Arbustive Claire ; C Savane Arborée ; D Point d'eau ; E Zone Brûlée F Mosaïque Champ/Jachère.

Tableau 5 : Matrice de confusion et les erreurs d'omission et de commission des images 2012

Classes thématiques	A	B	C	D	E	F	Omission (%)
A	100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
B	0,00	92,92	0,00	9,09	0,00	13,33	7,08
C	0,00	0,00	100	0,00	0,00	0,00	0
D	0,00	0,00	0,00	90,91	0,00	0,00	9,09
E	0,00	0,00	0,00	0,00	100	0,00	0
F	0,00	7,08	0,00	0,00	0,00	86,67	13,33
Commission (%)	0	14,63	0	0	0	7,14	

A Sol Nu ; B Savane Arbustive Claire ; C Savane Arborée ; D Point d'eau ; E Zone Brûlée F Mosaïque Champ/Jachère.

Tableau 6 : Matrice de confusion et les erreurs d'omission et de commission des images 2022

Classes thématiques	A	B	C	D	E	F	Omission (%)
A	97,86	2,38	0,00	0,00	0,00	0,67	2,14
B	1,00	94,44	1,56	0,00	0,00	2,68	5,56
C	0,00	0,00	91,05	0,00	6,25	0,00	8,95
D	0,00	0,00	0,00	100	0,00	0,00	0
E	0,00	0,00	7,00	0,00	93,75	0,00	6,25
F	0,53	3,17	0,39	0,00	0,00	96,64	3,36
Commission (%)	2,14	8,46	2,50	0	16,67	4	

A Sol Nu ; B Savane Arbustive Claire ; C Savane Arborée ; D Point d'eau ; E Zone Brûlée F Mosaïque Champ/Jachère.

3-2. Dynamique de l'occupation du sol

3-2-1. État de l'occupation du sol de 1992

La **Figure 4** montre l'occupation du sol dans la forêt classée de Bana au cours des années 1992, 2002, 2012 et 2022. L'analyse de la **Figure 4A** montre que les savanes arbustives constituent les formations végétales dominantes avec 302,04 ha, soit 40,53 % de la superficie totale de la zone. Les savanes arborées et les sols nus occupent respectivement 230,58 ha soit 30,94 % et 127,8 ha soit 17,15 %. Les zones brûlées représentent 55,71 ha, soit 7,48 %. Les points d'eau occupent 29,07 ha, soit 3,90 %.

3-2-2. Etat de l'occupation du sol 2002

L'analyse de la **Figure 4B** fait ressortir que les savanes arbustives claires et les savanes arborées dominent avec respectivement 283,68 ha soit 38,05 % et 159,39 ha soit 21,38 %. Suivies des sols nus avec 125,64 ha, soit 16,85 %. Les zones brûlées et les points d'eau représentent respectivement 58,86 ha, soit 7,90 %, et 18,27 ha, soit 2,45 %, de la forêt classée.

3-2-3. Etat de l'occupation du sol 2012

La **Figure 4C** prouve que les mosaïques champs/jachères sont les plus représentées avec 293,31 ha, soit 39,45%. Elles sont suivies respectivement par les savanes arbustives claires et arborées de 246,06 ha soit 33,09% et 100,17 ha soit 13,47%. Les sols nus et les points d'eau occupent respectivement 83,52 ha soit 11,23% et 20,52 ha soit 2,76%.

3-2-4. Etat de l'occupation du sol 2022

L'analyse de la **Figure 4D** fait établir que les savanes arbustives claires et les savanes arborées dominent avec respectivement 283,68 ha soit 38,05% et 159,39 ha soit 21,38%. Suivies des sols nus avec 125,64 ha, soit 16,85%. Les zones brûlées et les points d'eau représentent respectivement 58,86 ha, soit 7,90%, et 18,27 ha, soit 2,45%, de la forêt classée.

