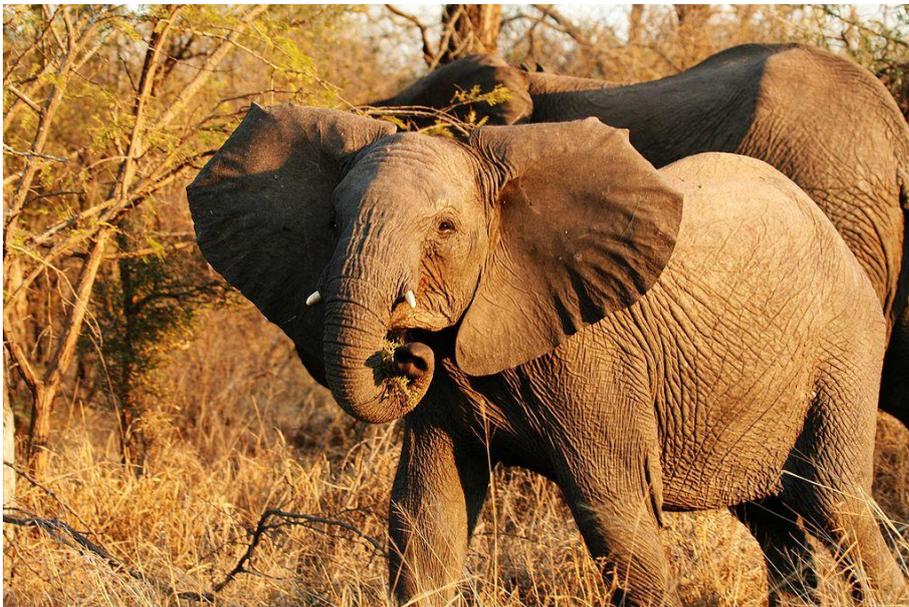


ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

Analyse de la dynamique de la couverture végétale du parc national des deux Balés (Burkina Faso) entre 2002 et 2023 par télédétection multispectrale haute résolution



Cécile Lydie EYENGUE

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, à finalité spécialisée pays en développement

Année académique 2023-2024

Rédigé sous la direction du Dr. Antoine DENIS

Comité de lecture :

Dr. Bernard TYCHON

Dr. Fadia CHAIRI

Copyright :

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège

*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son autrice.

Autrice du présent document : EYENGUE Cécile Lydie

Cecileeyengue@outlook.fr

DEDICACE

À notre Seigneur et Sauveur, Jésus-Christ, Qui, par Sa bonté

et Sa miséricorde, m'a guidé à travers les épreuves que

j'ai rencontrées jusqu'à ce moment, nous permettant ainsi d'atteindre

cette étape de notre formation.

À mon défunt père Obama Jean-Pierre

À ma précieuse mère Melingui Adèle & à ma sœur Jumelle Sylvie

Amougou pour leur soutien témoigné et leur joie procurée durant cette

formation

REMERCIEMENTS

C'est un plaisir pour moi de manifester ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont soutenu dans la réalisation de ce mémoire. Mes sincères remerciements vont à ou (aux) :

Dr Antoine Denis, mon encadrant pour son apport et les précieux conseils prodigués au cours de la rédaction de ce mémoire. Sa bienveillance, son intérêt authentique et sa pédagogie éclairée ont été des éléments cruciaux de mon expérience.

Aux membres du jury, Dr. Bernard Tychon et Dr. Fadia Chairi, pour avoir pris le temps de lire et de présider à cette soutenance.

Julien Norga, l'homme qui illumine ma vie depuis ces sept années. Ta patience infinie et ton soutien inébranlable réchauffent mon cœur et m'inspirent à évoluer.

Je témoigne plus spécialement ma profonde reconnaissance à toute ma famille pour son soutien inconditionnel tout au long de mon parcours académique, et plus particulièrement à : ma mère Melingui Adèle et ma sœur jumelle Filomène Sylvie Amougou.

A Jean-Baptiste Kibora pour m'avoir aidée lors de la mission de terrain. Je tiens à exprimer ma grande gratitude au guide qui nous a accompagnés lors de la descente sur le terrain et qui a souhaité que je ne mentionne pas son nom.

Tous ceux qui m'ont soutenue et qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

RESUME

Situé dans le centre-est du Burkina Faso et s'étendant sur 62520,25 hectares, le parc national des Deux Balés est confronté à des dégradations d'ordre naturel et anthropique, notamment la désertification, l'exploitation du bois, le surpâturage, les incendies de brousse. Ces facteurs menacent la biodiversité, les habitats naturels et l'équilibre écologique de cette aire protégée. Ce mémoire explore la dynamique de la couverture végétale du parc national des Deux Balés (PN2B) au Burkina Faso, sur la période de 2002 à 2023, en utilisant des images multispectrales. L'objectif principal est de quantifier et analyser les changements dans la couverture végétale au fil du temps, en utilisant les images Landsat de 2002 et 2023, tout en examinant l'influence des précipitations sur la phénologie et d'autres facteurs qui pourraient influencer négativement la végétation. Pour réaliser cette étude, une image Landsat 7 de 2002 et une image Landsat 9 de 2023 ont été traitées et analysées. Au cours de ce travail, nous avons identifié et étudié six classes : forêt galerie, savane arborée, savane arbustive et herbeuse, sol nu, zone de culture et surface en eau. Le choix de ces classes repose sur les travaux antérieurs d'autres chercheurs, la composition fausse couleur de l'image Landsat 9 de 2023 et des enquêtes de terrain effectuées en octobre 2023. Afin d'analyser l'évolution de ces classes, une cartographie de l'occupation du sol a été réalisée, en s'appuyant sur la classification dirigée basée sur l'algorithme du maximum de vraisemblance. L'analyse de la dynamique de l'occupation des sols de 2002 à 2023 a révélé que les zones de cultures agricoles ont régressé de 8 354,99 ha en 2002 à 3 291,57 ha en 2023. Les résultats sur la période 2002 à 2023 ont également montré une augmentation significative de la catégorie des savanes arborées, passant de 34 493,77 ha en 2002 à 38 027,19 ha en 2023, due à la conversion des savanes arbustives et herbeuses ainsi que des zones de cultures. La superficie des savanes arbustives et herbeuses a diminué, passant de 14 633,59 ha en 2002 à 12 566,65 ha en 2023. Notre étude a révélé une diminution mineure des sols nus, passant de 3 613,47 ha en 2002 à 3 227,68 ha en 2023. L'analyse visuelle de la classification de 2023 a montré que les zones du parc les plus menacées par ces sols nus sont celles situées à proximité des villages riverains.

Mots-clés : Burkina Faso, Deux Balés, dynamique, images multispectrales, Landsat, occupation du sol, parc national.

ABSTRACT

Located in the central-east of Burkina Faso and covering 62,520.25 hectares, the Deux Balés National Park faces both natural and anthropogenic degradation, including desertification, wood extraction, overgrazing, and bushfires. These factors threaten the biodiversity, natural habitats, and ecological balance of this protected area. This thesis explores the dynamics of the vegetation cover in the Deux Balés National Park (PN2B) in Burkina Faso from 2002 to 2023, using multispectral images. The main objective is to quantify and analyze the changes in vegetation cover over time, using Landsat images from 2002 and 2023, while examining the influence of precipitation on phenology and other factors that might negatively impact vegetation. To conduct this study, a Landsat 7 image from 2002 and a Landsat 9 image from 2023 were processed and analyzed. Throughout this work, we identified and studied six classes: gallery forest, wooded savanna, shrub and grass savanna, bare soil, cultivated areas, and water surfaces. The selection of these classes was based on previous research by other scholars, the false-color composition of the Landsat 9 image from 2023, and field surveys conducted in October 2023. To analyze the evolution of these classes, a land use map was created, relying on supervised classification using the maximum likelihood algorithm. The analysis of land use dynamics from 2002 to 2023 revealed that agricultural areas decreased from 8,354.99 hectares in 2002 to 3,291.57 hectares in 2023. The results for the period from 2002 to 2023 also showed a significant increase in wooded savannas, rising from 34,493.77 hectares in 2002 to 38,027.19 hectares in 2023, due to the conversion of shrub and grass savannas as well as cultivated areas. The area of shrub and grass savannas decreased from 14,633.59 hectares in 2002 to 12,566.65 hectares in 2023. Our study revealed a minor reduction in bare soils, from 3,613.47 hectares in 2002 to 3,227.68 hectares in 2023. The visual analysis of the 2023 classification showed that the areas of the park most threatened by bare soils are those located near neighboring villages.

Keywords : Burkina Faso, Deux Balés, dynamics, multispectral images, Landsat, land cover, national park.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	II
REMERCIEMENTS	III
RESUME	IV
ABSTRACT.....	V
TABLE DES MATIERES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA ZONE D’ETUDE.....	5
1.1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA ZONE ETUDIEE.....	5
1.1.1. Situation géographique.....	5
1.1.2. Le relief.....	5
1.1.3. L’hydrographie.....	6
1.1.4. Les caractéristiques géologiques et pédologiques	6
1.1.5. Les données climatiques.....	7
1.2. CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES.....	9
1.2.1. La végétation.....	9
1.2.2. La faune	9
1.3. ACTIVITES ECONOMIQUES.....	9

1.4 . MILIEU HUMAIN.....	10
CHAPITRE 2 : CADRE METHODOLOGIQUE.....	12
2.1. LA RECHERCHE DOCUMENTAIRE	12
2.2. DONNEES UTILISEES	12
2.3. TRAITEMENT NUMERIQUE DES IMAGES SATELLITAIRES CHOISIES.....	15
2.3.1. Phase de prétraitements des images avant la phase de terrain.....	15
2.3.2. Activités de terrain et traitement des données	16
2.3.3. Traitements des images après la phase de terrain	18
2.4. EVALUATION DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DU SOL.....	24
CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSION	24
3.1. PRESENTATION DES RESULTATS	25
3.1.1. Composition colorée	25
3.1.2. Suivi du développement de la végétation à partir des indices	26
3.1.3. Méthode de classification choisie	28
3.1.3.1. Séparabilité des classes	28
3.1.3.2. Analyse de la dynamique d'occupation du sol entre 2002 et 2023	31
3.1.3.2.1. Présentation cartographique de l'occupation du sol du PN2B.....	31
3.1.3.2.2. Variation des proportions des classes d'occupation du sol du PN2B.....	34
3.1.3.2.3. Précision des classifications : matrice de confusion et coefficient Kappa	35
3.1.3.2.4. Matrice de transition	39
3.2. DISCUSSION	41
3.2.1. Matrice de confusion : Précision et coefficient Kappa	41
3.2.2. Analyse de la dynamique d'occupation du sol entre 2002 et 2023.....	42

CONCLUSION GENERALE	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Données auxiliaires.	12
Tableau 2 : Caractéristiques des différentes bandes spectrales mesurées par les capteurs Landsat (Source : NASA : National Aeronautics and Space Administration).....	14
Tableau 3 : Indice de végétation par différence normalisée calculé.	16
Tableau 4 : Intérêt des différentes bandes Landsat utilisées (Source : USGS.GOV).	19
Tableau 5 : Classes thématiques utilisées (Source : activités de terrain, 2023).....	21
Tableau 6 : ROIs pour la classification de l'image de 2002 (Source : auteur, 2024).	22
Tableau 7 : ROIs pour la classification de l'image de 2023 (Source : auteur, 2024).	23
Tableau 8 : Superficies des différentes classes d'occupation du sol en hectares et en pourcentages (Source : auteur, 2024).	35
Tableau 9 : Matrice de confusion de l'image de 2002 (Source : classification supervisée de l'image de 2002).....	37
Tableau 10 : Matrice de confusion de l'image de 2002 (Source : classification supervisée de l'image de 2023).....	38
Tableau 11 : Matrice de transition entre 2002 et 2023 en pourcentages (Source : auteur, 2024).	40
Tableau 12 : Matrice de transition entre 2002 et 2023 en hectares (Source : auteur, 2024). ...	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du parc national des Deux Balés du Burkina Faso.....	5
Figure 2 : Type de sol présent dans le PNDB (Source : Cozi, 2009).....	7
Figure 3 : Variations inter annuelles de la pluviométrie de 2000-2023 au niveau de la station Boromo (Source : infoclimat.fr).....	8
Figure 4 : Variations des températures moyennes de 2000-2023 au niveau de la station de Boromo (Source : infoclimat.fr).....	9
Figure 5 : Répartition spatiale des points d'échantillonnage pour la collecte des données de terrain (Image Google Earth et composition fausse couleur de l'image du 22/10/2023).....	17
Figure 6 : Composition en fausse couleur des bandes 4-3-2 de Landsat 2002 (a) et de 5-4-3 de Landsat 2023 (b).....	26
Figure 7 : Répartition spatiale du NDVI du PN2B au cours des années 2002 (a) et 2023 (b). 27	
Figure 8 : Séparabilité des classes thématiques de 2002 par la distance de Jeffries-Matusita (Source : classification supervisée de 2002).....	30
Figure 9 : Séparabilité des classes thématiques de 2023 par la distance de Jeffries-Matusita (Source : classification supervisée de 2023).....	31
Figure 10 : Carte d'occupation du sol de 2002 du parc national des Deux Balés (Auteur, 2024).	32
Figure 11 : Carte d'occupation du sol de 2023 du parc national des Deux Balés (Auteur, 2024).	33

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

ETM+ : Enhanced thematic mapper plus

ENVI : Environment for visualizing images

DGRE : Direction générale des ressources en eau

FEM : Fonds pour l'environnement mondial

FAO : Food and agriculture organization of the united nations

GPS : Global positioning system

IGB : Institut géographique du Burkina

MRS : Moyenne résolution spatiale

MEDD : Ministère de l'environnement et du développement durable

NDVI : Indice de végétation par différence normalisée

NASA : National aeronautics and space administration

OFINAP : Office national des aires protégées

OLI : Operational land imager

PN2B : Parc national de Deux Balés

PAPACO : Programme sur les aires protégées d'Afrique du centre et de l'ouest

PNUD : Programme des nations unies pour le développement

QGIS : Quantum-GIS

ROI : Region of interest

SIG : Système d'information géographique

TM : Thematic Mapper

TIRS : Thermal infrared sensor

UICN : Union internationale pour la conservation de la nature

UTM : Universal transverse mercator

USGS : United states geological survey

WGS 84 : World geodetic System 1984

INTRODUCTION GENERALE

Contexte général

Depuis des millénaires, l'humanité évolue en interaction avec son environnement biophysique (Solbrig & Moss, 1992 ; Turner II et al, 1994 ; Lambin et al., 1999 citée par Stephenne, 2002). L'utilisation et l'occupation des terres sont des facteurs essentiels dans le contexte du changement environnemental mondial et sont au cœur des discussions sur le développement durable de notre planète (Turner & Meyer, 1991 ; Lambin et al. 2000).

