

Dynamique spatio-temporelle des écosystèmes de la Réserve de Biosphère de Gadabédji dans la zone Nord Sahélienne au centre du Niger

Abdoulaye Abdou Siradji
Inoussa Maman Maarouhi

Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Biologie, Laboratoire de Gestion et Valorisation de la Biodiversité au Sahel, Niamey, Niger

Mansour Mahamane
Université de Diffa, Niger
Assoumane Guero Ousseini
Hamani Noma Abdoul Latif
Douma Soumana
Bakasso Yacoubou
Mahamane Ali

Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Biologie, Laboratoire de Gestion et Valorisation de la Biodiversité au Sahel, Niamey, Niger

[Doi:10.19044/esj.2024.v20n18p310](https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n18p310)

Submitted: 20 May 2024

Accepted: 25 June 2024

Published: 30 June 2024

Copyright 2024 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Siradji, A. A., Maarouh, I. M., Mahamane, M., Ousseini, A. G., Latif, H. N. A., Soumana, D., Yacoubou, B., & Ali, M.. (2024). *Dynamique spatio-temporelle des écosystèmes de la Réserve de Biosphère de Gadabédji dans la zone Nord Sahélienne au centre du Niger*. European Scientific Journal, ESJ, 20 (18), 310. <https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n18p310>

Résumé

La dégradation des écosystèmes dans les aires protégées de l'Afrique de l'Ouest est un phénomène réel et entraînant un déséquilibre écologique. Dans ce contexte, les aires protégées du Niger ne sont pas épargnées de cette dégradation, particulièrement la Réserve de Biosphère de Gadabédji. Cette dernière est sous la pression anthropique qui modifie la configuration des écosystèmes naturels. La présente étude a été conduite dans la Réserve de Biosphère de Gadabédji et a pour objectif principal de contribuer à la compréhension sur l'évolution des écosystèmes de la Réserve à l'aide des

images satellitaires des années 1990, 2013 et 2022. La démarche méthodologique utilisée est basée sur le Système d'Information Géographique et de la Télédétection. L'algorithme de maximum de vraisemblance a été appliqué lors de la classification supervisée. Il ressort de cette étude, six classes d'occupation des sols qui ont été identifiées à savoir les classes de Steppe arborée, Steppe arbustive, Steppe herbeuse, Sol nu, Zone brûlée et Mare. La détection des changements a révélé 26 transitions des classes entre 1990 et 2013 dont la transition de Steppe arbustive vers Steppe herbeuse est la plus représentée. De 2013 à 2022, 27 transitions ont été identifiées, la plus importante est celle de Steppe herbeuse vers Steppe herbeuse. Ces résultats pourraient servir aux décideurs pour une gestion durable des ressources naturelles.

Mots-clés: Réserve, paysage, occupation des sols, télédétection, fragmentation, Niger

Spatio-temporal dynamics of the ecosystems of the Gadabédji Biosphere Reserve in the North Sahelian zone of central Niger

Abdoulaye Abdou Siradji
Inoussa Maman Maarouhi

Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Biologie, Laboratoire de Gestion et Valorisation de la Biodiversité au Sahel, Niamey, Niger

Mansour Mahamane
Université de Diffa, Niger
Assoumane Guero Ousseini
Hamani Noma Abdoul Latif

Douma Soumana
Bakasso Yacoubou
Mahamane Ali

Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Biologie, Laboratoire de Gestion et Valorisation de la Biodiversité au Sahel, Niamey, Niger

Abstract

The degradation of ecosystems in West Africa's protected areas is a real phenomenon that leads to an ecological imbalance. In this context, Niger's protected areas are not spared from this degradation, particularly the Gadabédji Biosphere Reserve. The latter is under anthropogenic pressure that modifies the configuration of natural ecosystems. The present study was

conducted in the Gadabédji Biosphere Reserve and has the main objective of contributing to the understanding of the evolution of the ecosystems of the Reserve using satellite images from the years 1990, 2013 and 2022. The methodological approach used is based on the Geographic Information System and Remote Sensing. The maximum likelihood algorithm was applied during the supervised classification. The study shows that six land cover classes have been identified, namely the classes of Tree Steppe, Shrub Steppe, Grassy Steppe, Bare Ground, Burned Area and Pond. The detection of changes revealed 26 class transitions between 1990 and 2013, of which the transition from Shrubby to Grassy Steppe is the most represented. From 2013 to 2022, 27 transitions were identified, the most important being from Grassy Steppe to Grassy Steppe. These results could be used by decision-makers for the sustainable management of natural resources.

Keywords: Reserve, landscape, land cover, remote sensing, fragmentation, Niger

Introduction

Aujourd'hui, la dégradation des écosystèmes naturels fait partie des problèmes environnementaux et peut être définie comme la perte de la biodiversité (Soulama *et al.*, 2015). Ainsi, l'étude des changements d'occupation et utilisation des sols et leurs interactions avec les sociétés humaines et leurs territoires constitue un enjeu majeur pour la communauté scientifique dans un contexte de changement globale (Samuel, 2014). Par ailleurs, les aires protégées constituent des puits de carbone et des réservoirs de la biodiversité les plus importants de la planète (Marion, 2018; Roxane, 2015). Elles contribuent dans l'adaptation et l'atténuation des effets du changement climatique et participe à la protection des écosystèmes (Trumper *et al.*, 2009). Selon FAO (2018), les aires protégées sont indispensables à la vie sur terre et au développement durable. En Afrique, les aires protégées jouent un rôle central particulièrement pour les populations riveraines dont l'avenir est lié à celui des écosystèmes qu'elles exploitent (Sournia, 1998). En Afrique et particulièrement au Niger, les aires protégées totalisent environ 18,11 millions d'hectares d'aires de conservation de la faune et de la flore soit 14,29% de la superficie du territoire national (DFC/AP, 2012). En outre, le pays abrite d'importantes ressources fauniques telles que : Eléphant (*Loxodonta africana*), Lion (*Panthera leo* Linnaeus), Buffle (*Syncerus caffer* Sparrman), Girafe (*Giraffa camelopardalis peralta* Linnaeus), Léopard (*Panthera pardus* Linnaeus), Antilope cheval (*Hippotragus equinus*), Addax (*Addax nasomaculatus* Zachi Evenor), Gazelles dama (*Gazella dama* Pallas), Gazelle dorcas (*Gazella dorcas* Linnaeus) et le Mouflon à manchette (*Ammotragus lervia* Pallas) (Laouel, 2014). Malgré ces aires protégées

présentent de potentialité biologique riche et variées, elles subissent sévèrement les effets conjugués des activités anthropiques et des variabilités climatiques qui en résultent à des menaces telles que la fragmentation des paysages naturels, la destruction des habitats naturels, leur perte de connectivité et les invasions biologiques (Hatfield *et al.*, 2018). Avec l'avancement du Système d'Information Géographique et de la Télédétection utilisés par plusieurs auteurs (Abdoulaye, 2022; Avakoudjo *et al.*, 2014; El-Hadraoui, 2013; Gildas *et al.*, 2016; Idrissa *et al.*, 2019; Inoussa, 2011; Kouassi, 2014), il ressort de ces travaux l'existence des nombreuses mutations intervenues dans les aires protégées en Afrique de l'Ouest avec une situation plus préoccupante en zone sahélienne. A l'instar des autres aires protégées, la Réserve de Biosphère de Gadabédji au Niger n'est pas épargnée de ce phénomène. Cependant, peu d'informations spécifiques sur la dynamique paysagère de cette Réserve sont disponibles à l'état actuel. L'objectif général est d'analyser la dynamique des écosystèmes de la Réserve de Biosphère de Gadabédji. Il s'agit spécifiquement de : (i) établir les cartes d'occupation des sols pour les années 1990, 2013 et 2022, et (ii) évaluer les changements d'occupation des sols.

Materiel et Methodes

Zone d'étude

La Réserve de Biosphère de Gadabédji (RBG) est située au centre Nord du pays entre les longitudes 7°01' et 7°09' Est et entre les latitudes 14°59' et 15°72' Nord (**Figure 1**). Elle est à une distance environ de 110 Km de Maradi. Cette aire protégée a été créée par Arrêté N°3120/SF/F du 25 avril 1955. Depuis sa création en 1954, elle a subi deux statuts : de la forêt classée est devenue la Réserve Totale de Faune de Gadabédji et en date du 14 Juin 2017, cette Réserve est classée par l'UNESCO en tant que Réserve de Biosphère de Gadabédji avec une superficie de 1 1413625 hectares (Saley, 2019). Le climat de cette zone est de type semi-aride avec une pluviométrie qui avoisine entre 200 à 400 mm (Hiernaux & Le Houéroun, 2006). Cette zone est caractérisée par trois grandes saisons, à savoir la saison sèche froide qui commence à partir du mois d'octobre et prend fin dans le mois de février soit environ 5 mois, la saison sèche chaude de mars à juin environ 3 à 4 mois et la saison pluvieuse, de juillet à septembre environ 3 mois. Trois principaux types de sols sont rencontrés, il s'agit de sols ferrugineux tropicaux ou sols dunaires, les sols hydromorphes et les sols limono-argileuses (Saley, 2019).