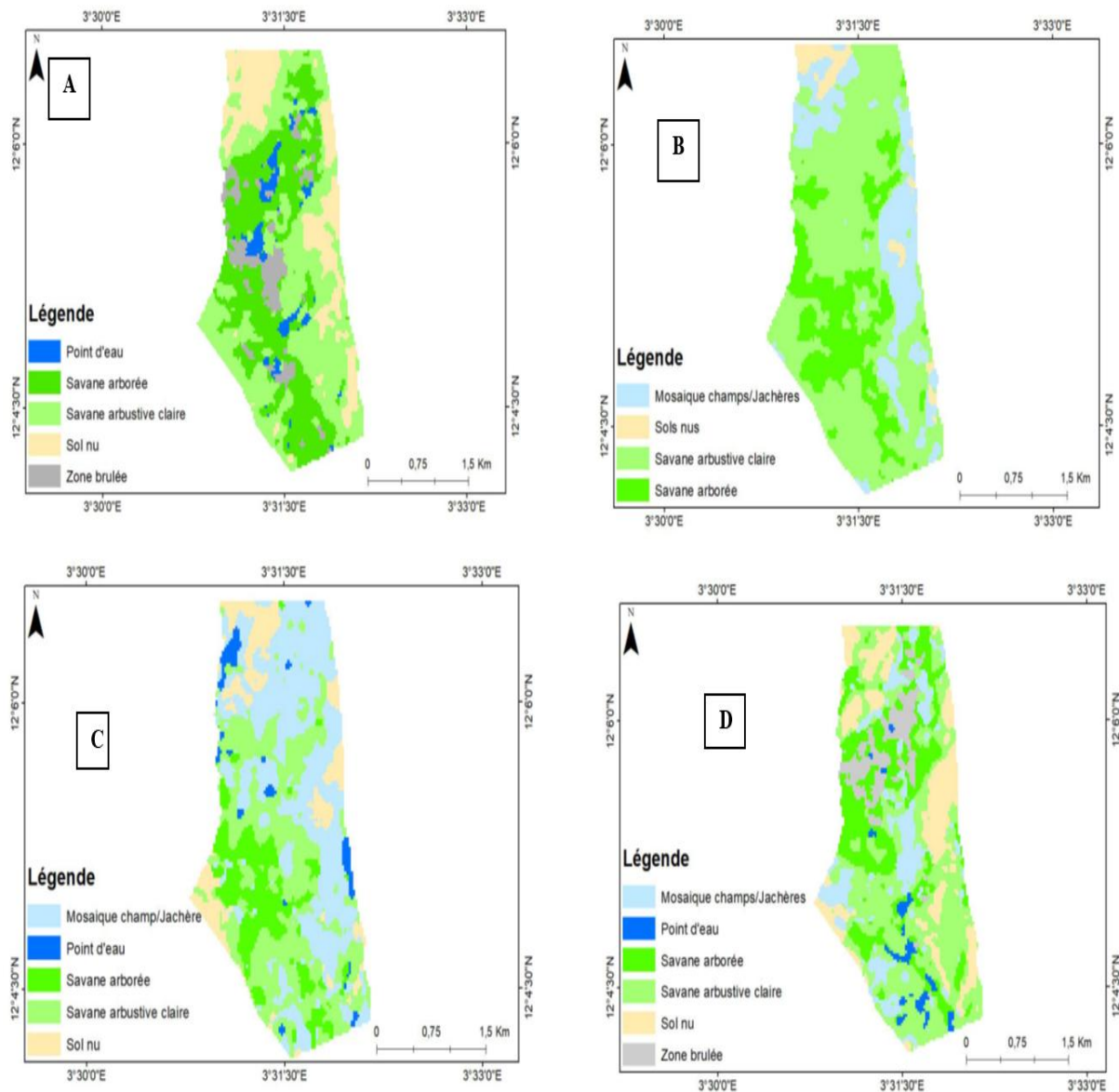


Figure 4 : Carte de l'occupation du sol de forêt classée de Bana en A : 1992 ; en B : 2002 ; en C : 2012 et en D : 2022

3-3. Superficies des classes d'occupation des sols

La **Figure (5)** faisait ressortir les superficies des différentes unités d'occupation pour chaque année (1992, 2002, 2012 et 2022). La classe de savane arbustive claire est la plus représentée avec 283,68 ha ; 302,04 et 423,27 ha respectivement pour les années 2022, 1992 et 2002. Par contre pour l'année 2012 la classe de mosaïque champ/jachère avait la grande superficie avec 293,31 ha. Ensuite, la classe de savane arborée a une superficie de 230,58 ha pour 1992, 159,39 ha pour 2022 et 152,72 ha pour 2002 excepté l'année 2012 où la classe de savane arbustive claire se retrouve avec 246,06 ha. Ainsi, la classe de point d'eau est faiblement représentée pour les années 1992, 2012 et 2022 et la classe de sol nu pour 2002.