Afin de relever ce défi, diverses stratégies ont été développées, et de nombreux accords internationaux ont été conclus. C'est ainsi qu'a émergé la nécessité de créer des zones protégées pour contrer la détérioration des ressources naturelles et éviter la perte irrémédiable d'un patrimoine exceptionnellement riche, forgé au cours de millions d'années d'évolution sur notre planète (Coté, 2009). La Convention sur la diversité biologique, établie à Rio de Janeiro en 1992, a mis en lumière l'importance de prendre des mesures appropriées en vue de la préservation et de la conservation des écosystèmes.

De nombreux pays africains ont décidé d'établir de nouvelles zones protégées sur leur territoire (UICN, 1994). La période coloniale française au Burkina Faso, qui a duré de 1895 à 1960, a servi d'inspiration pour la création d'aires protégées (Kiéma, 2007). Au Burkina Faso, la préservation de la biodiversité est prioritaire dans les réserves de faune, les forêts classées et les parcs (Cheikh, 2009 ; Nouvellet & Sawadogo, 1985). La mission première allouée à ces espaces consiste à préserver les forêts en raison de leurs fonctions essentielles, telles que la régulation climatique, la conservation de la biodiversité, la capture du carbone et la garantie de l'approvisionnement alimentaire dans les régions où ils sont délimités. Selon Tankoano et al. (2015), ainsi que Wafo & Huynh (2009), le revêtement végétal représente l'un des éléments essentiels de la configuration des terres dans une zone protégée. En réalité, il influe directement sur la présence de la faune et sur la diversité des espèces de plantes, comme le souligne Wafo et al. (2008).

Malgré leur rôle clé dans la préservation de la biodiversité et des services éco systémiques, les aires protégées se trouvent aujourd'hui confrontées à des défis majeurs en raison des pressions exercées par les activités humaines. Selon le rapport publié par les Nations Unies en 2019, un million d'espèces végétales et animales sont menacées d'extinction, et environ 20 % de la surface terrestre ont été altérés entre 2000 et 2015 (Rapport sur les objectifs de développement durable, 2019).

La situation environnementale au Burkina Faso apprend que le pays est confronté à une détérioration continue et alarmante des ressources naturelles (Issifou, 2009). À l'intérieur des aires protégées du pays, on constate une forte dégradation et une déforestation du couvert forestier (Tankoano et al., 2015). Selon les données de la FAO (2015), sur la période s'étendant de 1990 à 2015, le Burkina Faso a enregistré une perte annuelle de 59 900 hectares de couvert végétal, ce qui équivaut à une détérioration annuelle d'environ 1% (Gansaonré, Benewindé & Yanogo, 2020).

Le parc national des Deux Balés n'est pas exempté de ces dégradations d'ordre naturel et anthropique. D'après les travaux de Tankoano et al. (2016), la couverture végétale du PN2B a régressé d'environ 0,2 % par an sur la période allant de 1985 à 2015. La diminution de la végétation dans cette zone découle de divers facteurs, notamment la désertification liée à la diminution des précipitations, l'exploitation du bois, le surpâturage qui entrave la régénération, les incendies de brousse, ainsi que l'activité d'orpaillage clandestin (Ouedraogo & Evette, 2015).

Cette situation compromet la capacité de cette zone protégée à jouer son rôle fondamental dans la préservation et la conservation in situ de la diversité biologique. Il est donc impératif d'entreprendre des mesures visant à garantir une protection durable. Ces actions devraient reposer sur la surveillance constante de la couverture végétale, de sa répartition spatiale, ainsi que des activités humaines au sein de l'aire protégée, tout en veillant à mettre à jour régulièrement ces mesures. Cependant, dans cette zone, de telles initiatives font actuellement défaut. Seules quelques études, notamment celles de Cozi (2009) ; Zongo (2014) et Tankoano et al. (2016) constituent des références plus récentes dans ce domaine.

Intérêt et objectif de ma recherche

Mes recherches bibliographiques ont révélé que le suivi du couvert végétal par télédétection dans cette région reste largement inexploré. Les études disponibles dataient de 2016, laissant ainsi un champ fertile pour de nouvelles investigations. Face à cela, j'ai pris la décision d'orienter mon sujet d'étude vers une « **Analyse de la dynamique de la couverture végétale du parc national des Deux Balés (Burkina Faso) entre 2002 et 2023 par télédétection multispectrale haute résolution** ».

Travailler dans le parc national des Deux Balés représente une démarche à la fois scientifiquement pertinente et pragmatiquement réalisable. D'un point de vue scientifique, ce parc offre un écosystème diversifié, comprenant des savanes arbustives, des forêts galeries, et des zones arborées et herbacées. Cette variété permet d'analyser les changements dans la végétation à différentes échelles spatiales et temporelles, offrant ainsi une opportunité précieuse pour comprendre les dynamiques écologiques. En outre, les différentes pressions anthropiques citées plus haut peuvent avoir un impact significatif sur la végétation de cet environnement, malgré le statut de zone protégée. Étudier ces effets me permettra de participer d'une façon ou d'une autre à la préservation de ce bien. En termes de faisabilité, la proximité géographique du parc, situé dans une zone couverte par les images Landsat disponibles, facilite l'accès aux données nécessaires pour l'étude. La collecte des données de terrain en octobre 2023 renforce aussi la faisabilité de cette étude.

L'utilisation de la télédétection sera d'une importance majeure pour cette étude. Son utilité a été démontrée au travers des premiers travaux de Wispelaere & Waksman (1977), ainsi que dans les recherches ultérieures, notamment celles de Courel et al. (1988). Plus récemment, des études basées sur l'analyse diachronique de l'occupation des sols au Sahel, menées par des chercheurs tels que Sarr (2009), Souley (2012) et Marega (2016), ont confirmé l'intérêt indéniable de la télédétection pour ce type d'investigation.

Pour aborder notre thématique de manière structurée, nous avons établi un objectif principal. Celui-ci consiste à quantifier et analyser les changements dans la couverture végétale au fil du temps, en utilisant les images Landsat de 2002 et 2023, tout en examinant l'influence des

précipitations sur la phénologie et d'autres facteurs qui pourraient influencer négativement la végétation.

Plus spécifiquement, nous prévoyons de :

- Identifier et cartographier les différents modes d'occupation du sol de notre zone d'étude ;
- Suivre la dynamique spatio-temporelle des différents types d'occupation du sol présents dans le parc durant nos deux périodes d'études ;
- Analyser les changements qui ont eu lieu entre 2002 et 2023.

En répondant à ces différents points, cette étude pourrait aider à orienter les stratégies de gestion, de conservation et de préservation du parc national de Deux Balés en fournissant des informations factuelles sur les changements d'occupation des terres et leurs implications environnementales et sociales.

Pour traiter notre sujet, le présent mémoire sera structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre traitera des généralités présentant la zone d'étude ;
- Le deuxième chapitre sera consacré à la méthodologie du travail ;
- Le troisième chapitre présentera l'interprétation des résultats et la discussion.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

1.1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA ZONE ETUDIEE

1.1.1. Situation géographique

Établi en 1988 par la Zaton°AN VII/FP/PRES/MET, à la suite de la fusion de deux forêts classées, deux Balés et Dibon, le parc national des Deux Balés s'étend sur une superficie de 62520,25 ha. Le parc est situé dans les provinces des Balés et du Tuy, précisément entre 11°25' et 11°36' de latitude nord et entre 2°45' et 3°12' de longitude ouest. Il s'étend sur les départements de Boromo au nord, Poura et Fara à l'est, avec le fleuve Mouhoun marquant sa limite naturelle, et les départements de Pa et Fouzan à l'ouest (Cf. **Fig1**).

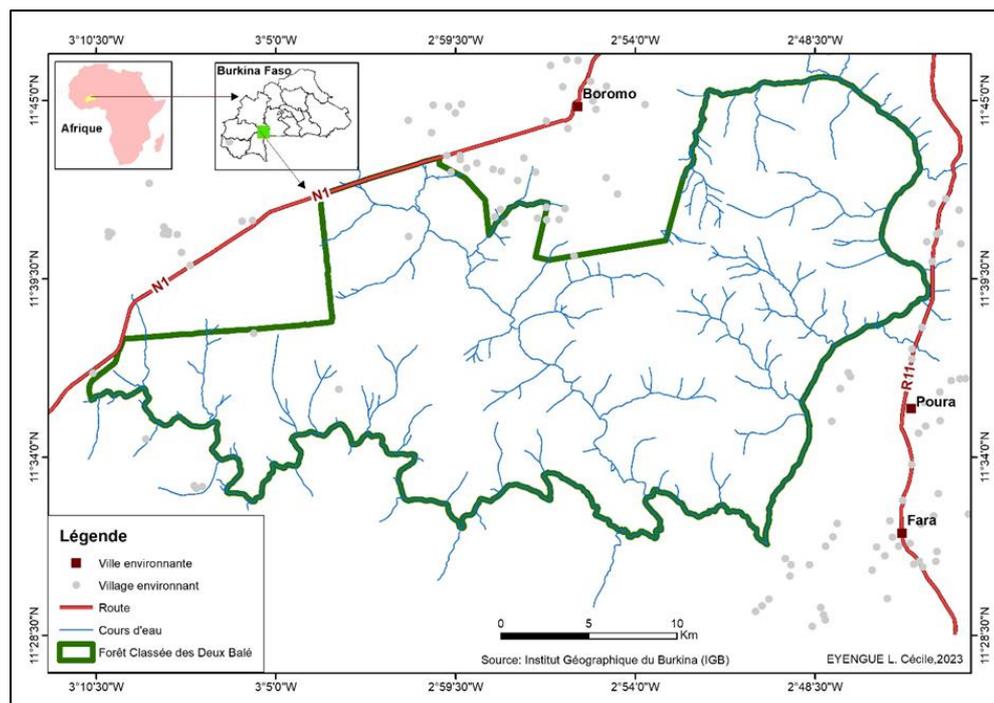


Figure 1 : Localisation du parc national des Deux Balés du Burkina Faso.

1.1.2. Le relief

Selon Cozi (2009), les altitudes du parc national des Deux Balés varient de 240 à 320 mètres sur une pénélaine ondulante avec une altitude moyenne d'environ 280 mètres. Dans le centre-

nord, on trouve des zones élevées où les collines birimiennes sont présentes, avec des affleurements latéritiques qui atteignent environ 320 mètres d'altitude.

1.1.3. L'hydrographie

Le réseau hydrographique du parc repose essentiellement sur le fleuve Mouhoun ; auquel s'ajoutent des rivières et marigots à régimes temporaires. En raison de son écoulement constant, ce fleuve attire particulièrement la faune sauvage, ce qui en fait malheureusement un lieu propice au braconnage.

1.1.4. Les caractéristiques géologiques et pédologiques

Selon Cozi (2009), il existe plusieurs catégories de sols dans le parc (Cf. **fig 2**) :

- Les sols ferrugineux tropicaux et peu évolués se trouvent sur les cuirasses et les matériaux sablo argileux et limono argileux (sols hydro morphes), ceux-ci couvrent plus de la moitié de la superficie du parc. Ces sols ont généralement une structure massive et sont limités en profondeur par l'induration, et ont une forte rétention d'eau ;
- Les sols hydromorphes (les matériaux sablo argileux et limono argileux) occupent les rives du Mouhoun et du grand Balé et présentent des caractéristiques physiques défavorables en raison de l'hydromorphie ;
- Les vertisols se développent sur les schistes amphibolitiques. Ces sols sont particulièrement fertiles et sont difficiles à travailler avec des méthodes traditionnelles en raison de leur texture lourde lorsqu'ils sont humides et de leur dureté lorsqu'ils sont secs.