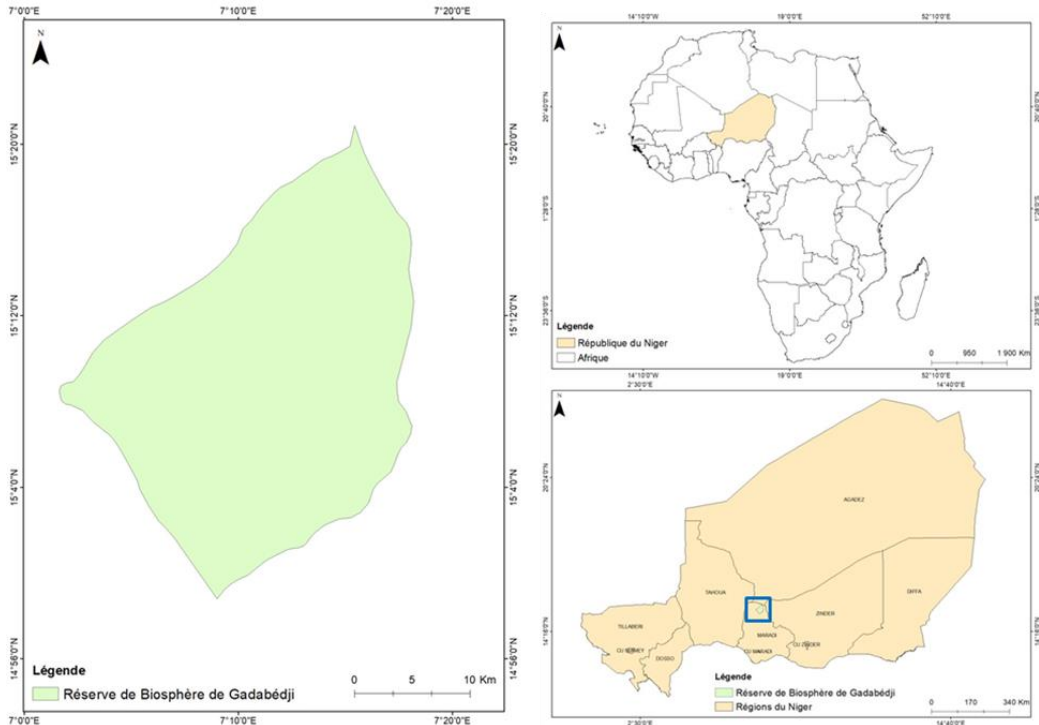


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

Approches méthodologiques

Acquisition et traitement d'images

La **Figure 2** présente l'organigramme déclinant les différentes étapes méthodologiques utilisées dans cette étude. La première étape est l'acquisition des images satellitaires dont les caractéristiques et les dates sont données par le **Tableau 1**. Il s'agit des images de 1990, 2013 et 2022 du mois de décembre qui correspondent à la période sèche dans la zone d'étude. Le choix de cette période est basé sur la meilleure perception de la végétation (Jensen, 1983). Ces images ont été téléchargées gratuitement sur le site gouvernemental de *United States of Geological Survey* via le lien <https://www.usgs.gov/software/earth-explorer-ee>.

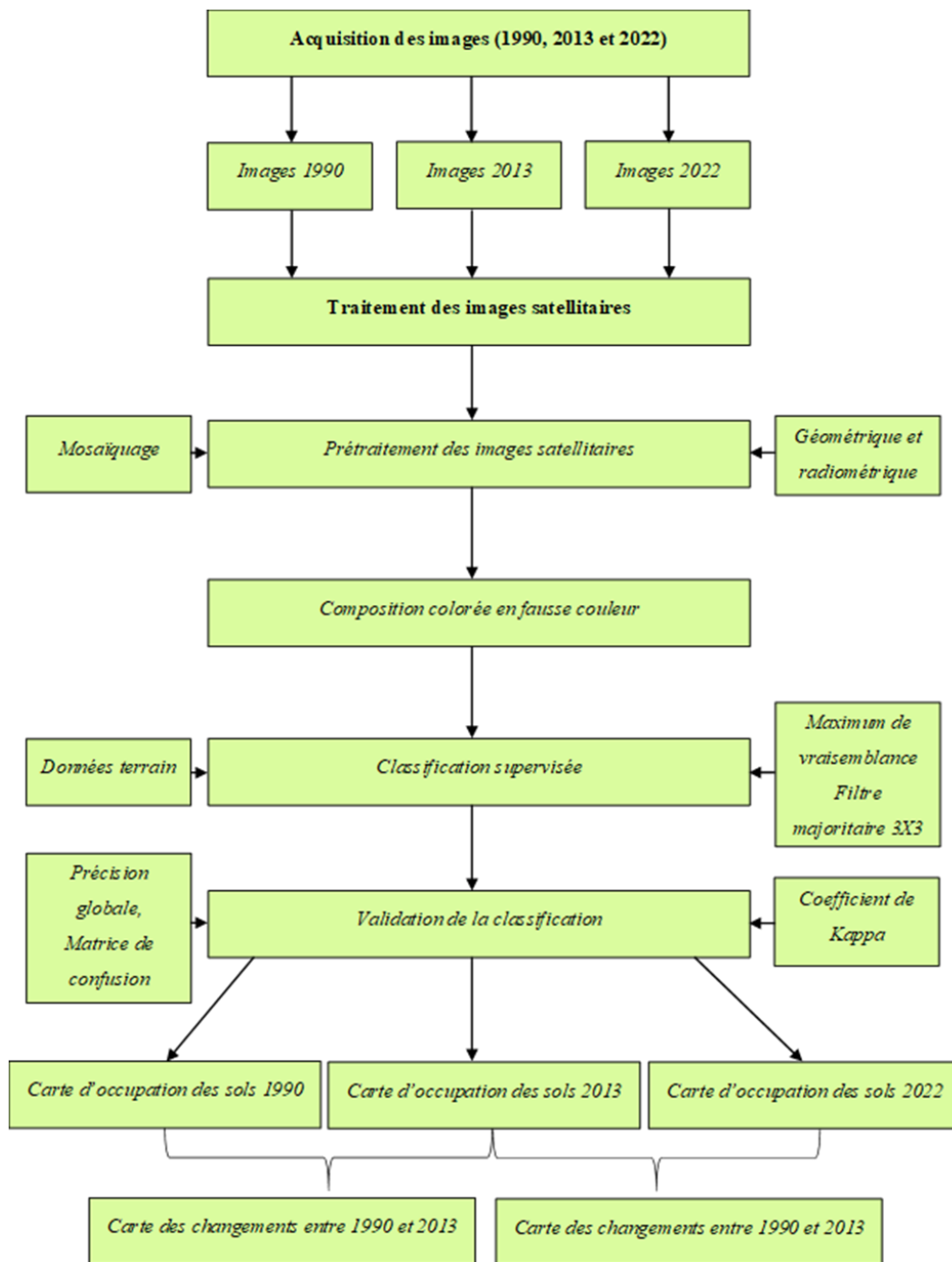


Figure 2 : Organigramme de la démarche méthodologique

Tableau 1 : Caractéristiques des images satellitaires Landsat (Source : USGS Explorer)

| Satellites | Scènes | Références | Dates | Résolution |
|------------|--|--------------------|------------|------------|
| Landsat 5 | LT05_L2SP_190049_19901228_20200915_02_T1.tar LT05_L2SP_190050_19901228_20200915_02_T1.tar | 190-049 190-050 | 28/12/1990 | 30 m |
| Landsat 8 | LC08_L2SP_190049_20131227_20200912_02_T1.tar | 190-049 | 27/12/2013 | 30 m |
| Landsat 9 | LC09_L2SP_190049_20221212_20221214_02_T1.tar | 190-049 | 12/12/2022 | 30 m |

Les images retenues ont suivi un prétraitement qui a consisté à des corrections radiométriques et géométriques. Par la suite, les images en composition colorée ont été produites par la combinaison des bandes spectrales dans les différents canaux (**Figure 2**). Afin de réaliser une classification supervisée des images, des données ont été collectées sur le terrain dans la RBG. Au total, 382 sites ont été visités. Pour chaque site, les renseignements notés sont les coordonnées géographiques, les types de végétation ; les espèces végétales dominantes ; la géomorphologie (plateau, versant, mi-versant, bas versant) et des photos d'illustration (**Figure 3**). L'algorithme de classification utilisé est le maximum de vraisemblance avec l'application d'un filtre majoritaire 3X3.



Figure 3 : Photos d'illustration des classes d'occupation des sols : A : Steppe arborée, B : Steppe herbeuse et C : Zone brûlée.