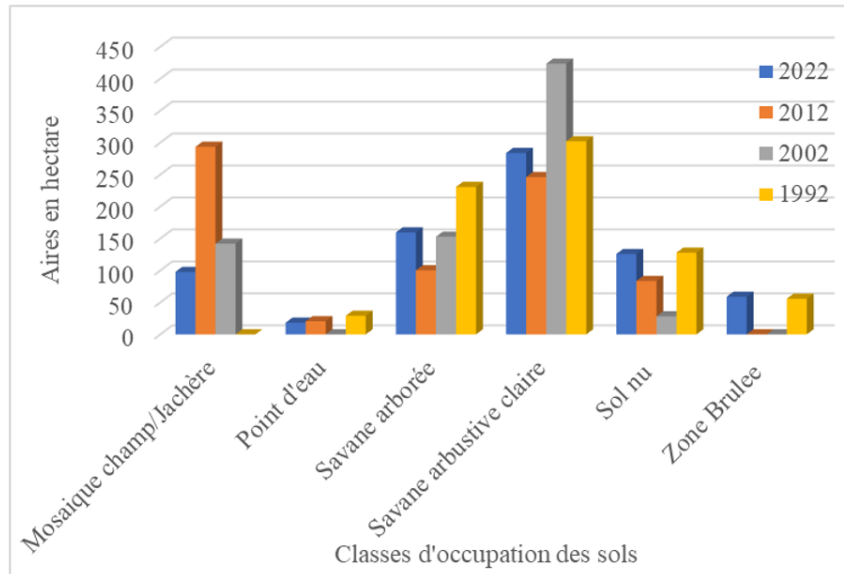


Figure 5 : Superficies des classes d'occupation des sols des années 1992, 2002, 2012 et 2022

3-4. Détection des changements

3-4-1. Dynamique de l'occupation du sol de 1992 à 2002

La dynamique de l'occupation du sol entre 1992 et 2002 est résumée dans le **Tableau (7)** et caractérisée globalement par une stabilité des savanes arbustives claires (B) avec 216,99 ha. Une partie de cette classe est convertie en les autres classes dont les classes de savane arborée (C), point d'eau (D), zone brûlée (E) et sol nu (A). La classe de savane arborée (C) a subi une stabilité de 95,58 ha tandis qu'une grande partie de la superficie s'est transformée dans les autres classes. La classe de savane arbustive claire(B) a récupéré 134,91 ha de cette classe.

Tableau 7 : Matrice de transition de l'occupation du sol entre 1992 et 2002

Aires (ha) en 2002	Aires (ha) en 1992						
	Classes	A	B	C	D	E	F
A		27,71	0,36	0	0	0	0
B		17,28	216,99	25,11	22,77	30,23	0
C		0	134,91	95,58	0	25,37	0
D		0	0	6,30	0	0	0
E		0	0	0	0	0	0
F		82,62	59,04	0	0	0	0

A Sol Nu ; B Savane Arbustive Claire ; C Savane Arborée ; D Point D'eau ; E Zone Brulée F Mosaïque Champ/Jachère.

3-4-2. Dynamique de l'occupation du sol de 2002 à 2012

La dynamique de l'occupation du sol entre 2002 et 2012 montre qu'une petite stabilité de la classe de savane arbustive claire(B) vers savane arbustive claire(B) et de la classe de mosaïque champ/jachère(F) vers mosaïque champ/jachère(F) avec respectivement 171 ha et 90 ha. Cependant des conversions de la savane arbustive claire(B) vers les autres classes ont été enregistrées. Les classes de champs et les jachères(F) et des savanes arborées ont gagnées 190,35 ha et 23,57 ha de cette dernière. La classe de savane arborée(c)

avait 76,58 ha de stabilité alors une partie de la classe ayant subi une modification s'est transformé dans les autres classes. L'analyse de la matrice de transition de l'occupation du sol (en hectare) entre les deux images a permis de quantifier les changements survenus (**Tableau 8**). Ainsi, la classe de sol nu vers savane arbustive claire, zone brûlée vers la classe de mosaïque champ/jachère et la classe de savane arborée vers sol nu ont les petites superficies avec respectivement 1,98 ha, 0,5 ha et 0,18 ha.

Tableau 8 : Matrice de transition de l'occupation du sol entre 2002 et 2012

		Aires (ha) en 2002					
		A	B	C	D	E	F
Aires (ha) en 2012	A	21,96	1,98	0	0	0	4,23
	B	23,21	171	23,57	12,60	0	190,35
	C	0,18	64,52	76,58	2,33	0	8,72
	D	0	0	0	0	0	0
	E	0	0	0	0	0	0,5
	F	37,88	8,36	0	5,40	0	90

A Sol Nu ; B Savane Arbustive Claire ; C Savane Arborée ; D Point D'eau ; E Zone Brûlée F Mosaïque Champ/Jachère.