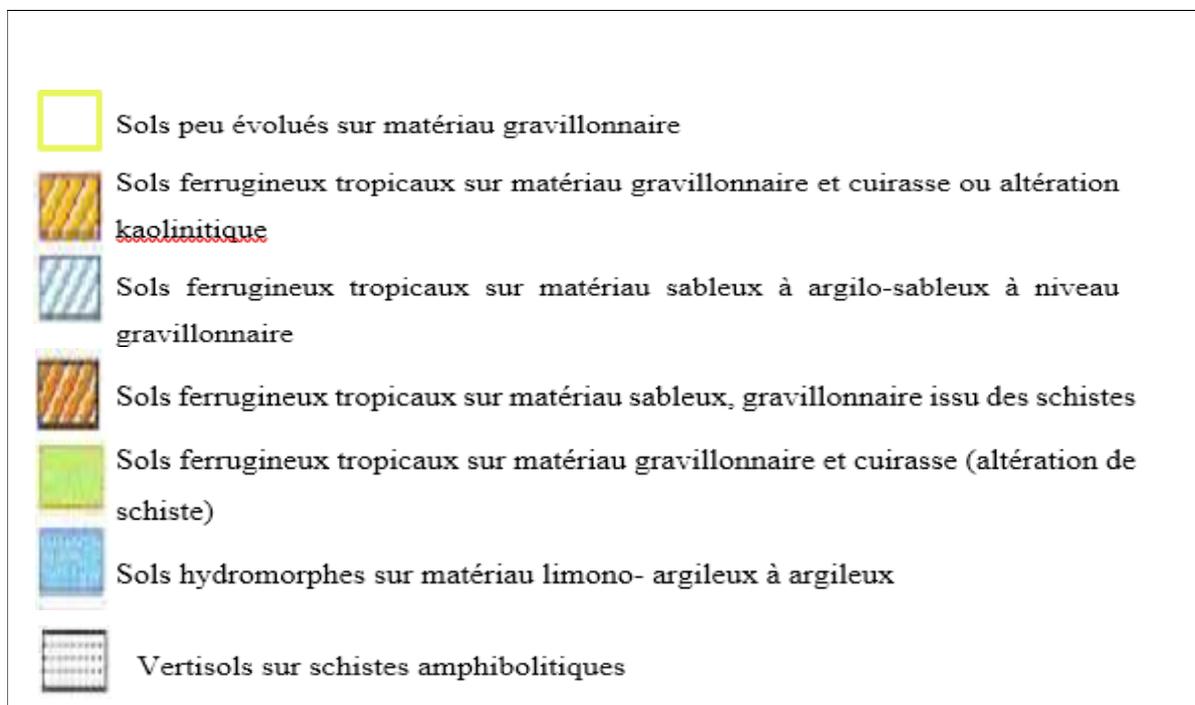
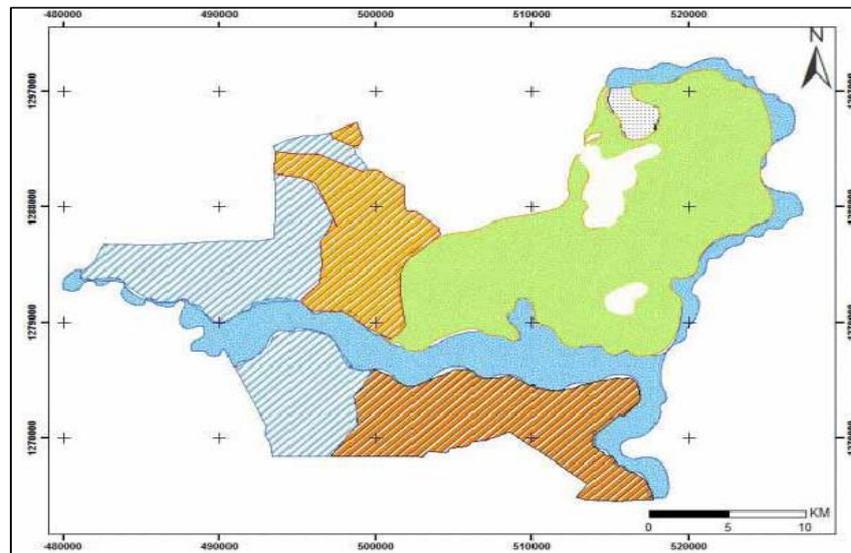


Figure 2 : Type de sol présent dans le PNDB (Source : Cozi, 2009).

1.1.5. Les données climatiques

Selon Diawara (2012), le parc des Deux Balés se trouve dans la zone de couverture climatique qui comprend les isohyètes de 750 mm au nord et 1 000 mm au sud. Cette zone est soumise à un climat de type soudanien, marqué par deux saisons distinctes. La saison des pluies s'étend de mai à octobre, tandis que la saison sèche s'étale de novembre à avril (cité par Tankoano et al., 2017, P.3).

Selon Cozi (2009), le département de Boromo a une température moyenne annuelle d'environ 28°C et une amplitude thermique d'environ 7°C (Tankoano et al., 2017, p.3). Pour montrer la répartition de la pluie dans la commune de Boromo et analyser son impact sur le couvert végétal du parc, nous avons utilisé les données pluviométriques sur une période de vingt-trois ans allant de 2002 à 2023. La figure 3 montre que la quantité d'eau tombée de 2000 à 2023 se situe entre 500 et 1040 mm de pluie. Les années 2002, 2000 et 2011 ont été celles où le déficit pluviométrique a été le plus accentué avec respectivement 511 mm, 643 mm et 645 mm de pluie tandis que les années les plus arrosées sont celles de 2010, 2008 et 2022 avec respectivement 1022 mm, 960 mm, 916 mm (Cf. **Fig 3**).

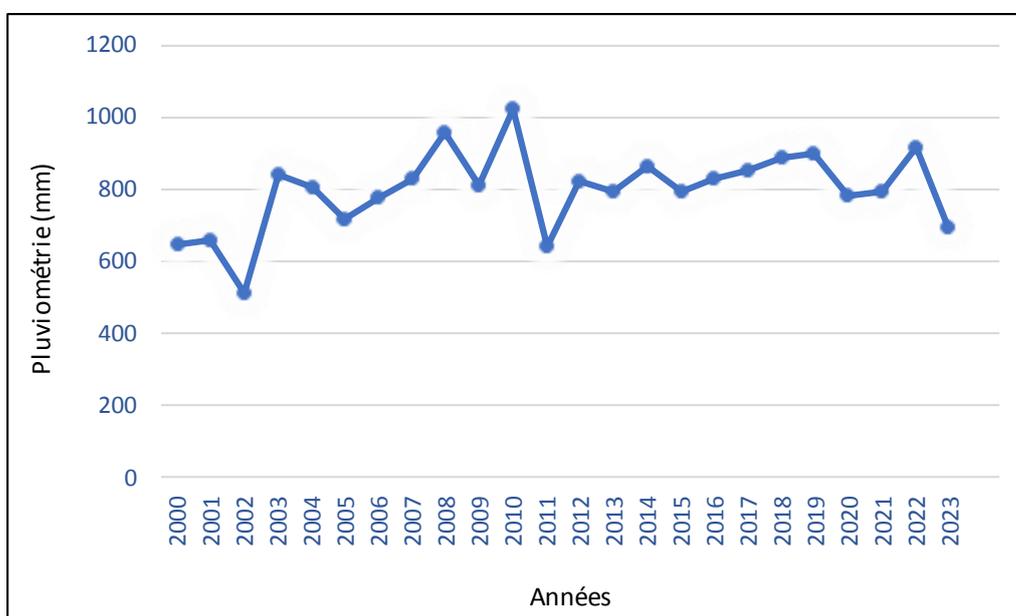


Figure 3 : Variations inter annuelles de la pluviométrie de 2000-2023 au niveau de la station Boromo (Source : infoclimat.fr).

La figure ci-dessous renseigne sur les températures pour les vingt-trois années. Ces données climatiques révèlent une hausse de la température de 0,8°C au fil des 23 années. En comparant nos deux années de référence, on constate que la station météorologique de Boromo avait enregistré une température de 29,5°C en 2002 et 29,7°C en 2023 (Voir **fig 4**).

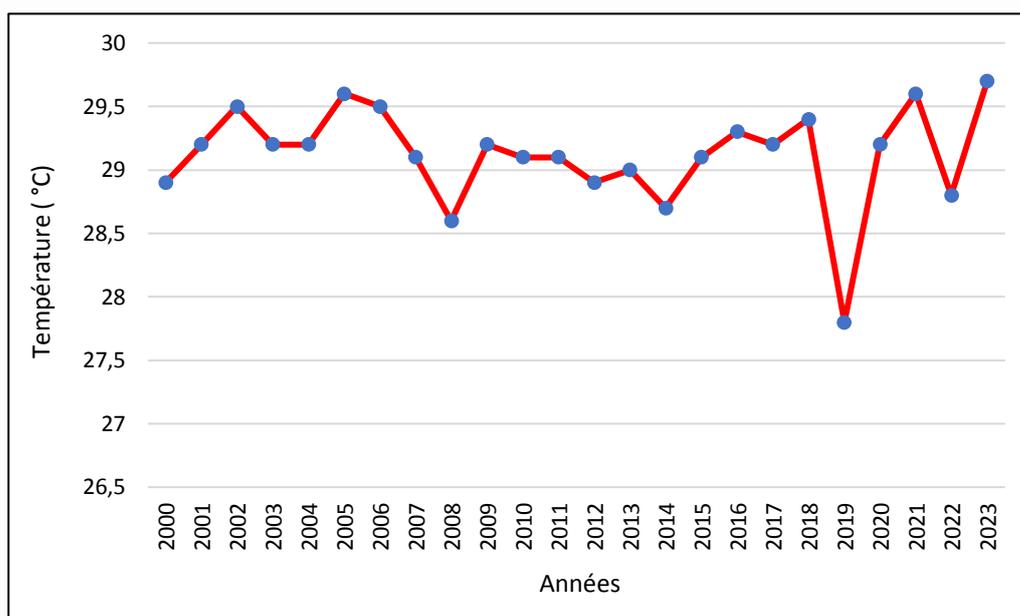


Figure 4 : Variations des températures moyennes de 2000-2023 au niveau de la station de Boromo (Source : infoclimat.fr).

1.2. CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES

1.2.1. La végétation

Comme l'indique Guinko (1985), la zone d'étude est localisée dans le secteur phytogéographique sud-soudanien. D'après la carte d'occupation des sols établie par la direction régionale de l'environnement dans le cadre du schéma directeur d'aménagement des ressources du Burkina Faso en 2001, on y observait différentes formations végétales, notamment de savanes arborées, parsemées de zones de savanes arbustives, ainsi que des galeries forestières (Berlin, 2002, p.30).

1.2.2. La faune

A l'intérieur du parc national de Deux Balés, on retrouve une diversité impressionnante de faune, allant des grands mammifères aux petites espèces moins apparentes mais tout aussi fascinantes, dont l'hippopotame amphibie, le buffle africain, l'éléphant de savane africain et l'antilope. Le parc compte également des crocodiles (Ouedraogo & Evette, 2015).

1.3. ACTIVITES ECONOMIQUES

Les activités économiques pratiquées à la périphérie du parc national des Deux Balés (PNDB) sont principalement, l'agriculture intensive, suivie de près par l'élevage intensif.

L'exploitation des produits forestiers (faune, bois, produits forestiers non ligneux, et pêche), la cueillette, l'apiculture, l'artisanat, la pêche, et la chasse sont également courantes. (Les terroirs adjacents au parc national sont peu pourvus en faune sauvage, incitant les populations riveraines à effectuer des incursions dans le parc national des Deux Balés, selon Ilboudo, 2001).

L'élevage dans la région est habituellement complété par une exploitation à des fins vivrières (élevage agropastoral). Certains animaux demeurent au sein du terroir villageois (élevage agricole). Les troupeaux de zébus, élevés principalement pour la production de viande et occasionnellement mélangés à quelques animaux de trait, sont généralement sous la responsabilité des Peulhs. Ces derniers ont tendance à les conduire illégalement et de manière récurrente en pâture au sein de la zone protégée.

1.4 . MILIEU HUMAIN

➤ Population humaine

Les zones autour du parc sont densément peuplées. Selon les travaux Berlin (2002), il y avait 25 villages avec un total de 51.292 habitants dans la province de Balé, ainsi que 5 villages et deux hameaux de culture dans la zone de Boromo, pour un total de 21685 habitants. Par contre en 2006, la population recensée à Boromo était estimée à 14 594 habitants contre 40 229 habitants en 2009.¹

➤ Gestion du parc

La gestion du parc national des Deux Balés est déléguée à l'office national des aires protégées (OFINAP) du Burkina Faso, dont le siège se situe à Boromo.

La gestion des parcs implique la mise en œuvre de divers projets visant à assurer la préservation, la conservation et la durabilité des écosystèmes naturels. Ces projets peuvent englober une gamme d'activités. À titre d'exemple, en 2008, le parc des Deux Balés a bénéficié d'un projet de réhabilitation, soutenu par l'UICN à travers son programme sur les aires protégées d'Afrique du Centre et de l'Ouest (UICN/PACO, 2009).