La validation des résultats de la classification a été effectuée à l'aide des indices suivants :

- **Coefficient de Kappa**

Il permet d'évaluer les similarités entre les résultats obtenus et ceux prévus (Agbanou, 2018). Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus le coefficient est proche de 1 plus le résultat est meilleur (Abdoulaye, 2022). Par exemple, un indice de Kappa de 0,75 signifie que 75 % de pixels sont bien classés dans leurs classes lors de la classification. Ce coefficient constitue une mesure fiable dans le processus de l'évaluation des classifications numériques des images satellitaires (Mama *et al.*, 2020).

$$K = \frac{P(A)-P(E)}{1-P(E)} \quad (1)$$

Avec P(A) est la correspondance observée entre les classes et P(E) est la probabilité hypothétique de correspondance.

- **Précision globale**

Elle correspond au rapport du nombre total de pixels correctement classés sur le nombre total de pixels de vérification. La précision globale varie de 0 à 100%, une classification est fiable et exploitable si la précision globale est supérieure ou égale à 80% (Lafleur, 2015).

$$IPG = \frac{\sum \text{Pixels correctement classifiés}}{\text{Nombre total de pixel}} \times 100 \quad (2)$$

Avec IPG qui est l'indice de précision global.

- **Matrice de confusion**

La matrice de confusion permet de dégager le pourcentage des classes bien classées suivant la diagonale. Les erreurs de commission correspondent à des erreurs de pixels sur les lignes alors que les erreurs d'omission tiennent en compte des erreurs sur les colonnes (Oreste *et al.*, 2019).

- **Erreur de commission (EC) et Erreur d'omission (EO)**

$$EC = 1 - ICV \quad (3)$$

Avec EC : Erreur de commission ; ICV : Indice cartographique de validation qui est le nombre total des pixels bien classés dans leurs classes (lignes) divisé par le nombre total des pixels de cette même classe.

$$EO = 1 - IPC \quad (4)$$

Avec EO : Erreur d'omission ; IPC : Indice de pureté des classes qui est le rapport entre le nombre des pixels bien classés dans leurs classes (colonnes) et le nombre total des pixels de cette classe.

Analyses cartographiques

A partir du logiciel ENVI 5.3, les images classifiées des différentes dates ont été vectorisées (conversion du format *raster* en *shapefile*) et exportées dans le logiciel Arc Gis 10.4 pour la visualisation des différentes classes d'occupation des sols et des calculs statistiques. Au cours de cette étape, six (6) classes thématiques ont été retenues suivant le système de référence de FAO (2022) sur l'occupation des sols de l'Afrique de l'Ouest. Il s'agit de : Steppe arborée, Steppe arbustive, Steppe herbeuse, Zone brûlée, Sol nu et Mare.

Identification des processus de transformation paysagère

Le processus de transformation paysagère est défini à l'aide d'un arbre de décision élaboré par (Bogaert *et al.*, 2004). Ainsi, une valeur prédéfinie de la proportion de diminution d'aire ($t = 0,5$) est utilisée pour distinguer le processus de fragmentation et de la dissection (Barima *et al.*, 2009). Une valeur observée (t_{obs}) est calculée à partir de la formule suivante :

$$t_{obs} = \frac{a_2}{a_1} \quad (5)$$

Lorsque $t_{obs} < t$, il existe un phénomène de fragmentation par contre si $t_{obs} > t$, phénomène de dissection. Soit a_1 , P_1 et n_1 représentent respectivement l'aire, le périmètre et le nombre de taches de l'année initiale et a_2 , P_2 , et n_2 désignent respectivement l'aire, le périmètre et le nombre de taches de l'année finale. Ces paramètres sont utilisés pour identifier les dix processus de transformation paysagère (**Figure 4**).

- *Nombre de taches*

Le nombre total de taches d'une classe est la somme des taches qui composent cette classe (Bogaert *et al.*, 2004). Le nombre de taches d'une classe élevé indique une fragmentation. Par contre, le nombre de taches d'une classe faible signifie une homogénéisation (Davidson, 1998).

$$n_j = \sum_{i=1}^n n_{ij} \quad (6)$$

Avec n_{ij} qui représente le nombre de taches de la i -ème tache de la classe j .

- *Aire totale*

L'aire totale d'une classe j est l'aire occupée par l'ensemble des taches i qui composent cette classe (Idrissa *et al.*, 2019). Elle a été calculée à partir de la formule suivante :

$$a_{tj} = \sum_{i=1}^{n_j} a_{ij} \quad (7)$$

Avec a_{ij} qui représente l'aire de la i -ème tache de la classe j .

- *Périmètre total d'une classe*

Le périmètre total est la somme des contours de chacune des taches P_i de cette classe, exprimé en Km (Inoussa, 2011). Il est calculé à partir de la formule suivante :

$$t = \sum_{i=1}^n P_{ij} \quad (8)$$

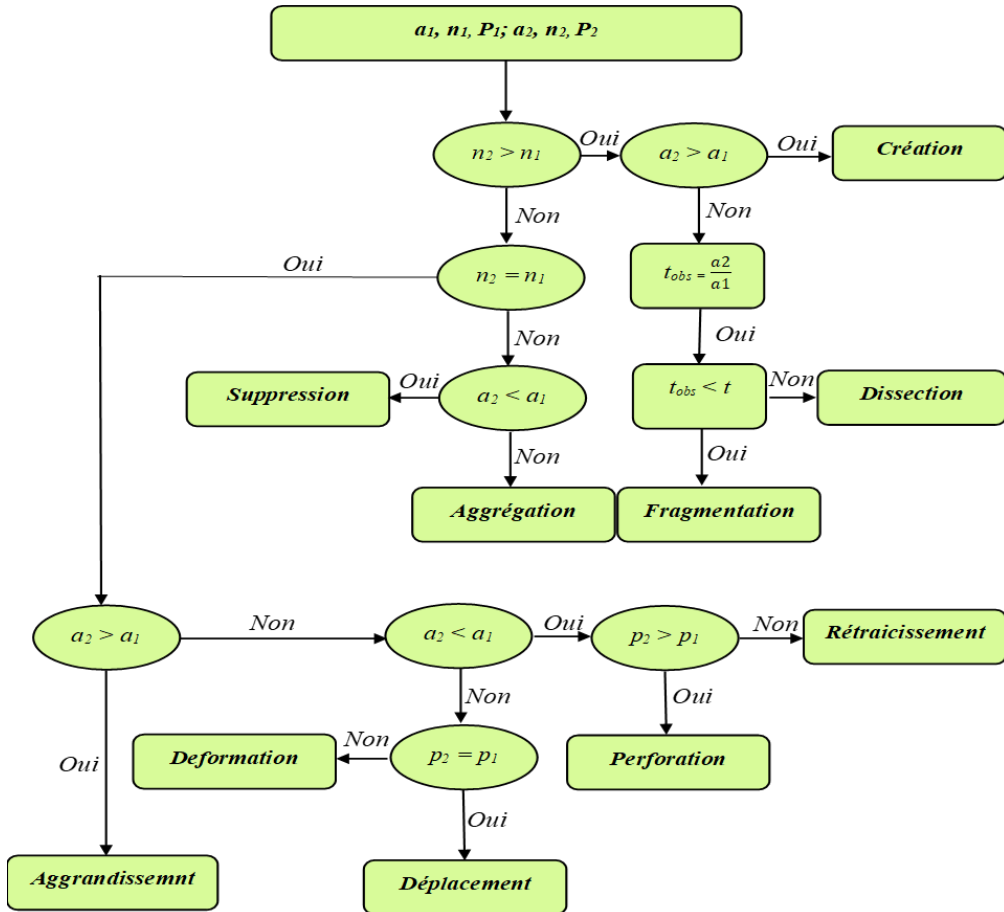


Figure 4 : Identification du processus de transformation spatiale (Bogaert et al., 2004)

Evaluation de la dynamique d'occupation des sols

L'évaluation de la dynamique des écosystèmes a été faite à partir de la réalisation des cartes des changements, du taux d'évolution, de la vitesse d'évolution et de la matrice de transition.

- Réalisation des cartes des changements

Les cartes des changements ont été élaborées par le croisement de deux cartes de l'année initiale et de l'année finale. Ainsi, ce croisement a été fait sur la base d'une comparaison entre les classes selon la période afin de ressortir les différents changements. L'appréciation des processus de mutation des écosystèmes s'est effectuée suivant trois possibilités en fonction du taux d'évolution des classes d'occupation des sols et de la qualité d'échange entre ces classes : stabilité, progression et régression.

- Matrice de transition

La matrice de transition permet de mettre en évidence les différentes formes de conversion que subissent les classes d'occupation des sols entre deux

périodes. Elle est constituée de x lignes et de y colonnes. Le nombre x de lignes de la matrice indique le nombre des classes d'occupation des sols de la période initiale tandis que le nombre y de colonnes de la matrice indique le nombre d'occupation des sols de la période finale. La diagonale contient les aires des classes d'occupation des sols restées inchangée (Kiansi *et al.*, 2021).