3-4-3. Dynamique de l'occupation du sol de 2012 à 2022

Les changements de la dynamique des unités d'occupation de la forêt classée de Bana entre 2012 et 2022 sont résumés dans le tableau (8). Toutefois, il y a des cas de stabilité dans la classe de savane arbustive claire(B) vers savane arbustive claire(B) avec 93,27 ha. Par contre des conversions de cette classe vers les autres classes ont été relevées. Ainsi, les classes de savane arborée(C), mosaïque champ/jachère(F) et zone brûlée(E) ont reçu respectivement 67,41 ha, 37,34 ha et 25,46 ha de cette classe. La classe de mosaïque champ/jachère(F) vers mosaïque champ/jachère(F) a une stabilité de 43,38 ha alors que cette classe a subi une modification où la grande partie est transformée dans les autres classes. Il a été enregistré une petite stabilité des points d'eau avec 0,72 ha (**Tableau 9**).

Tableau 9 : Matrice de transition de l'occupation du sol entre 2012 et 2022

		Aires (ha) en 2012					
		A	B	C	D	E	F
Aires (ha) en 2022	A	62,90	11,88	0,36	0	0	8,10
	B	8,27	93,23	67,41	13,59	25,46	37,34
	C	0,09	51,47	36,99	3,05	1,53	6,92
	D	0,27	6,38	9,72	0,72	1,53	1,62
	E	0	0	0	0	0	0
	F	53,90	120,15	44,36	0,9	30,32	43,38

A Sol Nu ; B Savane Arbustive Claire ; C Savane Arborée ; D Point d'eau ; E Zone Brûlée F Mosaïque Champ/Jachère.

3-5. Cartes des changements dans la forêt classée de Bana

La carte de changement d'état est obtenue en croisant deux cartes d'occupation des sols datant de l'année initiale et de l'année finale. Entre 1992 et 2002, 13 transitions des classes ont été identifiées. La transition entre la savane arbustive claire vers la savane arbustive claire est la plus représentée avec 216,99 ha suivie de la transition de la classe de savane arborée vers la savane arbustive claire avec 134,91 ha. La transition

de la classe de mosaïque champ/jachère vers la savane arbustive claire. Cependant les transitions de faible superficie ont été constatées dans la classe de sol nu vers la savane arbustive claire et la classe de point d'eau vers la savane arborée avec respectivement 0,36 ha et 6,30 ha. Concernant 2002 et 2012, 17 transitions ont été enregistrées. La transition la plus représentée est celle de la classe de savane arbustive claire vers mosaïque champ/jachère avec 190,35 ha, suivie de la transition de savane arbustive claire vers la savane arbustive claire avec une superficie de 171 ha. La transition de la classe de mosaïque champ/jachère vers mosaïque champ/jachère suit les deux transitions précédentes avec une superficie de 80 ha. Les faibles transitions ont été identifiées dans les classes de savane arborée vers sol nu, zone brûlée vers mosaïque champ/jachère et sol nu vers savane arbustive claire. Les transitions entre 2012 et 2022 sont au nombre de 28, les classes qui avaient les plus grandes superficies sont mosaïque champ/jachère vers savane arbustive claire, savane arbustive claire vers savane arbustive claire et la savane arbustive claire vers la savane arborée avec respectivement 120,15 ha, 93,23 ha et 67,41 ha. Les faibles transitions ont été identifiées dans les classes de sol nu vers savane arborée, point d'eau vers sol nu, savane arbustive claire vers sol nu et mosaïque champ/jachère vers point d'eau.