De 2014 à 2018, le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD) a initié le projet intitulé « Gestion de zones tampons d'aires protégées au Burkina Faso », avec le

¹ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Boromo_\(d%C3%A9partement\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Boromo_(d%C3%A9partement))

soutien du PNUD et du FEM. Cette initiative a été prise dans l'objectif d'affronter les menaces relatives à la chute du couvert forestier, à la dégradation des terres et à la perte de la biodiversité. De nature physique, sociale et réglementaire, les activités de ce projet étaient particulièrement centrées sur :

- La mise en place d'un cadre de gouvernance pour intégrer la conservation au processus de décentralisation au Burkina Faso ;
- L'engagement des communautés locales dans la gestion et la conservation des aires protégées du Burkina ;
- La création et le maintien des institutions locales pour l'aménagement forestier ;
- La réduction de la dépendance des populations riveraines à l'égard des ressources naturelles présentes dans les aires protégées ;
- La création de zones d'usage spécial, de zones tampons et de corridors biologiques pour améliorer la connectivité entre les forêts protégées dans les territoires municipaux le long du Mouhoun.

D'une part, le projet dans le parc national des Deux Balés a été un succès car les populations ont été sensibilisées à l'importance des ressources naturelles et à leur gestion lors des nombreuses consultations. D'autre part, le projet a échoué car les chartes foncières qui devaient régler l'utilisation des ressources naturelles des zones protégées n'ont pas été vulgarisées et traduites dans la langue locale. Ces chartes sont purement théoriques et sans valeur juridique et leur utilisation par les communautés locales reste à vérifier (Projet-Gestion de zones tampons d'aires protégées au Burkina Faso, 2016, p .45-46).

Aujourd'hui, on observe que les objectifs établis dans le cadre de ce projet sont de moins en moins poursuivis, au profit de pratiques anciennes peu compatibles avec les exigences de durabilité qui ont guidé l'aménagement et la gestion des zones protégées.

CHAPITRE 2 : CADRE METHODOLOGIQUE

2.1. LA RECHERCHE DOCUMENTAIRE

La recherche documentaire a été un travail transversal tout au long de cette étude. Celle-ci a été menée sur des sites internet tels que Researchgate, Google, Mathéo, Orbi, Google scholar, site gouvernemental du Burkina (IGB). Elle a permis de maîtriser la thématique de l'étude et de collecter des données bibliographiques sur les caractéristiques climatiques, hydrographiques, géologiques, pédologiques, ainsi que sur la végétation naturelle. D'autres données auxiliaires ont également été recueillies lors de notre recherche. Il s'agit de données numériques, vectorielles ou non, en libre accès (Cf. **tableau 1**). Ces données ont été utilisées dans notre étude afin de compléter les connaissances acquises sur notre zone.

N°	Données auxiliaires	Source	Format	Utilité
1	Le polygone de la limite du parc	Institut géographique du Burkina (IGB)	Numérique	Délimiter la zone d'étude.
2	La Carte d'occupation des terres	Base de données de l'occupation des terres BDOT 2015	Numérique	Prendre connaissance des différents types de classe d'occupation.
3	Les images hautes résolutions Google Earth datant de 2002 et 2023	Google Earth	Numérique	Utilisées par photo-interprétation au moment de la classification de nos deux images.

Tableau 1 : Données auxiliaires.

2.2. DONNEES UTILISEES

➤ *Choix des images*

La réalisation des cartes d'occupation du sol qui permet de voir l'évolution de notre zone d'étude a été réalisée à partir des images satellitaires provenant des capteurs ETM+ (Pour l'image de 2002) et OLI 2-TIRS 2 (Pour l'image de 2023), téléchargeables gratuitement au format GEOTIFF via le site gouvernemental du United States of Geological Survey via le lien suivant : « <https://earthexplorer.usgs.gov/> ». Nous avons opté pour les images Landsat en raison de leur série temporelle étendue couvrant plusieurs décennies. Cette longue chronologie s'avère précieuse pour étudier l'évolution de la végétation sur plusieurs années. La gratuité et l'accessibilité des images Landsat ont été des facteurs déterminants qui ont influencé notre choix. En outre, il était plus facile de trouver des images Landsat d'une même période avec une faible couverture nuageuse ce qui s'est avéré impossible avec le capteur Sentinel 2. Les images que nous avons sélectionnées datent du mois d'octobre et ont une couverture nuageuse de 0 % pour la scène Landsat 7 (28/10/2002) et de 0.01 % pour l'image Landsat 9 (22/10/2023).

Dans la sélection de nos images, nous avons privilégié des images prises à la même période, c'est-à-dire le mois d'octobre. En sélectionnant des images prises à des moments similaires de l'année, les effets saisonniers sur la végétation, tels que la croissance ou la dormance des plantes, sont plus cohérents d'une année à l'autre, ce qui facilite la comparaison des données. De plus, en utilisant des images prises à des périodes similaires, nous nous assurons que les conditions atmosphériques et d'éclairage sont comparables entre les différentes acquisitions. Cela réduit les biais potentiels causés par des différences dans les conditions de prise de vue, telles que la présence de nuages ou la position du soleil, qui pourraient fausser les résultats de l'analyse. Les images retenues ont été géoréférencées dans le système de projection UTM zone 30 N avec l'ellipsoïde de WGS 84.

Landsat 7- Capteur ETM+				Landsat 9- Capteur OLI 2-TIRS 2			
Bandes	Résolution spatiale	Bande spectrale (µm)	Date d'acquisition	Bandes	Résolution spatiale	Bande spectrale (µm)	Date d'acquisition
			28/10/2002	1 Coastal/ Aerosol	30m x 30m	0,43 - 0,45	22/10/2023
1 bleu	30m x 30m	0,45 - 0,52		2 Bleu	30m x 30m	0,450 - 0,51	
2 vert	30m x 30m	0,52 - 0,60		3 Vert	30m x 30m	0,53 - 0,59	
3 rouge	30m x 30m	0,63 - 0,69		4 Rouge	30m x 30m	0,64 - 0,67	
4 PIR	30m x 30m	0,77 - 0,90		5 PIR	30m x 30m	0,85 - 0,88	
5 SWIR-1	30m x 30m	1,55 - 1,75		6 SWIR-1	30m x 30m	1,57 - 1,65	
6 TIR	60m x 60m	10,40 - 12,50		7 SWIR-2	30m x 30m	2,11 - 2,29	
7 SWIR-2	30m x 30m	2,08 - 2,35		8 Pan	15m x 15m	0,50 - 0,68	
8 Pan	15m x 15m	0,52 - 0,92		9 Cirrus	30m x 30m	1,36 - 1,38	
			10 TIRS 1	100m x 100m	10,6 - 11,19		
			11 TIRS 2	100m x 100m	11,5 - 12,51		

Tableau 2 : Caractéristiques des différentes bandes spectrales mesurées par les capteurs Landsat (Source : NASA : National Aeronautics and Space Administration).

Ces caractéristiques indiquent que les capteurs Landsat sont adaptés pour les observations de niveaux sous-régionaux et locaux en raison de leur capacité à fournir des images qui présentent un compromis intéressant entre la résolution spatiale et le champ de vue au sol (Demaze, 2006, p.6). Nous allons donc utiliser ces images pour localiser et décrire les types de végétation d'une part, et d'autre part pour appréhender les détails de l'organisation interne du parc national des Deux Balés.

➤ *Logiciels utilisés*

En plus des images satellites nous avons eu recours à plusieurs logiciels pour traiter notre sujet. Le premier logiciel à être utilisé est QGIS (version 3.30.3), qui a servi à la réalisation de la carte de localisation de la zone d'étude. Le logiciel ENVI (version 5.0) a ensuite été utilisé pour les prétraitements et les traitements des images choisies. Le logiciel ARCGIS (version 10.8), quant à lui, a été utilisé pour la création, l'habillage et l'édition des cartes. Le tableur Excel a été utilisé pour le calcul des superficies et la réalisation des graphiques.

2.3. TRAITEMENT NUMERIQUE DES IMAGES SATELLITAIRES CHOISIES

La détection ou la perception d'un objet géographique, son identification ou sa reconnaissance, et son analyse ou sa description sont toutes des composantes de la caractérisation géographique par télédétection. La détection des objets dépend des caractéristiques spectrales et spatiales du capteur et de l'objet étudié, comme indiqué dans la section « Choix des images » de ce chapitre. En ce qui concerne l'identification et la description, plusieurs traitements sont nécessaires pour améliorer la lisibilité du contenu des images.

2.3.1. Phase de prétraitements des images avant la phase de terrain

Pour faciliter l'interprétation visuelle et l'analyse numérique, il est essentiel de réaliser une série d'étapes de prétraitement afin de rendre les images exploitables. Étant donné que les images acquises avaient déjà été soumises à des corrections géométriques et radiométriques, ces étapes n'ont pas été nécessaires pour la suite de notre travail. Les opérations de prétraitement ont donc débuté par :

➤ *Découpage de la zone d'étude*

Afin de limiter les traitements à notre zone d'étude, le polygone délimitant le parc a servi de base pour le découpage des deux images. Cela a consisté à découper bande par bande la zone dans le logiciel ArcGIS à l'aide de l'outil extract by mask.

➤ *Calcul de l'indice de NDVI pour 2002 et 2023*

Pour examiner la dynamique du couvert végétal dans la zone d'étude, le NDVI a été calculé à partir des images présentées dans le tableau suivant (Cf. **tableau 3**). Cet indice permet de suivre l'évolution de la végétation tout au long de l'année (Rouse et al., 1973). Il s'obtient en effectuant un calcul à partir des bandes rouges (R) et proches infrarouge (PIR).

Le résultat du NDVI génère une image additionnelle dans laquelle la valeur de chaque pixel est située dans la plage entre -1 et +1. Les valeurs négatives correspondent aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme l'eau, les zones construites et les nuages, où la réflectance dans le spectre rouge est plus élevée que dans le proche infrarouge. Pour les zones de sol nu, où les réflectances dans ces deux spectres sont similaires, le NDVI affiche des valeurs proches de zéro. Les formations végétales présentent généralement des valeurs positives, variant généralement entre 0,2 et 0,8. Les valeurs les plus élevées correspondent aux couverts végétaux les plus denses (Sellers, 1985).

Indices	Formules	Utilité	Références bibliographiques
<p>NDVI</p> <p>Indice de végétation par différence normalisée</p>	<p>$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$</p> <p>Landsat 7 : $(b4-b3) / (b4+b3)$</p> <p>Landsat 9 : $(b5-b4) / (b5+b4)$</p>	Définit l'activité chlorophyllienne.	Rouse et al. (1973)

Tableau 3 : Indice de végétation par différence normalisée calculé.

➤ *Choix des canaux pour la composition colorée*

Les compositions colorées sont couramment utilisées pour mettre en évidence des phénomènes environnementaux tels que les feux de forêts, les vents de sable, les glaces de mer et autres types de surface sur des images multispectrales (Soumahila, 2018). Pour avoir une image colorée qui combine le plus d'informations contrastées possibles, il faut affecter à chacune des trois couleurs (Le rouge, le vert et le bleu) trois bandes spectrales

Avant notre départ sur le terrain, nous avons effectué une seule composition fausse couleur de l'image Landsat 9 de 2023, car celle-ci correspond à la période de notre investigation. Cette démarche nous a aidés à identifier préliminairement certaines caractéristiques du terrain, telles que les types de végétation, les plans d'eau, et les sols nus. En visualisant ces caractéristiques, nous nous sommes familiarisés avec le contexte géographique de la zone d'étude, et cela a permis de mieux planifier les activités sur le terrain.

La composition colorée fausse couleur de l'image de 2002 a été faite après nos activités de terrain. Parmi les sept bandes que comportent Landsat ETM+ de 2002 et les onze bandes OLI TIRS-2 de 2023, seules les bandes 4-3-2 (Image 2002) et 5-4-3 (Image 2023) ont été respectivement affectées aux couleurs rouge, vert et bleu.

2.3.2. Activités de terrain et traitement des données

Même si les images satellites offrent des informations spectralement et spatialement détaillées, leur interprétation visuelle comporte des incertitudes. Il est donc parfois nécessaire de valider ces informations avec des données de terrain. C'est dans cette optique que nous avons entrepris une collecte de données pour comprendre la dynamique d'occupation/utilisation de la zone d'étude.

Nous avons retenu uniquement l'image du 22 octobre 2023 pour les activités de terrain, car elle correspondait à la période de nos activités. En nous appuyant sur l'image fausse couleur de 2023 et sur la visualisation des images Google Earth, nous avons pu établir une liste de six classes d'occupation/utilisation du sol : (i) la forêt galerie, (ii) la savane arborée, (iii) la savane arbustive et herbeuse, (iv) les sols nus et (v) les zones de cultures ; (vi) et la surface en eau.

Afin de surmonter les contraintes du terrain, liées principalement à une vaste zone d'étude (625,2 km²) difficilement accessible en dehors des axes routiers, nous avons décidé de localiser les classes d'occupation du sol à proximité des axes. Grâce à Google Earth, nous avons pu identifier les axes routiers et les pistes. Par ailleurs, sur la base de la photo-interprétation de la composition fausse couleur de 2023, nous avons délimité des sous-zones où chaque classe était la plus représentée. En délimitant ces sous-zones, nous avons tenu compte de leur position par rapport aux axes routiers et aux pistes.