- **Taux d'évolution des classes d'occupation des sols**

Il permet d'évaluer l'impact de la pression anthropique sur le paysage (Krummel *et al.*, 1987). Sa formule est la suivante :

$$T = \frac{A_2 - A_1}{A_1} \quad (9)$$

Avec A_1 et A_2 représentent respectivement l'aire de l'année initiale et de l'année finale.

Selon Barima *et al.* (2009), T positif indique une progression de l'aire de l'année initiale A_1 vers l'année finale A_2 , T négatif signifie une régression de l'aire de l'année initiale A_1 vers l'année finale A_2 et T est nul donc il y a une stabilité de l'aire entre les deux années.

- **Vitesse d'évolution des classes d'occupation des sols**

D'après Agbanou *et al.* (2019), la vitesse d'évolution des classes d'occupation des sols est le phénomène d'extension ou de régression d'une classe exprimée en ha/an. Elle est calculée selon la formule suivante :

$$\Delta S = \frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

Où : ΔS : Vitesse d'évolution d'une classe d'occupation des sols ; A_1 : aire occupée par la classe à l'année initiale (ha), A_2 : aire occupée par la classe à l'année finale (ha), t_1 : année initiale et t_2 : année finale.

Resultats

Validation de la classification

La discrimination entre les différentes classes d'occupation des sols est statistiquement significative pour les images des années 1990, 2013 et 2022. En effet, les résultats des précisions globales varient de 99,59%, 98,12% et 99,81% avec des valeurs du coefficient Kappa élevés de 0,98, 0,94 et 0,99 (Tableau 2).

Tableau 2 : Indices de Précision globale et coefficients de Kappa issues de la classification

| Images Landsat | Indices de Précision globale (%) | Coefficients Kappa |
|----------------|----------------------------------|--------------------|
| 1990 | 99,59 | 0,98 |
| 2013 | 98,12 | 0,94 |
| 2022 | 99,81 | 0,99 |

Les résultats des matrices de confusion révèlent globalement une confusion non significative entre les images de trois périodes (1990, 2013 et 2022). En effet, les classes d'occupation des sols les plus discriminées sont la classe (F), 100% de pixels de cette classe sont correctement classifiés dans les deux périodes (2013 et 2022). Cependant, cette classe est absente dans la période 1990. Ensuite vient la classe (D) dans les trois cas plus de 96% de pixels de cette classe sont correctement classifiés puis la classe (E) qui présente plus de 93% de pixels sont correctement classifiés dans les trois cas et la classe (A) dont les valeurs de pixels correctement classifiées varient de 90% à 96% dans les trois cas. Par contre, les classes (B) et (C), dans les trois cas les pixels correctement classifiés varient respectivement de 88% à 97% et 87% à 97% (**Tableau 3, 4 et 5**). Par ailleurs, quelques erreurs de commission et d'omission sont enregistrées et varient respectivement de 0% à 9% et de 1% à 8% en 1990, de 0% à 13% et de 0% à 14% en 2013 et de 0% à 4% et de 0% à 5% en 2022.

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

| 1990 | | | | | | |
|---------|----|----|----|-----|----|----|
| Classes | A | B | C | D | E | EC |
| A | 96 | 0 | 2 | 0 | 2 | 4 |
| B | 1 | 91 | 7 | 0 | 0 | 9 |
| C | 0 | 3 | 95 | 2 | 0 | 5 |
| D | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| E | 0 | 0 | 2 | 0 | 98 | 2 |
| EO | 1 | 4 | 8 | 1 | 7 | |

Légende : A : Steppe arborée ; B : Steppe arbustive ; C : Steppe herbeuse ; D : Sol nu ; E : Zone brûlée ; EC : Erreur de Commission ; EO : Erreur d'Omission.

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

| 2013 | | | | | | | |
|---------|----|----|----|----|----|-----|----|
| Classes | A | B | C | D | E | F | EC |
| A | 90 | 7 | 3 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| B | 4 | 88 | 7 | 1 | 0 | 0 | 12 |
| C | 2 | 11 | 87 | 0 | 0 | 0 | 13 |
| D | 1 | 3 | 0 | 96 | 0 | 0 | 4 |
| E | 4 | 0 | 3 | 0 | 93 | 0 | 7 |
| F | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 |
| EO | 14 | 12 | 11 | 2 | 3 | 0 | |

Légende : A : Steppe arborée ; B : Steppe arbustive ; C : Steppe herbeuse ; D : Sol nu ; E : Zone brûlée ; F : Mare ; EC : Erreur de Commission ; EO : Erreur d'Omission.

Tableau 5 : Matrice de confusion et les erreurs de commission et d'omission des images 2022

| Classes | A | B | C | D | E | F | EC |
|---------|----|----|----|-----|-----|-----|----|
| A | 96 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 4 |
| B | 0 | 97 | 3 | 3 | 0 | 0 | 3 |
| C | 0 | 3 | 97 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| D | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| E | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| F | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 |
| EO | 2 | 3 | 5 | 0 | 1 | 2 | |

Légende : A : Steppe arborée ; B : Steppe arbustive ; C : Steppe herbeuse ; D : Sol nu ; E : Zone brûlée ; F : Mare ; EC : Erreur de Commission ; EO : Erreur d'Omission.

Etat des classes d'occupation des sols des années 1990, 2013 et 2022

Les différents traitements des images satellitaires ont abouti à la réalisation des cartes d'occupation des sols des années 1990, 2013 et 2022 (**Figure 5**). Au total six (6) classes d'occupation des sols ont été identifiées constituant les légendes des cartes. Le **Tableau 6** présente la description de ces différentes classes.

Tableau 6 : Description des classes d'occupation des sols

| Classes d'occupation des sols | Description |
|-------------------------------|--|
| Steppe arborée | <i>Balanites aegyptiaca</i> stand, <i>Sclerocarya birrea</i> , <i>Acacia nilotica</i> |
| Steppe arbustive | <i>Ziziphus mauritiana</i> , <i>Maerua crassifolia</i> , <i>Comiphora africana</i> , <i>Boscia senegalensis</i> , <i>Calotropis procera</i> |
| Steppe herbeuse | <i>Cenchrus biflorus</i> , <i>Eragrotis tremula</i> , <i>Dactyloctenium aegyptium</i> et <i>Schoenfeldia gracilis</i> |
| Sol nu | Espace dépourvus de la végétation |
| Zones brûlées | Espace brûlée accidentellement souvent par des éleveurs |
| Mare | Endroit gorge par des points d'eau stagnante |

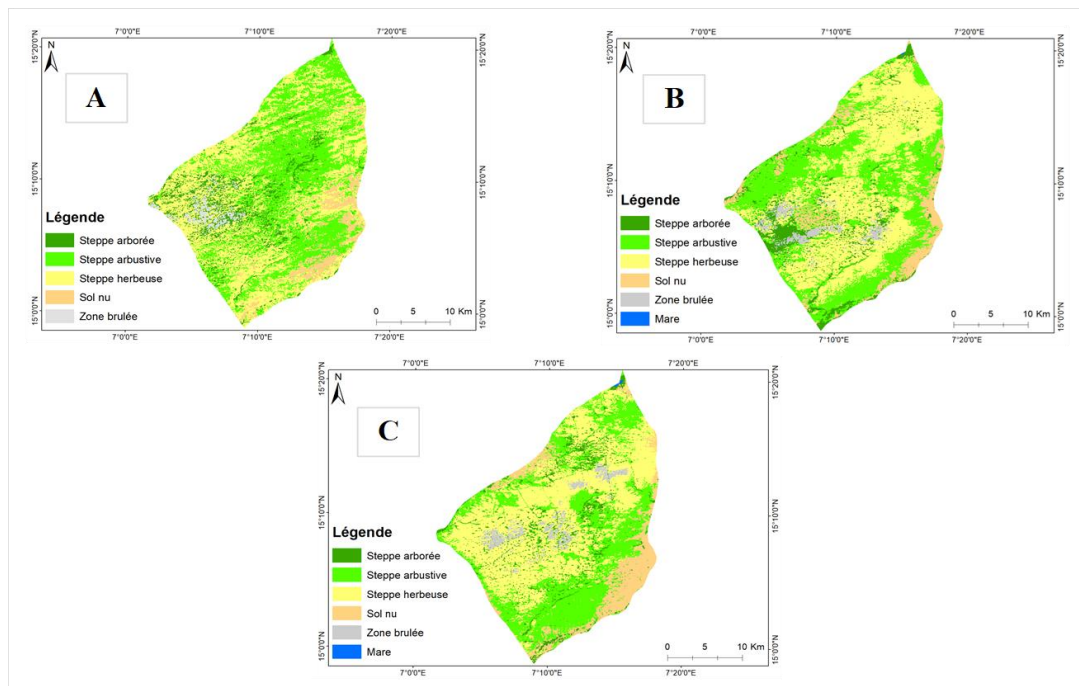


Figure 5 : Cartes d'occupation des sols de la Réserve de Biosphère de Gadabédji en A : 1990 ; B : 2013 et C : 2022

Aires des classes d'occupation des sols

Il ressort du résultat de la Figure 6 que dans chaque année, la classe de Steppe herbeuse est la plus représentée avec 26834 ha, 28834 ha et 30579 ha respectivement pour les années 1990, 2013 et 2022. Ensuite, la classe de Steppe arbustive qui occupe 26751 ha dans l'année 1990, 23418 ha dans l'année 2013 et 20945 ha dans l'année 2022. Puis, les autres classes telles que Steppe arborée, Sol nu, Zone brûlée et Mare sont faiblement représentées dans les années 1990 et 2013 et 2022.