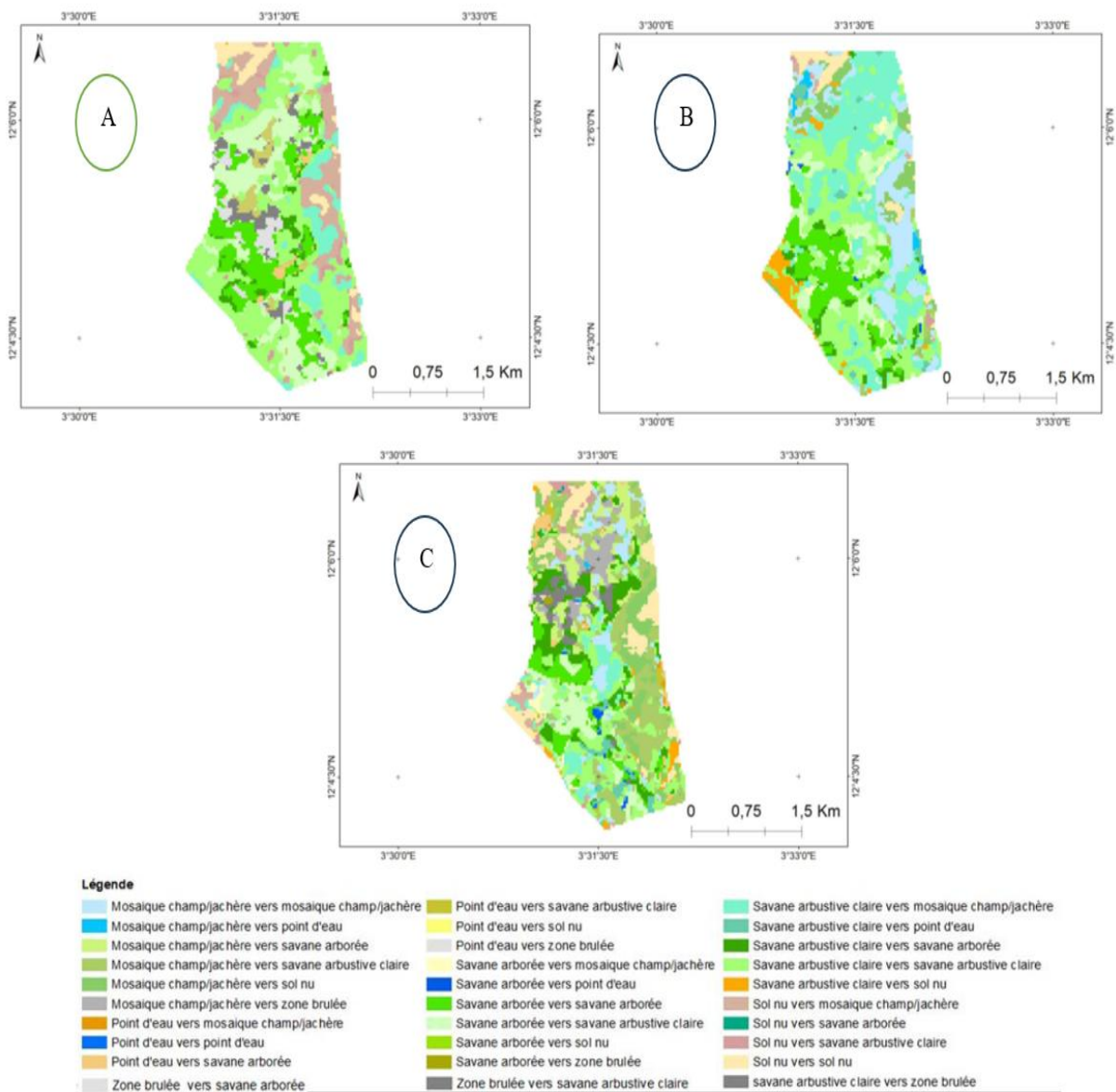


Figure 6 : Cartes des changements en A : 1992-2002 ; en B : 2002-2012 et en C : 2012-2022

4. Discussion

4-1. Distinction des types d'occupation du sol

La dynamique de l'occupation du sol de la forêt classée de Bana a été réalisée à travers une analyse diachronique des images Landsat des années 1992, 2002, 2012 et 2022. Cette recherche visant à quantifier, localiser et identifier les processus de transition entraînant des changements d'occupation des terres a mis en évidence des dynamiques différenciées pour les différentes unités dans la forêt classée de Bana. L'approche utilisée dans cette étude est basée sur l'utilisation conjointe des images satellites et des cartes topographiques issues des photographies aériennes [7, 8]. L'approche cartographique de l'occupation des terres à travers une série de classifications d'images satellitaires Landsat couplée à une vérité terrain dont les précisions globales ont été hautement appréciables confirme l'importance de la connaissance de la zone d'étude et de l'acquisition des données auxiliaires pour l'amélioration de la qualité des traitements d'images [20]. Cette analyse cartographique de la forêt classée de Bana montre que toutes les unités d'occupation des sols ont subi des modifications. Ce qui signifie que les classes thématiques sont bien définies. Une meilleure définition des classes d'occupation du sol autorise une classification de qualité [14]. Les indices de Kappa obtenus sont 0,96, 0,92, 0,93 et 0,95 respectivement pour les images de 1992, 2002, 2012 et 2022. La classification adoptée est valable et les cartes produites peuvent être utilisées parce que les indices Kappa et les taux de classification globaux sont supérieurs à 50 % [18]. Selon [26], les erreurs de confusion diminuent quand le nombre de classes de l'occupation du sol diminue. On a 8,82% de confusions observées entre la classe de savane arbustive et les savanes arborées, 5,54% de confusions ont été observées entre les mosaïques champs/jachères et les savanes arbustives et 2,14% entre la classe de sol nu et la classe de zone brûlée. Ces confusions sont dues au fait de la ressemblance floristique entre les classes favorisant des réponses spectrales proches pour les formations végétales [23, 31].