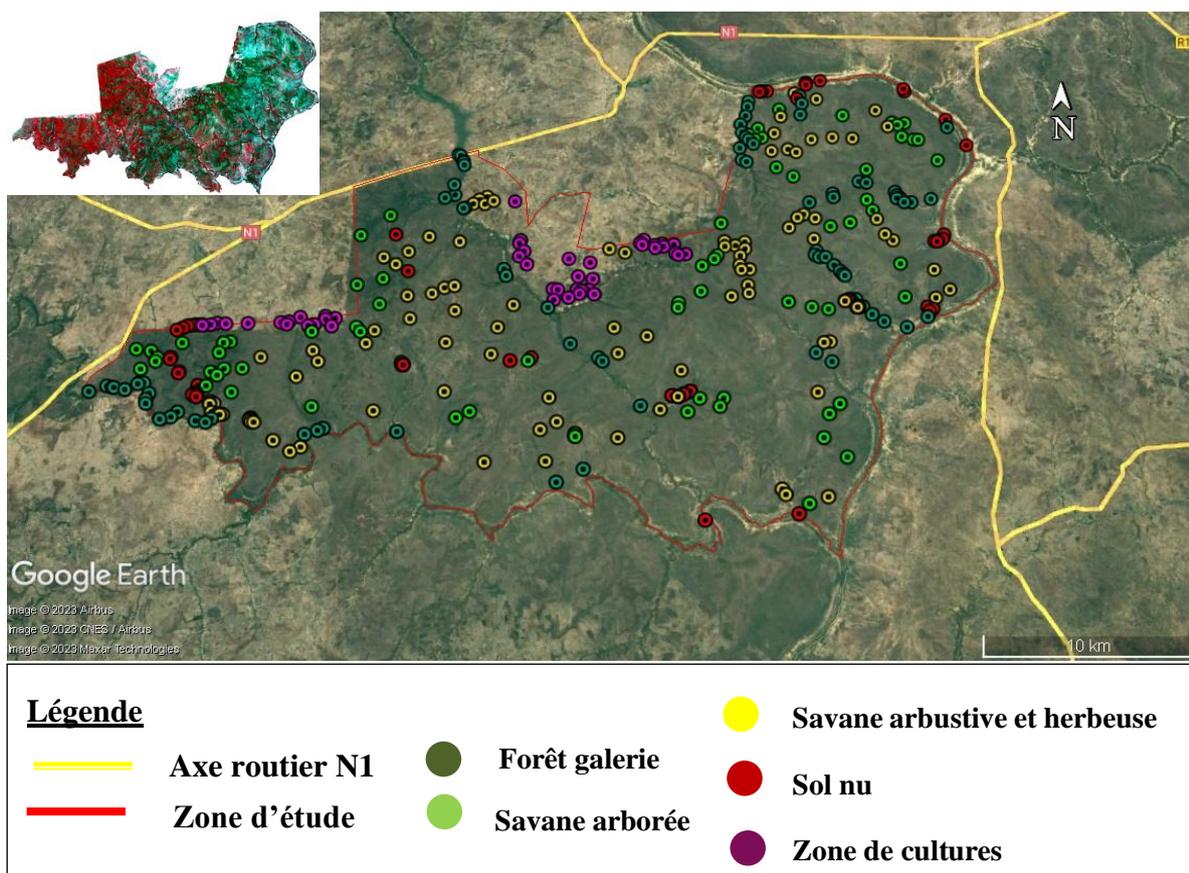


Figure 5 : Répartition spatiale des points d'échantillonnage pour la collecte des données de terrain (Image Google Earth et composition fausse couleur de l'image du 22/10/2023).

- **Le déroulement de la mission**

Une mission de collecte de points GPS a été réalisée du 27 au 29 octobre 2023. Notre équipe était composée de trois personnes : un ami (Jean-Baptiste Kibora développeur full stack et expert SIG à Anptic), le guide et moi-même en tant qu'assistante et organisatrice de la mission de terrain. Nous disposions d'une moto adaptée aux conditions rurales, d'un GPS Garmin et de téléphones portables pour la prise des photos.

Lors de la prospection, les points GPS ont été collectés à l'intérieur et à la limite de nos sous-zones. Au total, 248 points GPS ont été recueillis : 138 points des différentes classes d'occupations de sol par notre équipe et 110 autres auprès du service des eaux et forêts (53 pour la forêt galerie, 56 pour la savane arborée, 63 pour la savane arbustive et herbeuse, 35 pour les sols nus et 41 pour des zones de cultures). Des photographies numériques liées aux sites visités ont également été prises.

Les observations effectuées au cours de ces sorties ont permis d'avoir une compréhension approfondie de la zone d'étude, indispensable pour la conception et l'évaluation de la classification de l'image Landsat 9 du 22 octobre 2023. Les 248 points prélevés pendant la mission ont été saisis dans Excel, puis exporté dans ARCGIS 10.8 où ils ont été convertis en polygones, puis convertis en fichier shapefile. Ces points seront utilisés lors de la digitalisation des parcelles de contrôle de l'image du 22 octobre 2023.

2.3.3. Traitements des images après la phase de terrain

- *Choix des canaux*

Le choix de ces bandes pour la classification supervisée dans le cadre de ce travail repose sur la sensibilité spectrale des différentes bandes, aux caractéristiques de la végétation et sur la qualité des données obtenues par le capteur. Les explications spécifiques pour les bandes 1 à 5 et 7 de Landsat 7, ainsi que les bandes 2 à 7 de Landsat 9 sont résumées dans le tableau suivant :

Landsat 7 (bandes 1 à 5 et 7)	Utilité	Landsat 9 (bandes 2 à 7)	Utilité
Bande 1 (bleu)	Utilisée pour distinguer les propriétés des sols et des eaux.	Bande 2 (bleu)	Utilisée pour la cartographie des plans d'eau et l'analyse de l'humidité.
Bande 2 (vert)	Identification de la végétation et des caractéristiques aquatiques.	Bande 3 (vert)	Utilisée pour évaluer la vigueur des plantes.
Bande 3 (rouge)	Identification des types de plantes, en particulier la santé des plantes.	Bande 4 (rouge)	Utilisée pour discriminer les pentes de végétation.
Bande 4 (infrarouge proche)	Utilisée pour la cartographie de la biomasse et les rivages.	Bande 5 (infrarouge à ondes courtes)	Utilisée pour la cartographie de la biomasse et les rivages.
Bande 5 (infrarouge moyen)	Utilisée pour discriminer la teneur en humidité du sol et de la végétation.	Bande 6 (infrarouge thermique)	Utilisée pour discriminer la teneur en humidité du sol et de la végétation.
Bande 7 (infrarouge à ondes longues)	Détection des caractéristiques géologiques et de la végétation.	Bande 7 (infrarouge à ondes courtes)	Utilisée pour améliorer la teneur en humidité du sol et de la végétation.

Tableau 4 : Intérêt des différentes bandes Landsat utilisées (Source : USGS.GOV).

➤ *Assemblage des bandes*

Après avoir calculé les indices spectraux, nous avons d'abord exporté les bandes de 2023 précédemment découpées, puis celles de 2002 dans ENVI. Pour cela, nous avons sélectionné les bandes 1 à 5 et 7 de Landsat 7 et les bandes 2 à 7 de Landsat 9 (Ces bandes correspondent aux longueurs d'onde du bleu, vert, du rouge, du proche infrarouge, et de l'infrarouge moyen 1 et 2). Etant dans ENVI, nous avons utilisé l'outil « Layer Stacking » pour combiner les bandes des images des deux années (2002 et 2023), afin d'obtenir un fichier « multi-bandes » pour chaque date.

➤ *Méthode de classification et évaluation*

La classification des données multispectrales constitue une étape cruciale dans le traitement des images, car elle permet de regrouper l'ensemble des pixels en un nombre limité de classes en se basant sur un processus de décision (Estes et al., 1983). On distingue deux grandes catégories de classification d'images : la méthode non supervisée et la méthode supervisée.

Selon Olivier et al. (2000), « *la classification non supervisée ne nécessite aucune connaissance préalable de l'utilisateur* ». Dans cette approche, le nombre de classes et leurs caractéristiques sont définis automatiquement lors de la classification, ou par une collection universelle de

classes déjà définies indépendamment de l'image (Olivier et al., 2000). En revanche, pour la classification supervisée, l'utilisateur doit posséder une connaissance approfondie des objets présents dans une partie spécifique de l'image, appelée site d'entraînement (Hamadou, 1999, p.35).

Dans le cadre de cette étude, nous avons adopté l'approche par pixel. Cette méthode consiste à regrouper au sein d'une même classe tous les pixels ayant une signature spectrale d'occupation de sol similaire. Pour classifier nos deux images nous avons choisi la méthode supervisée et utilisé l'algorithme du Maximum de vraisemblance ou Maximum Likelihood. Cet algorithme calcule la fonction de probabilité multidimensionnelle de chaque pixel d'appartenir à l'une des catégories correspondant aux signatures spectrales (Collet, 1992 cité par Moussa, 2016). Nous avons fait ce choix pour deux raisons : premièrement, parce que la classification par Maximum de vraisemblance est populaire, deuxièmement nous disposons d'assez d'informations sur la zone d'étude, recueillies lors de nos visites sur le terrain. Après avoir terminé l'ensemble des prétraitements, la classification de l'image peut enfin commencer. Pour ce faire, elle doit suivre ces étapes :

Définition des classes thématiques

La définition des classes thématiques est la première étape avant la classification. Les informations déjà mentionnées dans la section 2.3.2 des activités de terrain ont servi de base à cette définition. Les classes ont été définies pour être distinctes les unes des autres et communes à nos deux images. Les classes thématiques répertoriées dans le tableau ci-dessous sont celles qui ont été identifiées lors de la visite de terrain.

Classe	Description	Aperçu
Surface en eau	Lac	
Sols nus	Routes, sables, surfaces récoltées etc.	
Savanes arbustives et herbeuses	Plantes herbacées (graminées) et arbustes disséminés parmi les graminées	
Savanes arborées	Arbres et arbustes dispersés sur le tapis de graminées	
Forêts galeries	Forêts denses	
Zones de cultures	Cultures vivrières	

Tableau 5 : Classes thématiques utilisées (Source : activités de terrain, 2023).

✚ Sélection des aires ou « ROI – Region Of Interest » d’entraînement et de contrôle pour chaque classe

Il s’agit ici d’échantillonner notre zone d’étude par catégorie en nous focalisant sur les classes précédemment identifiées (Cf. partie définition des classes thématiques). Cet exercice implique de délimiter au sein de polygones une partie des différentes classes d’occupation du sol par le biais de la digitalisation sur ENVI.

Dans un premier temps, ce sont les aires d’entraînement qui ont été sélectionnés. Pour cela, nous avons chargé le fichier multi-bandes que nous avons précédemment créé dans ENVI. Ensuite, nous avons affiché la composition colorée en choisissant les combinaisons 4-3-2 pour l’image de 2002, et 5-4-3 pour l’image de 2023.

Dans un second temps, nous avons sélectionnés d’autres échantillons de ROIs. Ceux-ci ont été utilisés pour la validation de la classification. Ces ROIs ont été sélectionnés avec rigueur pour éviter le chevauchement avec les ROIs de calibration. Les ROIs de validation de l’image de 2002 ont été obtenus via la photo-interprétation de l’image fausse couleur, et ceux de 2023 à partir des points que nous avons collectés sur le terrain et également par photo-interprétation de l’image fausse couleur. Les tableaux ci-dessous renseignent sur les ROIs utilisés pour cette étape.

Classes d’occupation du sol												
	Forêt galerie		Savane arborée		Savane arbustive et herbeuse		Sol nu		Zone de culture		Surface en eau	
	Pixel	ROI	Pixel	ROI	Pixel	ROI	Pixel	ROI	Pixel	ROI	Pixel	ROI
Calibration	350	54	437	49	448	50	300	50	112	23	38	20
Validation	140	26	193	23	259	23	168	24	100	19	31	10

Tableau 6 : ROIs pour la classification de l’image de 2002 (Source : auteur, 2024).

Classes d'occupation du sol												
	Forêt galerie		Savane arborée		Savane arbustive et herbeuse		Sol nu		Zone de culture		Surface en eau	
	Pixel	ROI	Pixel	ROI	Pixel	ROI	Pixel	ROI	Pixel	ROI	Pixel	ROI
Calibration	357	50	573	50	867	50	272	48	78	16	204	38
Validation	196	28	214	15	323	22	229	25	72	14	209	22

Tableau 7 : ROIs pour la classification de l'image de 2023 (Source : auteur, 2024).

✚ Séparabilité des parcelles d'entraînement par la distance de Jeffries-Matusita

Pour approfondir notre analyse et notre évaluation sur la qualité des zones d'entraînements (ROIs), nous avons calculé l'indice de séparabilité entre les différentes classes en utilisant la fonction « Roi separability » dans le logiciel ENVI. Pour ce faire, nous nous sommes intéressés à la mesure de la distance adoptée par Jeffries-Matusita. En effet, celle-ci calcule la mesure statistique de séparabilité entre deux ensembles de données en se basant sur leurs distributions de probabilité (Pratt, 1991 cité par Chikhaoui et al., 2007).