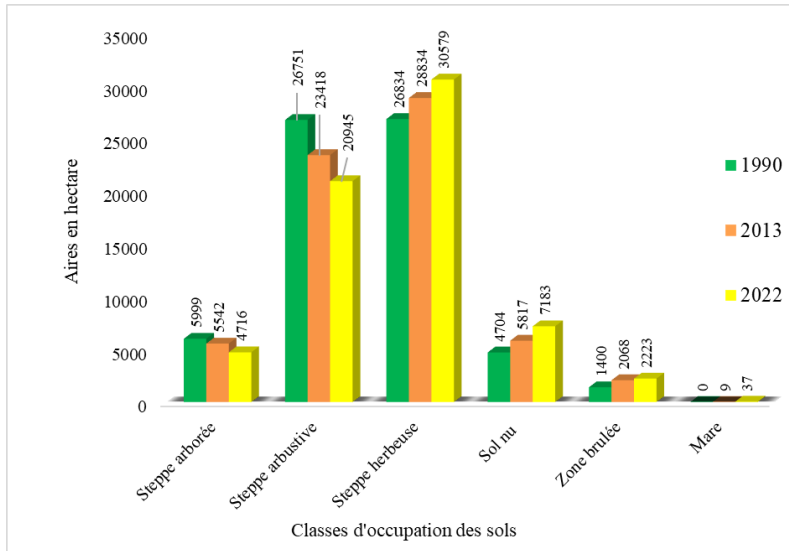


Figure 6 : Aires des classes d'occupation des sols des années 1990, 2013 et 2022

Processus de transformation spatiale

L'analyse des indices de structure spatiale des classes d'occupation des sols entre 1990, 2013 et 2022 est présentée dans le **Tableau 7**. Ainsi, entre les périodes 1990 et 2013 le nombre total de tâches a diminué de 8734 en 1990 à 6363 en 2013. Suivant les classes, deux processus de transformations spatiales ont été enregistrés entre 1990 et 2013 il s'agit de : la dissection observée dans les classes de Steppe arborée (A) et de Steppe arbustive (B) car leurs nombres de tâches $n_{2013} > n_{1990}$ et les aires $a_{2013} < a_{1990}$, dans cette condition $t_{obs} = \frac{a_{2013}}{a_{1990}} = 0,92$ et $0,87 > 0,5$ respectivement (**Figure 7**). Enfin, le phénomène de création a été observé dans les classes de Steppe herbueuse (C), de Sols nu (D), des Zone brûlée (E) et de Mare (F), leurs nombres de tâches $n_{2013} > n_{1990}$ et les aires $a_{2013} > a_{1990}$. De 2013 à 2022, le nombre total de tâches a augmenté de 6363 en 2013 à 15253 en 2022. Au niveau des classes, quatre processus de transformations spatiales sont observés entre les périodes 2013 et 2022, à savoir la dissection observée seulement dans la classe de Steppe arborée (A), le nombre tâches est $n_{2022} > n_{2013}$ et les aires $a_{2022} < a_{2013}$, dans cette condition $t_{obs} = \frac{a_{2022}}{a_{2013}} = 0,85 > t = 0,5$. Ensuite, le processus de la suppression enregistré dans la classe de Steppe arbustive (B) car le nombre de tâches $n_{2022} < n_{2013}$ et les aires $a_{2022} < a_{2013}$. Les classes de Steppe herbueuse (C), Sols nu (D) et Mare (F) ont subi un processus de création, leur nombre de tâches $n_{2013} > n_{1990}$ et les aires $a_{2013} > a_{1990}$ et enfin l'agrégation observé dans la classe de Zone brûlée (E).

Tableau 7 : Processus de transformation spatiale

| Années | Indices | A | B | C | D | E | F |
|--------|----------|------|-------|-------|------|------|----|
| 1990 | nj | 2375 | 2450 | 2907 | 715 | 287 | - |
| | atj (ha) | 5999 | 26751 | 26834 | 4704 | 1400 | - |
| | Ptj (Km) | 1939 | 4681 | 5189 | 833 | 316 | - |
| 2013 | nj | 2061 | 2001 | 3127 | 752 | 421 | 1 |
| | atj (ha) | 5542 | 23418 | 28834 | 5817 | 2068 | 9 |
| | Ptj (Km) | 1510 | 3139 | 2857 | 936 | 438 | 2 |
| 2022 | nj | 2450 | 1961 | 1139 | 524 | 361 | 2 |
| | atj (ha) | 4716 | 20945 | 30579 | 7188 | 2223 | 37 |
| | Ptj (Km) | 1655 | 2867 | 3068 | 849 | 438 | 5 |

Légende : A : Steppe arborée ; B : Steppe arbustive ; C : Steppe herbeuse ; D : Sol nu ; E : Zone brûlée ; F : Mare; nj : nombre total de taches de la classe j ; atj : aire totale de la classe j ; Ptj : périmètre total de la classe j.

Figure 7 : Transformation spatiale observé après l’application de l’arbre de décision



Légende : A : Steppe arborée ; B : Steppe arbustive ; C : Steppe herbeuse ; D : Sol nu ; E : Zone brûlée ; F : Mare

Détection des changements

Cartes des changements des écosystèmes dans la RBG

Les cartes des changements ont été réalisées par le croisement de deux cartes de l’année initiale et de l’année finale (**Figure 8**). Entre 1990 et 2013, 26 transitions des classes ont été identifiées. Il s’agit des transitions des classes de Steppe arborée vers Steppe arborée, de Steppe arborée vers Steppe arbustive, de Steppe arborée vers Steppe herbeuse, de Steppe arborée vers Sol nu, de Steppe arborée vers Zone brûlée, de Steppe arborée vers Mare, de Steppe arbustive vers Steppe arborée, de Steppe arbustive vers Steppe arbustive, de Steppe arbustive vers Steppe herbeuse, de Steppe arbustive vers Sol nu, de Steppe arbustive vers Zone brûlée, de Steppe herbeuse vers Steppe arborée, de Steppe herbeuse vers Steppe arbustive, de Steppe herbeuse vers Steppe herbeuse, de Steppe herbeuse vers Sol nu, de de Steppe herbeuse vers Zone brûlée, de Sol nu vers Steppe arborée, de Sol nu vers Steppe arbustive, de Sol nu vers Steppe herbeuse, de Sol nu vers Sol nu, de Sol nu vers Zone brûlée, de Zone brûlée vers Steppe arborée, de Zone brûlée vers Steppe

arbustive, de Zone brulée vers Steppe herbeuse, de Zone brulée vers Sol nu et de Zone brulée vers Zone brulée. En effet, la transition de la classe de Steppe arbustive vers Steppe herbeuse est la plus représentée avec 13897,51 ha. Ensuite, la transition au sein de la Steppe herbeuse avec 11484,77 ha. Puis, la transition de la classe de Steppe herbeuse vers Steppe arbustive avec 10015,17 ha. Cependant la faible transition a été enregistrée dans la classe de Steppe arborée vers Mare et la classe de Sol nu vers Zone brulée avec respectivement 8,51 ha et 16,98 ha. De 2013 à 2022, 27 transitions sont enregistrées à savoir les transition des classes de Steppe arborée vers Steppe arborée, de Steppe arborée vers Steppe arbustive, de Steppe arborée vers Steppe herbeuse, de Steppe arborée vers Sol nu, de Steppe arborée vers Zone brulée, de Steppe arborée vers Mare, de Steppe arbustive vers Steppe arborée, de Steppe arbustive vers Steppe arbustive, de Steppe arbustive vers Steppe herbeuse, de Steppe arbustive vers Sol nu, de Steppe arbustive vers Zone brulée, de Steppe herbeuse vers Steppe arborée, de Steppe herbeuse vers Steppe arbustive, de Steppe herbeuse vers Steppe herbeuse, de Steppe herbeuse vers Sol nu, de de Steppe herbeuse vers Zone brulée, de Sol nu vers Steppe arborée, de Sol nu vers Steppe arbustive, de Sol nu vers Steppe herbeuse, de Sol nu vers Sol nu, de Sol nu vers Zone brulée, de Zone brulée vers Steppe arborée, de Zone brulée vers Steppe arbustive, de Zone brulée vers Steppe herbeuse, de Zone brulée vers Sol nu, de Zone brulée vers Zone brulée et de Mare vers Mare. La transition la plus représentée est celle de Steppe herbeuse vers Steppe herbeuse avec 17165,42 ha, ensuite vient la transition de Steppe arbustive vers Steppe arbustive avec 10056,51 ha. Puis la transition de Steppe arbustive vers Steppe herbeuse avec 8909,01 ha. Les faibles transitions ont été identifiées dans les classes de Steppe arborée vers Zone brulée, Sol nu vers Zone brulée, Mare vers Steppe arborée et Mare vers Mare.