4-2. Dynamique de la végétation de la forêt classée de Bana

L'étude fait ressortir les différents processus d'évolution du paysage entre 1992 et 2022. En effet, il a été observé une dégradation des formations forestières qui se solde par des régressions et des progressions d'une part et des conversions et modifications d'autre part. L'évaluation de la dynamique de la forêt classée de Bana relève une régression des savanes arbustives claires, des savanes arborées, des sols nus et des points d'eau. La baisse des formations forestières au profit des champs et jachères est un phénomène qui inquiète ces dernières années [19, 23]. Les causes de la dégradation sont dues aux activités humaines et parfois elles sont d'ordre climatique lorsque la zone climatique ne bénéficie pas de la pluviosité minimale devant permettre la reconstitution spontanée des formations végétales [15]. Cette régression de la végétation est à l'origine de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, interrompant ainsi l'équilibre écologique [11]. En effet, l'analyse diachronique indique une dégradation du couvert végétal au profit des mosaïques champs/jachères. Cette régression est due aux pressions exercées par les populations sur la forêt de Bana. Les populations à proximité de la zone sont essentiellement rurales et l'agriculture est essentiellement de subsistance (riz, mil, sorgho, haricot, etc.). Ainsi, comme dans bien d'autres travaux, cette disparition des forêts est due à l'installation des activités agricoles et à l'extension des superficies cultivées au sein de la forêt [4, 17, 21, 33]. Ainsi, la superficie des savanes arbustives claires et des savanes arborées diminue en faveur des champs et jachères [29]. Ces résultats montrent l'augmentation avec 108,18% des classes de la mosaïque champs/jachères. Ces travaux confirment les résultats de plusieurs auteurs qui montrent que les défrichements agricoles sont des facteurs importants dans la dynamique régressive des ligneux [30]. Dans la forêt classée de Bana, l'apparition des surfaces des cultures est due aux contrats des cultures dans la forêt et bien que ces contrats n'aient plus été renouvelés, les populations continuent toujours

à pratiquer la culture. En outre, la surexploitation de certaines espèces (*Borassus aethiopum* et *Hyphaene thebaica*) comme bois de service et bois d'œuvre conduit à la régression des formations naturelles dans la forêt classée de Bana. La coupe abusive du bois est un facteur très important dans la dynamique régressive des espèces ligneuses [19, 23]. Entre 1992 et 2022, on constate une forte augmentation des champs et jachères puisqu'en 1992 il n'existe pas de champs dans cette forêt, or en 2022 la superficie des champs et des jachères a atteint 97,38 ha. La progression de cette classe pouvait s'expliquer par le fait que les zones de culture augmentent chaque année en conséquence de la forte pression foncière à la périphérie de la forêt classée de Bana. Plusieurs auteurs avaient fait la même observation dans les aires protégées des régions ouest-africaines [7, 28, 31]. Ce résultat confirme ceux de [27] qui avait observé une augmentation de la zone agricole dans la zone soudano-sahélienne. Cette dynamique est le résultat d'une forte transformation des zones de formation naturelle en zones de culture. Les zones protégées et les réserves forestières sont de plus en plus sujettes à la sécheresse et à des contraintes démographiques qui entraînent leur dégradation [13, 29]. Cette menace a été mise en évidence par l'analyse diachronique qui montre une progression du front agricole jusqu'à 190,35 ha entre 2012 et 2022. Cette tendance s'observe dans plusieurs aires protégées de l'Afrique de l'Ouest [28, 31].

5. Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'analyser et d'améliorer les connaissances sur la dynamique spatio-temporelle des formations forestières de la forêt classée de Bana de 1992 à 2022 grâce à la télédétection et aux données de la vérité terrain. Elle offre aux gestionnaires des outils d'aide à la prise de décision lors de la mise en place d'une politique durable de cette forêt protégée. Les résultats de l'interprétation des images satellitaires Landsat et des données terrain font ressortir qu'il existe six classes d'occupation du sol dans la forêt : la savane arborée, la savane arbustive, la mosaïque champ/jachère, le point d'eau, la zone brûlée et le sol nu. Quatre cartes d'occupation de la forêt classée de Bana de 1992, 2002, 2012 et 2022 ont été élaborées. Il en ressort que la classe de savane arborée et arbustive a régressé entre 1992 et 2022, en passant de 42,06% à 17,52% de la superficie totale de cette aire. Cette régression de ces formations végétales est due à plusieurs facteurs dont le plus important est l'avancée du front agricole, la croissance démographique, et la surexploitation des ressources forestières. Cette diminution du couvert végétal entraîne la dégradation du sol et surtout la perte de la biodiversité.