L'indice de séparabilité de cette mesure varie entre 0 et 2 (Denis, 2021). Les valeurs comprises entre 0 et 1, indiquent que la séparabilité est très faible. Elle est considérée comme faible à moyenne pour des valeurs allant de 1 à 1,9, et jugée excellente lorsque les valeurs sont comprises entre 1,9 et 2 (Richards, 1986, cité par Guerini, 2012).

Selon Wang et al. (2004) et Colditz et al. (2006), une séparabilité des classes est satisfaisante si l'indice est supérieur à 1,90, et une valeur inférieure à 1,0 indique une séparabilité faible entre les classes en question.

✚ Evaluation de la classification

L'évaluation de la classification a été effectuée de deux manières, à savoir :

a) Analyse Visuelle

L'image de 2023 a été validée en comparant visuellement l'image en fausse couleur avec l'image classifiée, tandis que l'image de 2002 a été validée en comparant visuellement l'image classifiée avec l'image en fausse couleur, puis avec l'image de Google Earth de 2002.

b) Analyse statistique

L'analyse de la matrice de confusion a servi de base à la validation statistique. Pour évaluer la classification, les ROIs de validation, ont été utilisés comme points de contrôle. Cette matrice permet de calculer la précision globale de la classification ainsi que le coefficient Kappa. Grâce à cette méthode, nous avons pu mettre en évidence la performance du traitement et la fiabilité des résultats obtenus.

2.4. EVALUATION DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DU SOL

Nous avons décidé de comparer les classifications afin de détecter les changements de l'occupation du sol au sein du PN2B. Konan (2012) affirme que cette méthode utilise la comparaison de classifications d'images provenant de la même scène mais acquises à au moins deux dates différentes. Les deux images classifiées du parc national des Deux Balés ont été utilisées pour identifier et calculer les changements d'occupation du sol entre 2002 et 2023. Les changements d'occupation du sol ont été évalués à partir de deux degrés :

Dans un premier temps, les changements dans l'étendue du parc ont été établis en quantifiant les superficies des différentes unités d'occupation du sol pour chaque année.

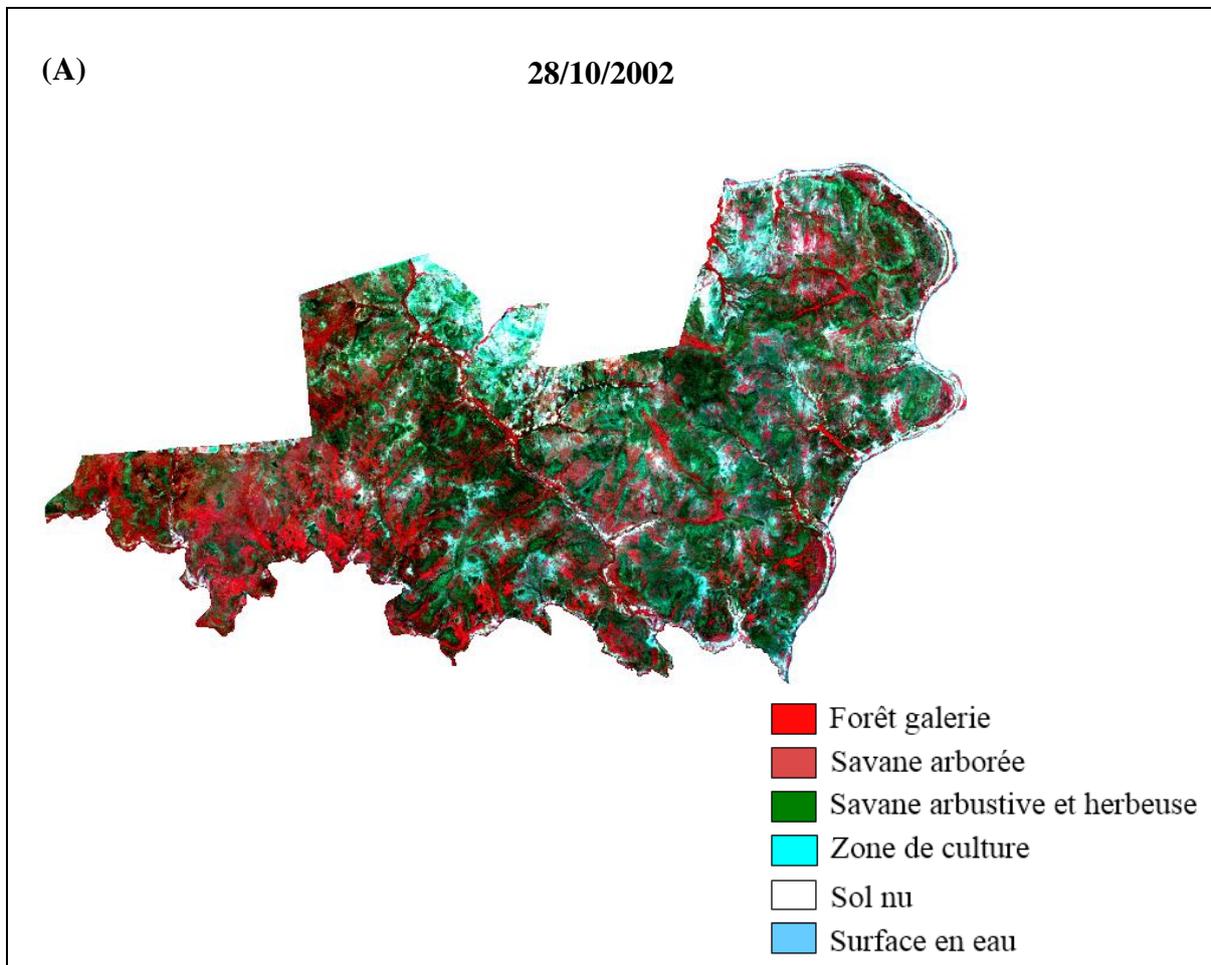
Ensuite, nous avons croisé les deux cartes obtenues entre elles, afin d'obtenir une matrice de transition. Grâce à ce croisement, nous avons obtenu les superficies des zones inchangées et transformées.

CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. PRESENTATION DES RESULTATS

3.1.1. Composition colorée

Les compositions fausses couleurs obtenues après le traitement des images Landsat 7 ETM+ du 28 octobre 2002 et Landsat 9 OLI 2 -TIRS 2 du 22 octobre 2023 sont présentées à la figure 6. En observant la gamme de coloration présente sur chaque image, nous avons pu identifier les différents types d'occupation du sol.



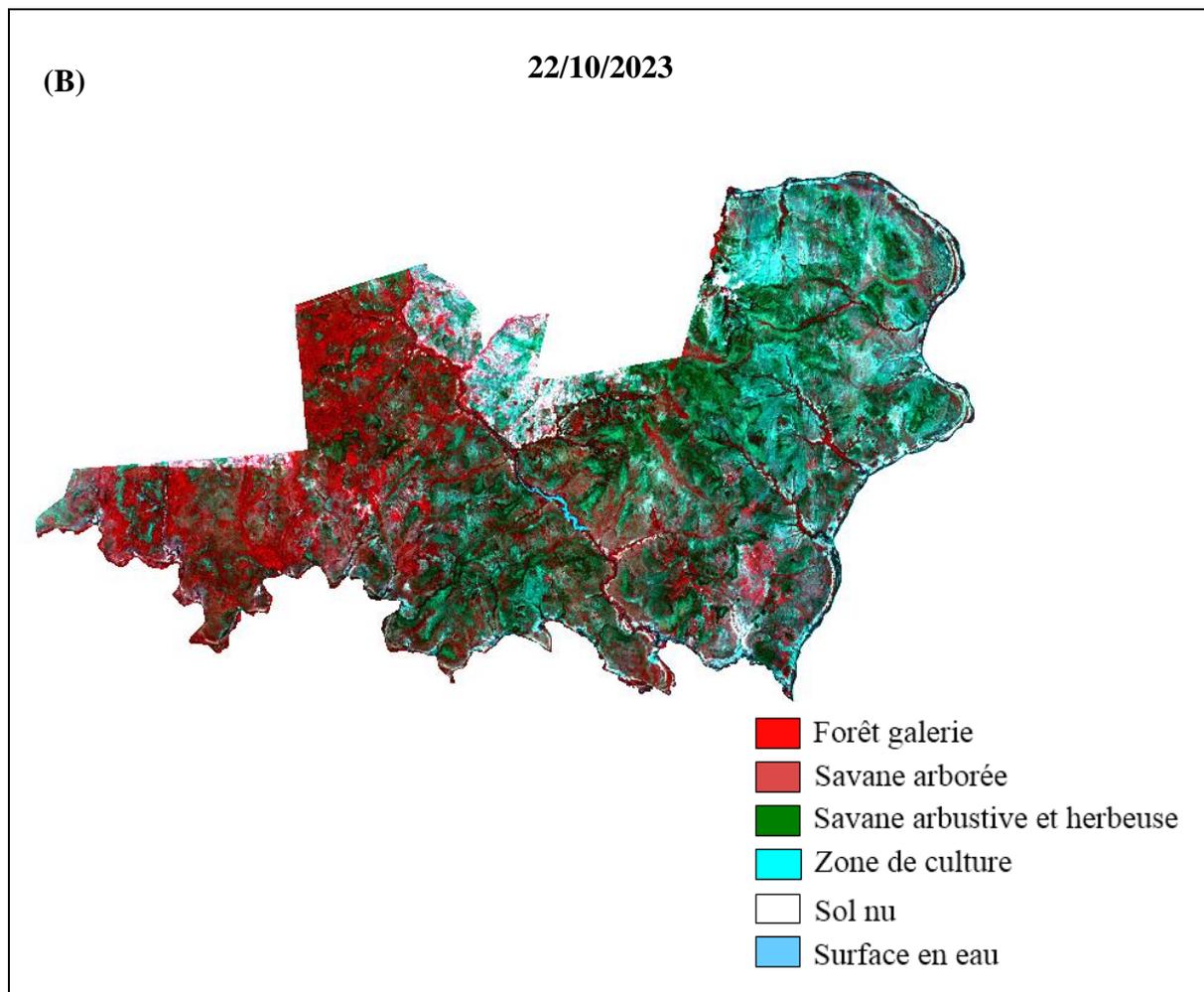


Figure 6 : Composition en fausse couleur des bandes 4-3-2 de Landsat 2002 (a) et de 5-4-3 de Landsat 2023 (b).

Selon l'analyse des compositions fausses couleurs de l'image Landsat 7 et Landsat 9 (figure 6 a et b), la forêt galerie se caractérise par une teinte rouge vif, les savanes arborées par une teinte de rouge clair et les savanes arbustives et herbeuses par une teinte de vert. Les cultures quant à elles sont caractérisées par la couleur cyan, les sols nus par le blanc et les surfaces en eau par la couleur bleue.

3.1.2. Suivi du développement de la végétation à partir des indices

Comme le montre la figure 7 ci-dessous, le calcul de NDVI a permis de détecter les changements de la végétation du PN2B entre 2002 et 2023. Ces résultats fournissent une première indication sur l'évolution du parc avant d'approfondir les analyses.

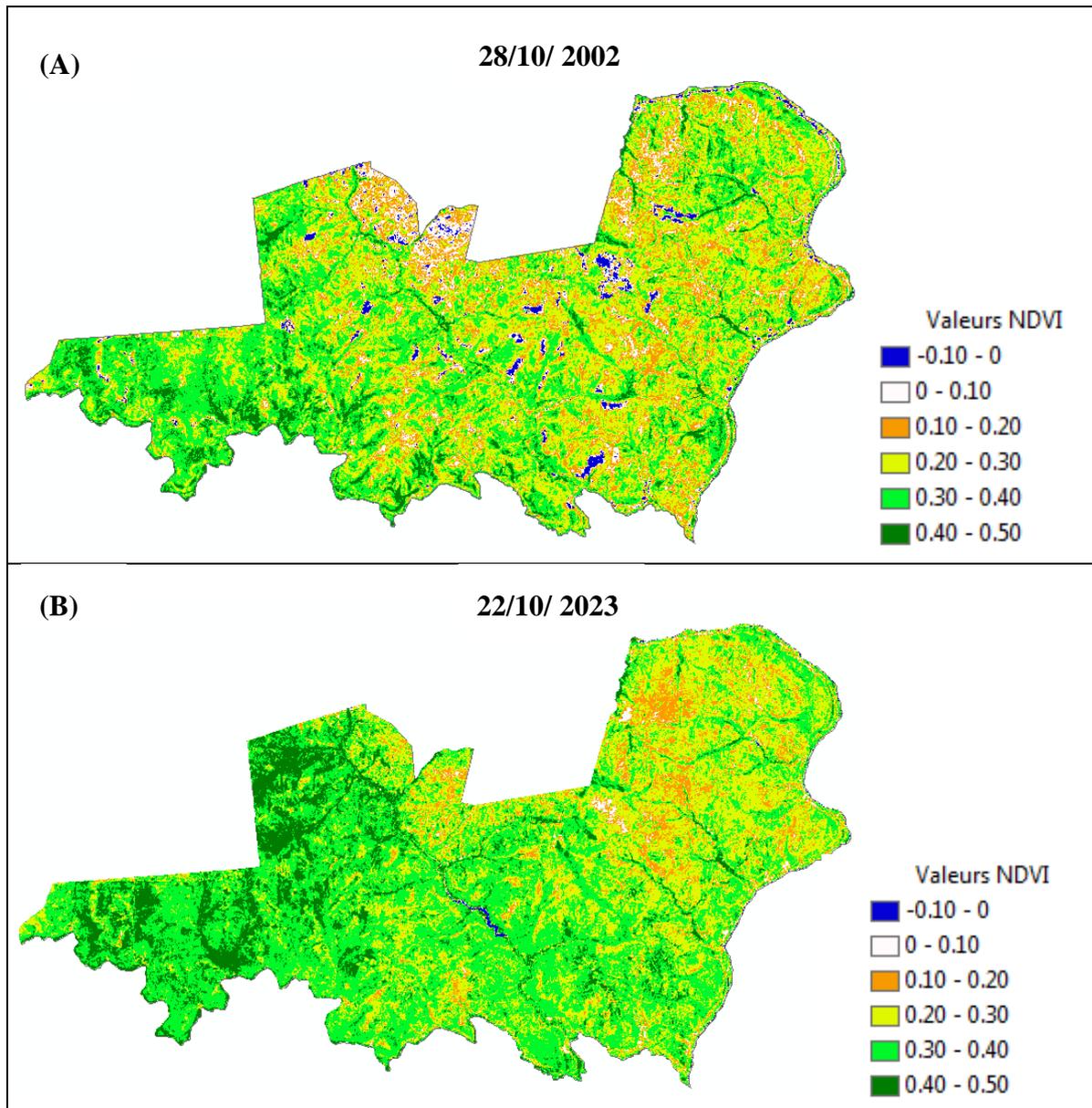


Figure 7 : Répartition spatiale du NDVI du PN2B au cours des années 2002 (a) et 2023 (b).