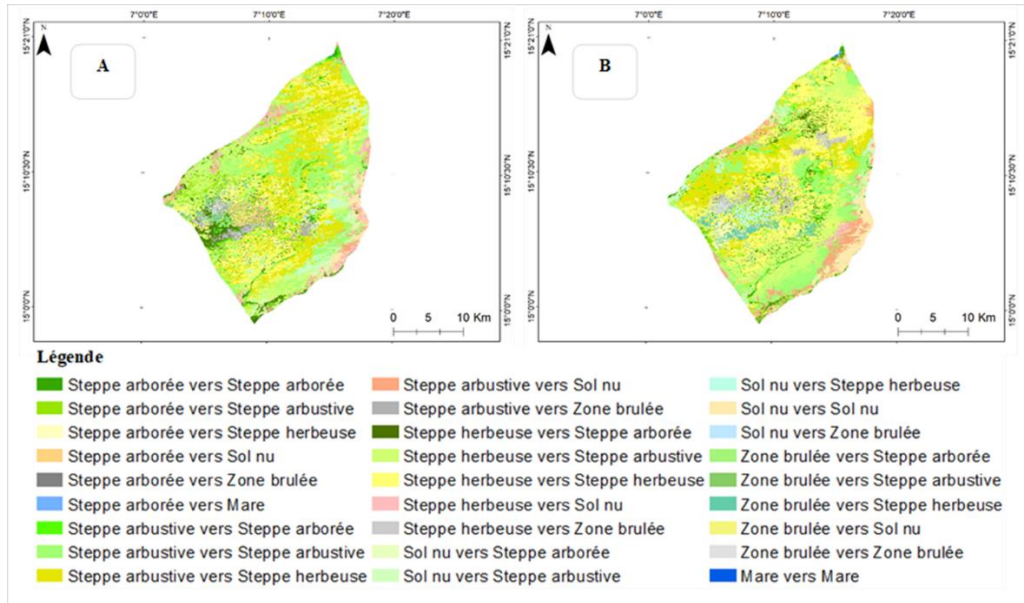


Figure 8 : Cartes de changements d’occupation des sols dans la RBG en A : entre 1990 et 2013 ; B : entre 2013 et 2022

Matrices de transition

Les changements de la dynamique des écosystèmes dans la RBG entre 1990 et 2013, entre 2013 et 2022 sont résumés dans les **Tableau 8 et 9**. Entre les périodes 1990 et 2013, la classe de Steppe arborée (A) a subi une faible stabilité de 1749 ha. La grande partie de cette classe est convertie dans les autres classes dont les classes de Steppe arbustive (B) et Steppe herbeuse (C) ont gagné 1746 ha et 1651 ha respectivement. La classe de Steppe arbustive (B) a connu également une faible stabilité de 9526 ha tandis qu’une grande partie de l’aire de cette classe est transformée dans les autres classes. La classe de Steppe herbeuse (C) a gagné 13898 ha de cette classe. De 2013 à 2022, une faible stabilité est enregistrée dans la classe de Steppe arborée (A) avec 2229 ha. Par contre, des conversions de cette classe vers les autres classes ont été relevées. Ainsi, les classes de Steppe herbeuse (C) et Steppe arbustive (B) ont reçu 1661 ha et 1220 ha provenant de cette classe. Également, la classe de Steppe arbustive (B) présente 10057 ha de stabilité alors que cette classe a subi une modification où la grande partie est transformé dans les autres classes. La classe de Steppe herbeuse (C) a eu 8909 ha issue de cette classe.

Tableau 8 : Matrice de transition des classes en ha entre 1990 et 2013

| | | Aires (ha) en 1990 | | | | | |
|--------------------|---|--------------------|-------|-------|------|-----|---|
| | | Classes | A | B | C | D | E |
| Aires (ha) en 2013 | A | 1749 | 1566 | 1928 | 96 | 214 | |
| | B | 1746 | 9526 | 10015 | 1797 | 284 | |
| | C | 1651 | 13898 | 11485 | 1293 | 433 | |
| | D | 398 | 1193 | 2562 | 1483 | 219 | |
| | E | 446 | 533 | 822 | 17 | 246 | |
| | F | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Légende : A : Steppe arborée ; B : Steppe arbustive ; C : Steppe herbeuse ; D : Sol nu ; E : Zone brûlée ; F : Mare

Tableau 9 : Matrice de transition des classes en ha entre 2013 et 2022

| | | Aires (ha) en 2013 | | | | | | |
|--------------------|---|--------------------|-------|-------|------|------|----|---|
| | | Classes | A | B | C | D | E | F |
| Aires (ha) en 2022 | A | 2229 | 1184 | 1015 | 146 | 150 | 28 | |
| | B | 1220 | 10057 | 8330 | 1131 | 178 | 0 | |
| | C | 1661 | 8909 | 17165 | 1404 | 1373 | 0 | |
| | D | 364 | 3055 | 682 | 3162 | 0 | 0 | |
| | E | 65 | 186 | 1573 | 32 | 362 | 0 | |
| | F | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | |

Légende : A : Steppe arborée ; B : Steppe arbustive ; C : Steppe herbeuse ; D : Sol nu ; E : Zone brûlée ; F : Mare

Taux d'évolution des écosystèmes

L'analyse du **Tableau 10** ressort qu'entre les périodes 1990 et 2013, les classes de Steppe arborée et Steppe arbustive ont connu des taux d'évolution avec des valeurs respectives de -0,08 et de -0,12. Par contre, les classes de Steppe herbeuse, Sol nu et Zone brûlée ont subi des taux d'évolution de 0,07, 0,24 et 0,48 respectivement. De la période 2013 à 2022, les taux d'évolution des classes de Steppe arborée et de Steppe arbustive ont des valeurs de -0,15 et -0,11 respectivement. Cependant, les valeurs de taux d'évolution des classes de Steppe herbeuse, Sol nu et Zone brûlée et Mare sont respectivement de 0,06, 0,24, 0,07 et 3,11.

Tableau 10 : Aires et taux d'évolution entre 1990 et 2013 et entre 2013 et 2022

| Classes | Taux d'évolution entre 1990 et 2013 | Taux d'évolution entre 2013 et 2022 |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Steppe arborée | -0,08 | -0,15 |
| Steppe arbustive | -0,12 | -0,11 |
| Steppe herbeuse | 0,07 | 0,06 |
| Sol nu | 0,24 | 0,24 |
| Zone brûlée | 0,48 | 0,07 |
| Mare | - | 3,11 |

Vitesse d'évolution des écosystèmes

La **Figure 9** montre la vitesse d'évolution des classes d'occupation des sols. Entre 1990 et 2013, la vitesse d'évolution d'occupation des sols décroît au niveau des classes de Steppe arborée et de Steppe arbustive ce qui signifie, une perte respectivement de -18,61 ha par an et -145 ha par an. Par contre, la classe de Steppe herbeuse a subi une vitesse d'évolution rapide donc un gain de 83,22 ha par an. Cette vitesse baisse au niveau des classes de Sol nu, Zone brûlée et Mare, malgré la chute ces différentes classes ont gagné respectivement 51,52 ha par an, 29 ha par an et 0,39 ha par ha. Entre 2013 et 2022, le même phénomène est observé où la vitesse d'évolution d'occupation des sols baisse toujours par les classes de Steppe arborée et de Steppe arbustive avec une perte respectivement de -94,11 ha par an et de -275,33 ha par an. La classe de Steppe herbeuse a connu une croissance rapide de la vitesse d'évolution avec un gain de 194,33 ha par an et cette vitesse a baissé au niveau des classes des Sol nu, Zone brûlée et la Mare avec un gain de 154,78 ha par an, 17,22 ha par an et 3,11 ha par an.