Références

- [1] - H. ABDOURHAMANE, B. MOROU, A. MAHAMANE, M. SAADOU et A. ISSAKA, Caractérisation de la dynamique spatiotemporelle de l'occupation des terres dans le complexe des forêts classées de Dan kada Dodo-Dan Gado (région de Maradi, Niger). *Journal des Sciences de l'Environnement*, 1 (1) (2012) 16 - 26
- [2] - K. ADJONOU, R. BELLEFONTAINE et K. KOKOU, Les forêts claires du Parc national Oti-Kéran au Nord-Togo : structure, dynamique et impacts des modifications climatiques récentes, *Sécheresse*, 20 (1e) (2009) e1 - e10
- [3] - L. L. A. AMOUSSOU, B. A. DJOSSA, O. T. LOUGBEGNON, F. C. KIDJO et G. A. MENSAH, Analyse de la pression anthropique et de son effet sur la biodiversité des sites à ériger en réserves de faune au Sud-Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, Numéro spécial Élevage et Faune, (2012) 1840 - 7099, <http://www.slire.net>
- [4] - I. BAMBA, A. MAMA, F. R. N. DANHO, J. K. KOFFI, D. TRAORE, M. VISSER, B. SINSIN, L. LEJOLY et J. BOGAERT, Influence des actions anthropiques sur la dynamique spatiotemporelle de l'occupation du sol dans la province du Bas-Congo (R.D. Congo). *Sciences & Nature*, 5 (1) (2008) 49 - 60. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/scinat.v5i1.421>
- [5] - B. A. BATIONO, J. B. TAONDA, D. ILBOUDO, T. GUISSOU et B. ILBOULDO, Approche « Fermes Écologiques » et gestion durable des ressources naturelles dans le Centre-Ouest du Burkina Faso, *Journal forestier suisse*, 157, 11 (2006) 513 - 518
- [6] - F. BARET, G. GUYOT, A. BEGUE et P. MAUREL, Complementarity of middle-infrared with visible and near-infrared reflectance for monitoring wheat canopies. *Remote Sensing of Environment*, 26 (1988) 213 - 225
- [7] - S. BARMO, A. AMANI, A. IDRISSE, M. M. BACHIR et A. MAHAMANE, Cartographie et dynamique spatio-temporelle des formations végétales de la forêt protégée de Baban Rafi (Niger), (2021)
- [8] - A. BALLO, S. S. TRAORE, B. COULIBALY, C. H. DIAKITE, M. DIAWARA et A. TRAORE, Pressions anthropiques et dynamique d'occupation des terres dans le terroir de Ziguéna, zone cotonnière du Mali. *European Scientific Journal*, 12 (5) (2016) 90 - 99. DOI: <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n5p90>
- [9] - J. BOGAERT, R. CEULEMANS et D. SALVADOR-VAN EYSENRODE, Decision tree algorithm for the detection of spatial processes in landscape transformation. *Environmental Management*, Vol. 33, N°1 (2004) 62 - 73 p.
- [10] - G. DE WISPELAERE, Cartographie de la végétation du complexe du « W ». Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, France, (2002)
- [11] - G. L. DJOHY, T. H. VODOUNON et E. N. KINZO, Dynamique de l'occupation du sol et évolution des terres agricoles dans la commune de Sinende au Nord-Benin. *Cahier du CBRST, Lettres, Sciences Humaines et Sociales*, (9) (2016) 101 - 121
- [12] - FAO, Situation des forêts du monde. Rome. FAO, Rome, Italy, (2005) 166 p.
- [13] - M. M. INOUSSA, A. MAHAMANE, C. MBOW, M. SAADOU et B. YVONNE, Dynamique spatio-temporelle des forêts claires dans le Parc National du W du Niger, Afrique de l'ouest. *Sécheresse*, 22 (2011a) 108 - 16
- [14] - M. M. INOUSSA, A. MAHAMANE, A. M. LYKKE, A. ISSAKA et M. SAADOU, Cartographie et description de différents types de végétation dans le Parc national du W du Niger. *Sécheresse*, 22 (2011b) 207 - 11
- [15] - D. J. KABULU, I. BAMBA, K. F. MUNYEMBA, P. DEFOURNY, C. VANCUTSEM, N. S. NYEMBWE, L. M. NGONGO, & J. BOGAERT, Analyse de la structure spatiale des forêts au Katanga, *Annale des Facultés des Sciences Agronomiques*, 1 (2) (2008) 12 - 18
- [16] - J. A. RICHARDS, Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag, 240 pp. In Historical and Future Land-Cover Change in a Municipality of Ghana Emmanuel M. Attua, Joshua B. Fisher. *Earth Interactions d*, Vol. 15 (2011) d Paper No. 9 (1999) d Page 1