Les différentes valeurs de la légende nous renseignent sur la nature des classes, le vert foncé, par exemple, correspond à la forêt, le vert clair et le vert citron désignent les savanes. La couleur blanche qui représente une absence totale de l'activité chlorophyllienne correspond aux sols nus, et le bleu correspond aux surfaces en eau.

L'analyse de la zone étudiée basée sur la lecture des deux images NDVIs, révèle les remarques suivantes :

- Eparpillement des petites zones oranges qui correspondent à des valeurs de NDVI faibles [0.10 à 0.20], ces valeurs sont beaucoup plus nombreuses en 2002 qu'en 2023 ;
- Diminution des zones de NDVI de [0.10 à 0.20] et [0.20 à 0.30] en 2023 (Cf. **fig 7 B**, en vert citron) ;
- Augmentation apparente des zones ayant des indices de NDVI de [0.30-0.40] et [0.40-0.50] (Cf. **fig 7B**, couleur vert foncé et vert clair) ;
- La couleur blanche qui représente les valeurs de NDVI faibles [0-0.10], est beaucoup plus concentrée sur la partie Nord- Ouest de l'image de 2002 ;
- L'analyse visuelle des deux cartes montre que l'activité chlorophyllienne est en augmentation en 2023.

Pour approfondir l'analyse de notre NDVI, nous nous sommes intéressés à l'influence que la composition du sol peut avoir sur l'activité végétative des plantes. En effet, certains auteurs, tels Assouline & Mualem (1997) ; Rietkerk et al. (2000) ont affirmé qu'un sol sableux facilite l'infiltration de l'eau précipitée, qui est ainsi disponible pour la croissance des plantes. Kumar et al. (2002) soutiennent que la végétation située sur des sols hydromorphes ou argileux aura besoin de cumuls pluviométriques plus importants pour son développement. Si nous nous fions aux affirmations de ces auteurs, nous pouvons affirmer que la variété des sols présents dans la zone joue un rôle important dans la croissance de la végétation. En regardant la figure 7 (a et b), on remarque que les zones où l'activité chlorophyllienne est la plus forte, avec des valeurs de [0.40-0.50], se trouvent au niveau des sols ferrugineux tropicaux sur matériau sableux à argilo-sableux à niveau gravillonnaire, et sols hydromorphes sur matériau limono- argileux à argileux (Cf. **fig 2**). Les caractéristiques de ces sols, comme leur haute capacité de rétention d'eau et leur drainage limité, combinées au cumul de 694 mm de pluie tombée en 2023 (Source : infoclimat.fr), ont permis de satisfaire les besoins des plantes et d'avoir une augmentation de l'activité chlorophyllienne en 2023.

3.1.3. Méthode de classification choisie

3.1.3.1. Séparabilité des classes

Lorsqu'on calcule l'indice de séparabilité des zones d'entraînement dans le logiciel ENVI, celui-ci donne les résultats par la méthode de la divergence et la distance de Jeffries-Matusita. Pour notre étude, nous allons juste commenter les résultats obtenus par la distance de Jeffries-Matusita.

La vérification des sites d'entraînement effectuée sur la base du calcul de Jeffries-Matusita a donné les résultats présentés dans les figures 8 et 9. La lecture de la figure 8 montre que la séparabilité entre les différentes classes est globalement excellente pour l'année 2002. Cependant, certaines paires de classes présentent des indices de séparabilité moins élevés, ce qui peut entraîner des confusions lors de la classification de 2002. C'est le cas, des paires « forêt galerie - savane arborée » et « savane arborée - forêt galerie » qui ont un indice de 1,72, ce qui signifie une séparabilité moyenne. D'autres risques de confusion concernent les paires « savane arborée - zone de culture » avec un indice de 1,51 et « sol nu - zone de cultures » avec un indice de 1,84.

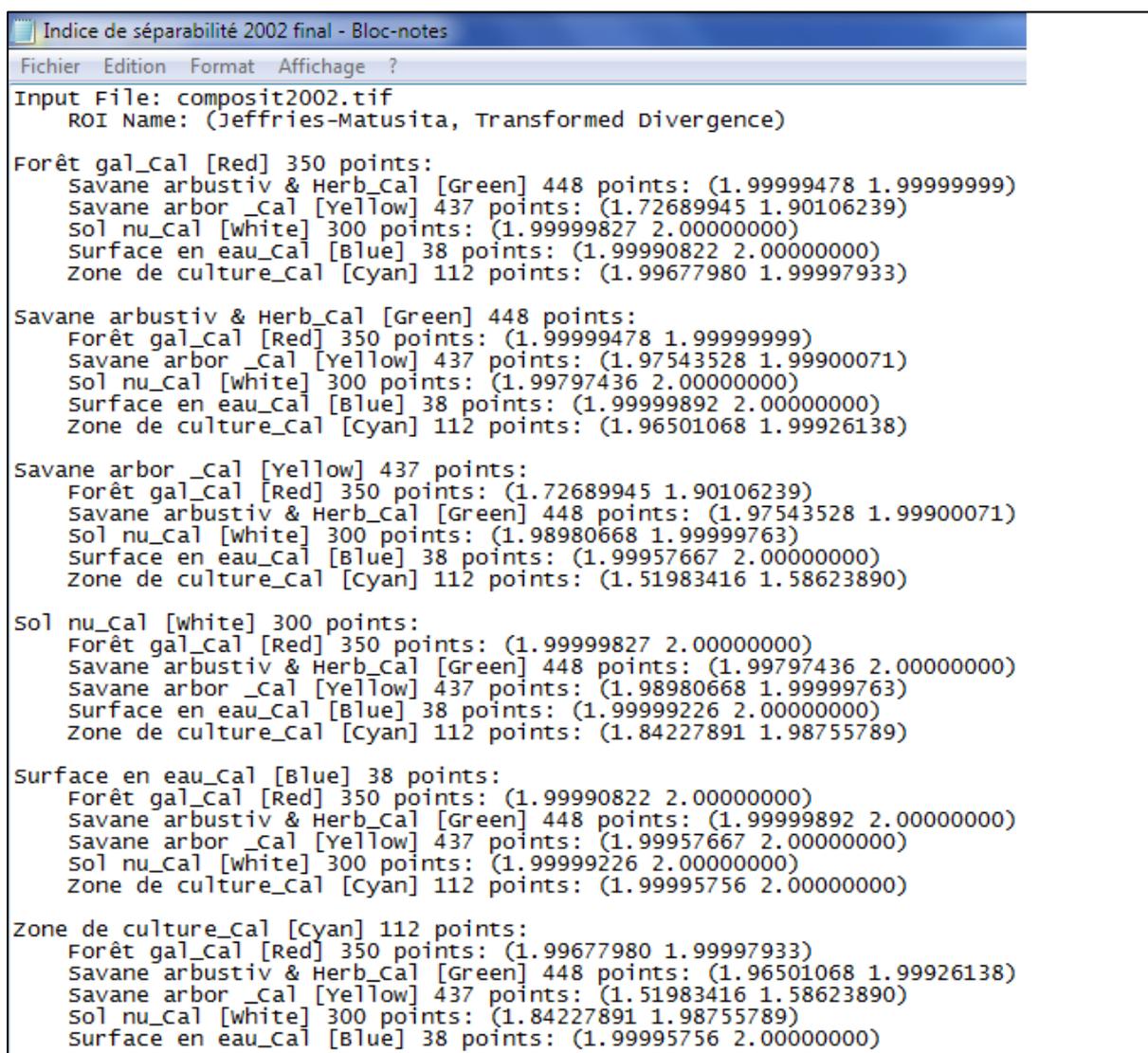


Figure 8 : Séparabilité des classes thématiques de 2002 par la distance de Jeffries-Matusita (Source : classification supervisée de 2002).

Les résultats du test de séparabilité des différentes aires d'entraînement de l'image de 2023, présentés dans la figure 9 ci-dessous, indiquent que la majorité des classes d'occupation présentent une bonne séparabilité car la plupart des paires de classes ont des indices supérieurs à 1,9. Les paires de classes « savane arbustive & herbeuse - zone de culture » et « zone de culture - sol nu » sont les deux groupes qui présentent un indice inférieur à 1,9, ce qui indique que ces classes d'occupation des sols sont moins discriminantes.

```

indice séparabilité corrigée 2023 - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
Input File: composit2023.tif
ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)

Forêt gal_cal [Red] 357 points:
  Savane arborée_cal [Green] 867 points: (1.99999997 2.00000000)
  Sol nu_cal [Sienna2] 272 points: (1.99999421 2.00000000)
  Savane arbustive_cal [Yellow] 573 points: (1.99540688 1.99999989)
  Surface en eau_cal [Blue] 204 points: (1.99991362 2.00000000)
  Zone de culture_cal [Orange1] 78 points: (1.99951665 2.00000000)

Savane arborée_cal [Green] 867 points:
  Forêt gal_cal [Red] 357 points: (1.99999997 2.00000000)
  Sol nu_cal [Sienna2] 272 points: (1.99945271 1.99999992)
  Savane arbustive_cal [Yellow] 573 points: (1.99660612 1.99889751)
  Surface en eau_cal [Blue] 204 points: (1.99727410 2.00000000)
  Zone de culture_cal [Orange1] 78 points: (1.99431192 1.99949335)

Sol nu_cal [Sienna2] 272 points:
  Forêt gal_cal [Red] 357 points: (1.99999421 2.00000000)
  Savane arborée_cal [Green] 867 points: (1.99945271 1.99999992)
  Savane arbustive_cal [Yellow] 573 points: (1.99590847 2.00000000)
  Surface en eau_cal [Blue] 204 points: (1.99971391 2.00000000)
  Zone de culture_cal [Orange1] 78 points: (1.97096893 2.00000000)

Savane arbustive_cal [Yellow] 573 points:
  Forêt gal_cal [Red] 357 points: (1.99540688 1.99999989)
  Savane arborée_cal [Green] 867 points: (1.99660612 1.99889751)
  Sol nu_cal [Sienna2] 272 points: (1.99590847 2.00000000)
  Surface en eau_cal [Blue] 204 points: (1.99447560 2.00000000)
  Zone de culture_cal [Orange1] 78 points: (1.87288557 1.98543681)

Surface en eau_cal [Blue] 204 points:
  Forêt gal_cal [Red] 357 points: (1.99991362 2.00000000)
  Savane arborée_cal [Green] 867 points: (1.99727410 2.00000000)
  Sol nu_cal [Sienna2] 272 points: (1.99971391 2.00000000)
  Savane arbustive_cal [Yellow] 573 points: (1.99447560 2.00000000)
  Zone de culture_cal [Orange1] 78 points: (1.99875565 2.00000000)

Zone de culture_cal [Orange1] 78 points:
  Forêt gal_cal [Red] 357 points: (1.99951665 2.00000000)
  Savane arborée_cal [Green] 867 points: (1.99431192 1.99949335)
  Sol nu_cal [Sienna2] 272 points: (1.97096893 2.00000000)
  Savane arbustive_cal [Yellow] 573 points: (1.87288557 1.98543681)
  Surface en eau_cal [Blue] 204 points: (1.99875565 2.00000000)

```

Figure 9 : Séparabilité des classes thématiques de 2023 par la distance de Jeffries-Matusita (Source : classification supervisée de 2023).