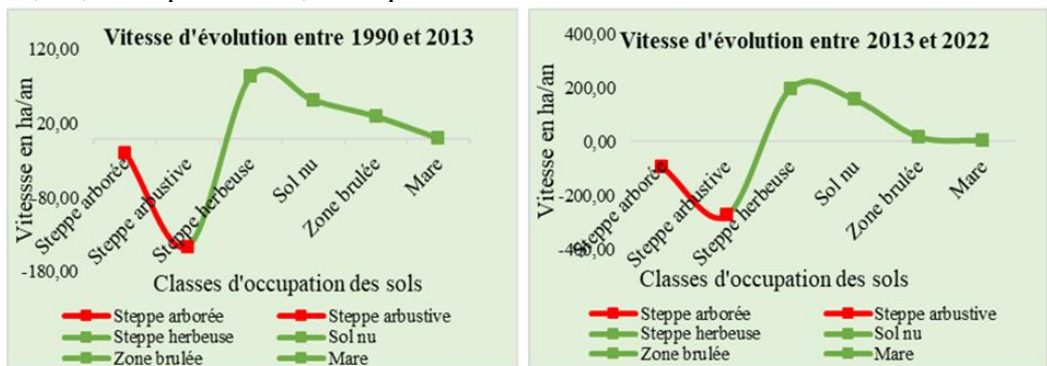


Figure 9 : Vitesse d'évolution des écosystèmes en A : entre 1990 et 2013 et en B : entre 2013 et 2022

Discussion

L'analyse cartographique des classes d'occupation des sols à travers les classifications supervisées des images satellitaires de trois périodes (1990, 2013 et 2022) a permis d'obtenir des indices de précision globale et des valeurs du coefficient de Kappa qui sont statistiquement satisfaisantes. Cela s'expliquerait d'une part par la qualité des images qui n'ont aucune couverture nuageuse et d'autre part par le choix des classes thématiques lors de la numérisation (Geyme & Baz, 2008; Inoussa, 2011) . Il faut noter que les données collectées lors de visite terrain ont également facilité les analyses et l'interprétation visuelle des images. Malgré ces précisions cartographiques acceptables, les classes d'occupation des sols ne sont pas très bien distinctes entre elles. Ces confusions sont dues à des réponses spectrales similaires pour certaines classes d'occupation des sols (Diallo *et al.*, 2011; Koné *et al.*, 2007)

. En effet, Cette confusion pourrait être liée lors de la numérisation des classes. Pour les images l'année 1990, 2013 et 2022 respectivement, 9% des pixels dont 7% des pixels de la classe de Steppe arbustive sont mélangés de la classe de Steppe herbeuse, 13% des pixels dont 11% de la classe de Steppe herbeuse sont mélangés de la classe de Steppe arbustive et 4% des pixels dont 2% de la classe de Steppe arborée sont mélangés de la classe de Steppe herbeuse. Ceux-ci pourraient être expliqués par le fait que, ces trois classes ont des réponses spectrales très proches. Par ailleurs les résultats des cartes d'occupation des sols montrent six (6) classes d'occupation des sols identifiées dans les images des années 2013 et 2022 alors que dans les images de l'année 1990, on note une absence de la classe de mare. Ce phénomène pourrait être lié par le fait qu'en 2013, la population locale créé des points d'eau pour abreuver leurs bétails. Ce résultat est différent à celui trouvé par Idrissa (2021) dans la Réserve Partielle de Faune de Dosso où les Mare ont diminué en nombre et en surface. L'examen des matrices de transitions révèlent plusieurs tendances possibles qui stipulent que toutes les classes d'occupation des sols ont connu des transitions de l'année initiale vers l'année finale. Entre 1990 et 2013, la transition de la classe de Steppe arbustive vers Steppe herbeuse est la plus importante. Cela s'expliquerait à des coupes illégales de bois et laissant place à la classe de Steppe herbeuse. Ces résultats sont en accords avec d'autres études notamment celles de Ibrahima *et al.* (2020) dans les communes de Torodi, Gothèye et Tagazar, (Mamane *et al.*, 2018) dans la Réserve Totale de Faune de Tamou, (Tidjani *et al.*, 2009) à Gouré, (Mahamane *et al.*, 2007) à Gabi où tous ils ont montré une tendance progressive des formations anthropisées. Cependant, on constate un phénomène de stabilité de 2013 à 2022 où les transitions les plus élevées se font au sein d'une même transition, Steppe herbeuse vers Steppe herbeuse et Steppe arbustive vers Steppe arbustive. Ce phénomène de stabilité pourrait être dû à des interventions des Projets dans la Réserve dans le cadre des récupérations des terres. En termes des indices de structure spatiale, entre 1990 et 2013 le phénomène de la dissection est observé dans les formations naturelles et a pour effet négatif la perte de l'habitat naturel tandis que les formations anthropisées ont connu une création de leur nombre de tâches. De 2013 à 2022, toujours les formations naturelles ont connu un phénomène de suppression alors que les formations anthropisées ont subi une agrégation. Toutefois, les activités anthropiques sont à la base de cette mutation paysagère. Le même constat a été signalé par (Kabulu *et al.*, 2008) en République Démocratique du Congo à partir d'une étude réalisée dans le Kantaga et (Mama *et al.*, 2020) au Mali dans la préfecture de Kangaba. Les taux d'évolutions des aires sont négatifs dans les classes de Steppe arborée et de Steppe arbustive et positifs dans les autres classes (Steppe herbeuse, Sol nu, Zone brulée et Mare). La vitesse d'évolution des classes de Steppe arborée et de Steppe arbustive décroît très rapidement

tandis que les autres classes croient de façon exponentielle entre les trois années (1990, 2013 et 2022). Tous ces phénomènes montrent en général une dégradation des ressources naturelles suite à des actions anthropiques et des variabilités climatiques.

Conclusion

A l'issue de cette étude menée dans la Réserve de Biosphère de Gadabédji au moyen de la Télédétection, de Système d'Information Géographique (SIG) et des données terrain, il ressort de cette étude que six (6) classes d'occupation des sols ont été identifiées, à savoir la classe de Steppe arborée, la classe de Steppe arbustive, la classe de Steppe herbeuse, la classe de Sol nu, la classe de Zone brûlée et la classe de Mare. Ainsi, la Réserve est dominée par la classe de Steppe herbeuse avec 26834 ha, 28834 ha et 30579 ha respectivement pour les années 1990, 2013 et 2022. Quatre processus de transformations spatiales sont identifiés. Il s'agit de : la dissection, la suppression, l'agrégation et la création. En outre, les classes de Steppe arborée et de Steppe arbustive ont connu des taux d'évolution négatif tandis que les autres classes, telles que la classe de Steppe herbeuse, la classe de Sol nu, la classe de Zone brûlée et la classe de Mare ont des taux d'évolution positif. Il faut également noter que la vitesse d'évolution décroît très rapidement dans les classes de Steppe arborée et celle de Steppe arbustive. Globalement, les formations naturelles de la Réserve de Biosphère de Gadabédji ont régressé au profit des formations anthropiques. Ce phénomène de régression est beaucoup plus observé à périphérie de la Réserve à cause l'installation des habitations. En effet, les feux de brousse et le pâturage illégal constituent des facteurs qui modifient l'évolution du couvert végétal dans cette Réserve.

Contributions des Auteurs: Ce travail a été réalisé en collaboration avec tous les auteurs. AAS est l'auteur principal, a fait l'élaboration d'un projet de recherche, la collecte des données sur le terrain, la conception des cartes d'occupation des sols et la détection des changements suivi de l'analyse et l'interprétation des données et enfin la rédaction du manuscrit. IMM est le superviseur de ce travail, a contribué à la validation du projet de recherche ainsi que les résultats obtenus à l'issue de cette étude. AGO, a contribué à son amélioration. MM, HNA, DS, BY et MA ont apporté leur observation lors de la rédaction de ce manuscrit.

Remerciements: Les auteurs de ce travail adressent leurs remerciements à l'endroit du Colonel Hamissou Malam Garba, Conservateur de la Réserve de Biosphère de Gadabédji au Centre National de Surveillance et de Suivi Ecologique. Ils remercient également tous les agents des Eaux et Forêts de la commune de Gadabédji pour leur soutien lors de vérité terrain. Ces auteurs

remercient également le Laboratoire de Gestion et Valorisation de la Biodiversité au Sahel de l'Université Abdou Moumouni de Niamey pour l'acceptation de cette thèse.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Abdoulaye, A. S. (2022). Analyse spatiale des écosystèmes de la zone de transition entre le Parc National W du Niger, la Réserve Totale de Faune de Tamou et la Réserve Partielle de Faune de Dosso (Sud-Ouest du Niger). *Mémoire Master à l'Université de Niamey*. 83p.
2. Agbanou, B. T. (2018). Dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé (Nord-Ouest Bénin): De l'analyse diachronique à une modélisation prospective. *Thèse à l'Université Toulouse-Jean Jaurès*. 271p.
3. Agbanou, B. T., Vincent, O., Djafarou, A., Paegelow, M., & Tente, B. (2019). Dynamique spatio-temporelle de L'occupation du sol en zone d'agriculture extensive: cas du secteur Natitingou Boukoumbe au nord-ouest du Benin. *Mélanges En Hommage Au Professeur THOMAS.*, (3), 978-99919-822-8-1.
4. Avakoudjo, J., Adi, M., 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.
5. Barima, Y. S. S., Barbier, N., Bamba, I., Traoré, D., Lejoly, J., & Bogaert, J. (2009). Dynamique paysagère en milieu de transition forêts –savane ivoirienne. *Bois et Forêts Des Tropiques.*, 299 (1), 15-25.
6. Bogaert, J., Celemans, R., & Salvador, V. D. (2004). Decision Tree Algorithm for Detection of Spatial Processes. *Landscape Transformation, Environmental Management*, 33, 62-73. . <https://doi.org/DOI:10.1007/s00267-003-0027-0>
7. Davidson, C. (1998). Issues in measuring landscape fragmentation. *Wildlife Society Bulletin*, 26, 32–37.
8. DFC/AP. (2012). Stratégie nationale et plan d'action pour la conservation et la valorisation de la faune sauvage au Niger. *Rapport*. 58p.