- [17] - K. D. KPEDENOU, T. BOUKPESSI, T. TANZIDANI et K. TCHAMIE, Quantification des changements de l'occupation du sol dans la préfecture de Yoto (Sud-Est Est du Togo) à l'aide de l'imagerie satellitaire Landsat. *Rev. Sc. Env.*, 13 (2016) 137 - 156
- [18] - F. LAUGINIE, Conservation de la nature et des aires protégées en Côte d'Ivoire. *NEI/ Hachette et Afr. Nat.*, Abidjan, (2007) 668 p.
- [19] - A. MAMA, B. SINSIN, C. DE CANNIERE et J. BOGAERT, Anthropisation et dynamisation des paysages en zone soudanienne au nord du Bénin. *TROPICULTURA*, 31 (1) (2013) 78 - 88
- [20] - A. MAMA, I. BAMBA, B. SINSIN, J. BOGAERT et C. DE CANNIERE, Déforestation, savanisation et développement agricole des paysages de savanes-forets dans la zone soudano-guinéenne du Bénin. *Bois et Forêts des Tropiques*, 322 (4) (2014) 65 - 75. DOI : 10.19182/bft.2014.322.a31237
- [21] - A. MAHAMANE, M. SAADOU, Y. BAKASSO, I. ABASSA, I. ABOUBACAR et S. KARIM, Analyse diachronique de l'occupation des terres et caractéristiques de la végétation dans la commune de Gabi (région de Maradi, Niger). *Sécheresse*, 18(4) (2007) 296 - 304. DOI: 10.1684/sec.2007.0105
- [22] - A. MAHAMANE et M. SAADOU, Méthode d'étude de la flore et de la végétation tropicale. Project SUNEU. Actes de l'Atelier sur l'Harmonisation des Méthodes, (2008) 83 p.
- [23] - N. MYERS, R. A. MITTERMEIER, C. G. MITTERMEIER, G. A. B. DA FONSECA et J. KENT, Biodiversity hotspots for conservation priorities, *Nature*, 403 (2000) 853 - 858
- [24] - UICN/PACO, Parcs et réserves du Niger : évaluation de l'efficacité protégée. De gestion des Ouagadougou, UICN/PACO, (2010) 78 p. aires
- [25] - T. I. NDOTAM, F. REOUNODJI, J. K. KASALI et J. DIAOUANGANA, Évaluation de la diversité floristique en herbacées dans le Parc national de Manda au Tchad. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 11 (4) (2017) 1484 - 1496, DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i4.7>
- [26] - J. OLOUKOI et ALII, « Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des Collines au Bénin ». *Télétection*, 6, 4 (2006) 305 - 323 p.
- [27] - D. RUELLAND, F. LEVAVASSEUR et A. TRIBOTTE, Patterns and dynamics of land-cover changes since the 1960s over three experimental areas in Mali, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12 (2010) S11 - S17
- [28] - H. SAWADOGO, Évolution de l'occupation du sol de ZIGA dans le YATENGA (Burkina Faso) à partir de Photos Aériennes *Revue Télétection*, Vol. 8, N° 1 (2008) 59 - 73 p.
- [29] - G. W. TABOPDA, J. M. FOTSING et D. HUAMAN, Évolution du couvert végétal dans la réserve forestière de Laf-Madjam (extrême nord du Cameroun) de 1976 à 2003. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, INPE, (2005) 3379 - 3386
- [30] - W. G. TABOPDA & F. HUYNH, Caractérisation et suivi du recul des ligneux dans les aires protégées au nord du Cameroun : analyse par télédétection spatiale dans la réserve forestière de Kalfou. Journée d'Animation Scientifique de l'AUF, Alger, (2009) 11 p.
- [31] - B. TANKOANO, M. HIEN, N. H. DIBI, Z. SANON, J. T. YAMEOGO et I. SOMDA, Dynamique spatio-temporelle des savanes boisées de la forêt classée de Tiogo au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9 (2015) 1983 - 2000
- [32] - B. TANKOANO, Contribution de la télédétection et des systèmes d'Informations, (2017)
- [33] - B. TENTE, M. A. BAGLO, J. C. DOSSOUMOU et H. YEDOMONHAN, Impacts des activités humaines sur les ressources forestières dans les terroirs villageois des communes de Glazoué et de Dassa-Zoumè au centre du Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5 (5) (2011) 2022 - 2030
- [34] - A. TIDJANI, ET ALII, « Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger) », *Geo-Eco-Trop*, 33 (2009) 69 - 80 p.
- [35] - A. WEZEL et A. M. LYKKE, Woody vegetation change in Sahelian West Africa : evidence from local knowledge. *Environment, Development et Sustainability*, 8 (2006) 553 - 567