9. Diallo, H., Bamba, Y. S., Barima, Y. S. S., Visser, M., Ballo, A., Mama, A., Vranken, I., Maiga, M., & Bogaert, J. (2011). Effets combines du climat et des pressions anthropiques sur la dynamique évolutive de la végétation d'une zone protégée du Mali (Réserve de Fina, Boucle du Baoulé). *Sécheresse*, 22, 97-107.
10. El-Hadraoui, Y. (2013). Étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'Observation de la Terre. *Mémoire de Master à Ecole Supérieure Des Géomètres et Topographes, Maroc*. 89p.
11. FAO. (2018). La situation des forêts du monde. Les forêts au service du développement durable. *Rapport*. 158p.
12. FAO. (2022). West African Land Cover Reference system. 179p.
13. Geyme, A., & Baz, I. (2008). The potential of remote sensing for monitoring land cover changes and effects on physical geography in the area of Kayisdagi mountain and its surroundings (Istanbul). *Environmental Monitoring and Assessment*, 140 (1–3), 33–42.
14. Gildas, L. D., Henri, S. T. V., & Nickson, E. K. (2016). Dynamique de l'occupation du sol et évolution des terres agricoles dans la commune de Sinende au nord Bénin. *Cahiers Du CBRST*, (9), 101-121.
15. Hatfield, J. H., Orme, C. D. L., & Banks, L. C. (2018). Using functional connectivity to predict potential meta-population sizes in the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 16(4), 215-220.
16. Hiernaux, P., & Le Houérou, H. N. (2006). Les parcours du Sahel. *Sécheresse*, 17, 51-71.
17. Ibrahima, D., Catherine, M., Oumar, S., & Tidiane, S. (2020). Cartographier par télédétection l'occupation du sol et ses changements. *Open Edition Journals*. <https://doi.org/10.4000/echogeo.20510>
18. Idrissa, A. K. (2021). Evaluation de la biodiversité et caractérisation de la végétation de la Réserve Partielle de Faune de Dosso. *Thèse de Doctorat à l'Université de Niamey*. 296p.
19. Idrissa, A. K., Tougiani, A., Moussa, M., Rabiou, H., Idrissa, S., & Bogaert, J. (2019). Influence des pressions anthropiques sur la dynamique paysagère de la réserve partielle de faune de Dosso. *Int. J. Biol. Chem.*, 13(2);, 1094–1108. <https://doi.org/DOI://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i2.41>
20. Inoussa, M. M. (2011). Dynamique des forêts claires dans le Parc National du W du Niger. *Thèse de Doctorat à l'Universioté de Niamey*. 137p.
21. Jensen, J. R. (1983). Biophysical remote sensing. *Annals of the*

- Association of American Geographers.*, 73 (1), 111-132.
22. Kabulu, D. J., Bamba, I., Munyemba, K. F., Defourny, P., Vancutsem, C., Nyembwe, N. S., Luhembwe, M. N., & Bogaert, J. (2008). Analyse de la structure spatiale des forêts au Katanga. *In Ann. Fac. Sc. Agro.*, 1: (2), 12–18.
 23. Kiansi, M. T., Kouta, S., Mazo, I., Arouna, O., Thomas, O., & Imorou, T. I. (2021). Dynamique spatio-temporelle des espaces agraires au sein de la communauté de commune de la Pendjari au Nord-Ouest du Bénin. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies.*, 2509-0119.
 24. Koné, M., Aman, A., Yao A.C.Y., C. L., & N'Guessan, K. E. (2007). Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane Soudanienne en Côte d'Ivoire. *Télédétection*, 7(1-2-3-4), 433-446.
 25. Kouassi, K. J. (2014). Suivi de la dynamique de l'occupation du sol à l'aide de l'imagerie satellitaire et des Systèmes d'Informations Géographiques : cas de la direction régionale des Eaux et Forêts de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). *Mémoire Master à l'Ecole Supérieure d'Agronomie, Côte d'Ivoire*. 74p.
 26. Krummel, J. R., Gardner, R. H., Sugihara, G., O'Neill, R. V., & Coleman, P. R. (1987). Landscape Patterns in a Disturbed Environment. *Oikos.*, 48 : 321.
 27. Lafleur, A. (2015). Étude évolutive de la mangrove de la Baie de Caracola (Nord-Est, Haïti) et perspectives de conservation. *Mémoire à l'Université de Liège, Belgique*. 55p.
 28. Laouel, A. A. (2014). Impacts des activités pétrolières sur la distribution des addax (*Addax nasomaculatus*) dans la Réserve Naturelle Nationale de Termit et Tin-Toumma : Analyse des Populations des Espèces Fauniques et Halieutique. 70p.
 29. Mahamane, A., Saadou, M., Bakasso, Y., Abassa, I., Aboubacar, I., & Karim, S. (2007). Analyse diachronique de l'occupation des terres et caractéristiques de la végétation dans la commune de Gabi (région de Maradi, Niger). *Sécheresse*, 18(4), 296–304. <https://doi.org/DOI:10.1684/sec.2007.0105>.
 30. Mama, A., Alassane, A., Traoré, F. M., Sinsin, A. B., & Bogaert, J. (2020). Fragmentation du paysage naturel au Mali : cas des sites d'orpillage de la préfecture de Kangaba. *. Environnement et Dynamique Des Sociétés.*, N° 002.
 31. Mamane, B., Amadou, G., Barrage, M., Comby, J., & Ambouta, J. K. (2018). Dynamique spatiotemporelle d'occupation du sol dans la Réserve Totale de Faune de Tamou dans un contexte de la variabilité climatique (Sud-Ouest du Niger). *International Journal of Biological*

- and Chemical Sciences.*, 12(4), 1667-1687.
32. Marion, J. (2018). Le rôle de la diversité sur la stabilité des processus des écosystèmes forestiers en contexte de changement climatique. *Thèse de Doctorat à l'Université de Montpellier, France.* 362p.
 33. Oreste, T., Joseph, O., & Inoussa, T. (2019). Dynamique spatiale et structure du paysage dans la commune de Zè, Bénin. *Open Science.*, 13-15.
 34. Roxane, S. (2015). Evaluation de la capacité adaptative des socio-écosystèmes forestiers français face au changement climatique : le cas de la migration assistée. *Thèse en Biodiversité et Ecologie à l'Université de Paris Sud.* 204p.
 35. Saley, M. M. (2019). Etude des stratégies de mise en oeuvre effective de la CITES dans le Biome du Niger : cas de la Reserve de Biosphere de Gadabedji. *Memoire a l'Universite de Maradi.* 65p.
 36. Samuel, C. (2014). Etude des changements d'occupation et d'usage des sols en contexte agricole par Télédétection et fusion d'informations. *Thèse doctorat à l'Université de Rennes 2.* 138p.
 37. Soulama, S., Kadeba, A., Nacoulma, B. M. I., Traore, S., Bachmann, Y., & Thiombiano, A. (2015). Impact des activités anthropiques sur la dynamique de la végétation de la réserve partielle de faune de Pama et de ses périphéries (sud-est du Burkina Faso) dans un contexte de variabilité climatique. *Int. Journal of Applied Biosciences.*, 87, 8047-8064.
 38. Sournia, G. (1998). Les aires protégées d'Afrique francophone. *Editions JeanPierre de Monza, Paris, France.* 272p.
 39. Tidjani, A. A., Ozer, A., & Karimoune, S. (2009). Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger). *Géo-Eco_Trop*, 33 :, 69-80.
 40. Trumper, K. M., Bertzky, B., Dickson, G., Van der Heijden, M., Jenkins, & Manning, P. (2009). Le remède naturel Le rôle des écosystèmes dans l'atténuation des changements climatiques. *Une évaluation rapide du PNUE, Programme des Nations Unies pour l'environnement, PNUE-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni.* 68p.