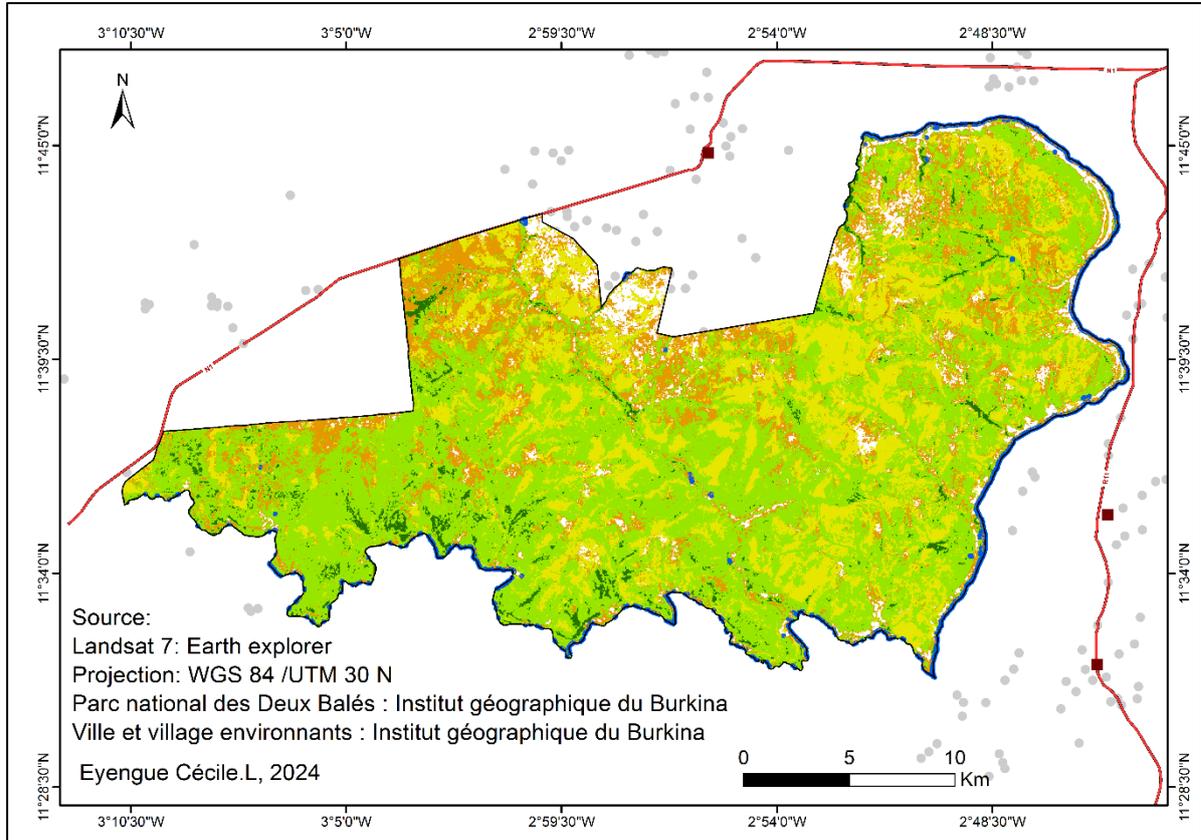
3.1.3.2. Analyse de la dynamique d'occupation du sol entre 2002 et 2023

3.1.3.2.1. Présentation cartographique de l'occupation du sol du PN2B

Les produits cartographiques présentés ici proviennent du processus de classification supervisée exécuté sur les images Landsat de 2002 (ETM+), et 2023 (OLI 2-TIRS 2).

(A)

28/10/2002



Légende

-  Parc national de Deux Balés
-  Ville environnante
-  Route
-  Village environnant

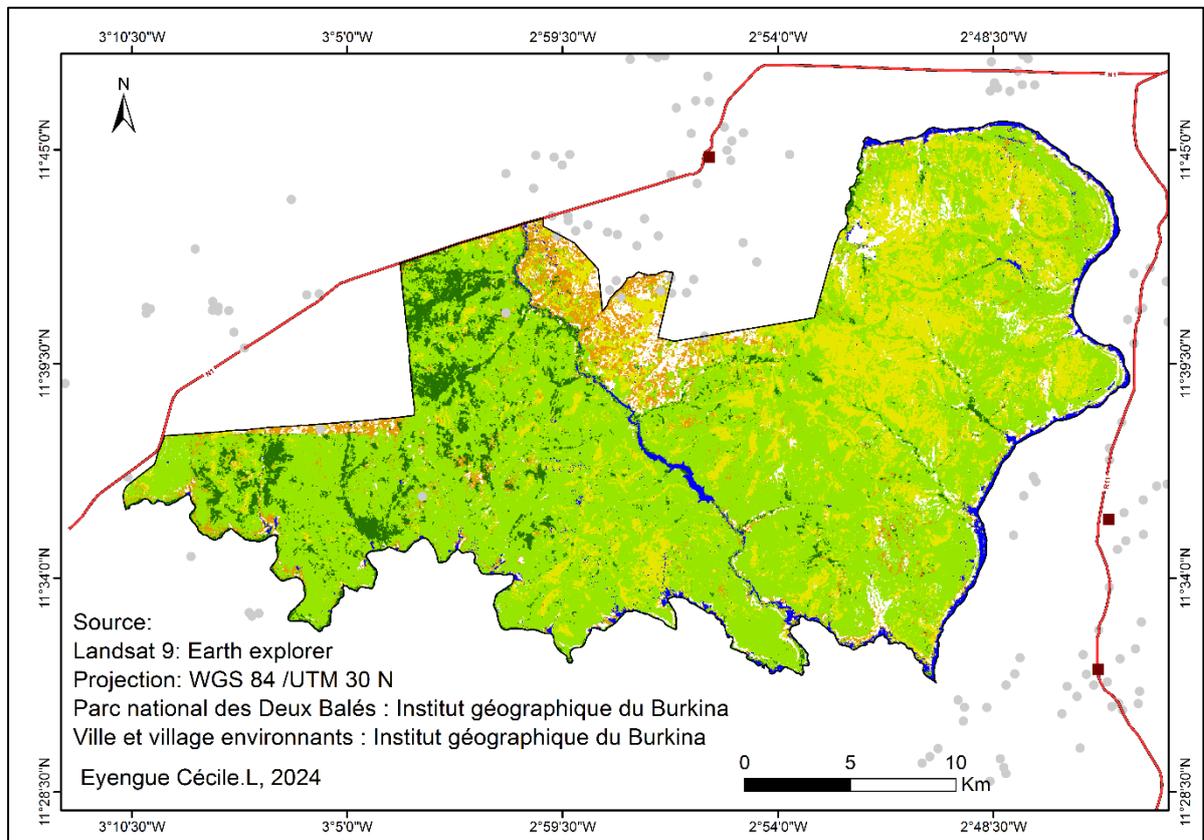
Classes d'occupation du sol

-  Forêt galerie
-  Savane arborée
-  Savane arbustive et herbeuse
-  Sol nu
-  Surface en eau
-  Zone de culture

Figure 10 : Carte d'occupation du sol de 2002 du parc national des Deux Balés (Auteur, 2024).

(B)

22/10/2023



Légende

- Parc national de Deux Balés
- Ville environnante
- Route
- Village environnant

Classes d'occupation du sol

- Forêt galerie
- Savane arborée
- Savane arbustive et herbeuse
- Sol nu
- Surface en eau
- Zone de culture

Figure 11 : Carte d'occupation du sol de 2023 du parc national des Deux Balés (Auteur, 2024).

Ces deux cartographies illustrent les différents types d'occupation du sol qui se trouvent dans l'aire du PN2B dans le temps et dans l'espace. L'analyse des cartes A et B, telles que présentées dans les figures 10 et 11, révèle que :

- En 2002 comme en 2023, la zone d'étude était majoritairement dominée par les savanes arborées (couleur vert clair).
- En 2023, la forêt galerie (en vert foncé) était principalement concentrée dans la partie nord-ouest et ouest du parc, où l'on retrouve des sols ferrugineux tropicaux sur matériau sableux à argilo-sableux avec un niveau gravillonnaire.
- En 2002, les zones de cultures (représentées en orange) étaient plus dispersées, tandis qu'en 2023, elles étaient davantage concentrées dans le nord-ouest du PN2B.
- Les zones de sols nus (en blanc), sont principalement situées aux abords des villages et coins du parc, pour les deux années. L'analyse visuelle montre que, ces zones étaient plus nombreuses en 2002.

3.1.3.2.2. Variation des proportions des classes d'occupation du sol du PN2B

L'analyse de l'évolution de l'occupation des sols présentée dans le tableau 8, révèle une tendance alternée de progression et de régression. En 2002, une grande partie de la superficie était occupée par des savanes arborées, représentant 55,17 % soit 34493,77 ha. En 2023, cette valeur a considérablement augmenté pour atteindre 60,82 %, soit 38027,19 ha. Nous notons également que les forêts galeries ont connu une légère augmentation, passant de 1,98 % (1236,41 ha) en 2002 à 6,18 % (3 862,06 ha) en 2023. La classe des surfaces en eau a également connu une légère augmentation, passant de 0,30 % (188,00 ha) en 2002 à 2,47 % (1545,09 ha) en 2023. En revanche, la superficie des savanes arbustives et herbeuses a diminué, passant de 23,41 % (14633,59 ha) en 2002 à 20,10 % (12566,65 ha) en 2023. Les superficies des zones de cultures et sols nus ont également diminué. Concernant les zones de cultures, en 2002 elles occupaient 13,36 % (8354,99 ha) du territoire et 5,26 % (3291,57 ha) en 2023. Les sols nus représentaient 5,78 % en 2002 et sont passés à 5,16 % en 2023.

Classes d'occupation du sol	Surface (ha)		Surface (%)	
	2002	2023	2002	2023
Forêt galerie	1236,41	3862,06	1,98	6,18
Savane arborée	34493,77	38027,19	55,17	60,82
Savane arbustive et herbeuse	14633,59	12566,65	23,41	20,10
Sol nu	3613,47	3227,68	5,78	5,16
Surface en eau	188,00	1545,09	0,30	2,47
Zone de culture	8354,99	3291,57	13,36	5,26
Total	62520,25	62520,25	100	100

Tableau 8 : Superficies des différentes classes d'occupation du sol en hectares et en pourcentages (Source : auteur, 2024).

3.1.3.2.3. Précision des classifications : matrice de confusion et coefficient Kappa

Les tableaux 9 et 10 présentent les matrices de confusion obtenues à partir de la classification supervisée de 2002 et 2023. La précision générale et le coefficient kappa obtenus à la suite de ces classifications permettent d'évaluer la qualité statistique de notre travail.

➤ Matrice de confusion de la classification de 2002

Pour l'image de 2002, la matrice de confusion indique une précision globale de 95,84% avec un coefficient de Kappa de 0.9475, ce qui signifie que 854 pixels sur 891 ont été bien classifiés pour l'ensemble des classes d'occupation du sol. Même si cette matrice de confusion indique une bonne classification, on remarque que 6 pixels des savanes arborées ont été attribués à la classe forêt galerie (1pixel) et zone de culture (5 pixels). Cela entraîne une erreur d'omission de 3,11% pour cette classe et une erreur de commission respectivement de 0,71% et de 6,76% pour la classe forêt galerie et zone de culture.

Pour la classe des zones de culture, on constate que 20 pixels de cette classe ont été attribués à la classe savanes arborées, puis 11 pixels à la classe savanes arbustives et herbeuses. L'erreur de déficit au niveau de la classe zone de culture est de 31% et les erreurs de commission sont de 9,66 % pour les savanes arborées et 4,07% pour les savanes arbustives et herbeuses. (Cf. **tableau 9**).

➤ **Matrice de de confusion de la classification de 2023**

La classification de l'image de 2023 montre une bonne précision. Cette fois-ci, nous avons une précision globale de 99,43% soit 1236 pixels correctement classés sur 1243 et un coefficient de Kappa de 0.9931. Malgré ce bon résultat, des erreurs de classifications se sont produites. Par exemple, 6 pixels de la classe savanes arbustives et herbeuses ont été affectés à la classe zones de cultures, et 1 pixel de la classe sols nus a été attribué à la classe des zones de cultures. L'erreur d'omission est de 2,80% pour les savanes arbustives et herbeuses, et de 0,44% pour les sols nus. L'erreur de commission est de 8,86% pour les zones de cultures. Le tableau 10 illustre nos propos.

		Validation							
Classes d'occupation du sol	Forêt galerie	Savane arborée	Savane arbustive et herbeuse	Sol nu	Zone de culture	Surface en eau	Total	Erreurs de commission	Précision d'utilisation
	Classification	Forêt galerie	140	1	0	0	0	141	1/141 (0,71%)
Savane arborée		0	187	0	0	20	207	20/207 (9,66%)	187/207 (90,34%)
Savane arbustive et herbeuse		0	0	259	0	11	270	11/270 (4,07%)	259/270 (95,93%)
Sol nu		0	0	0	168	0	168	0/168 (0%)	168/168 (100%)
Zone de culture		0	5	0	0	69	74	5/74 (6,76%)	69/74 (93,24%)
Surface en eau		0	0	0	0	0	31	0/31 (0%)	31/31 (100%)
Total		140	193	259	168	100	31		
Erreurs d'omission		0/140 (0%)	6/193 (3,11%)	0/259 (0%)	0/168 (0%)	31/100 (31%)	0/31 (0%)		Précision globale : 854/891 (95,84%)
Précision de production		140/140 (100 %)	187/193 (96,89%)	259/259 (100%)	168/168 (100%)	69/100 (69%)	31/31 (100%)		Indice kappa : (0.9475 %)

Tableau 9 : Matrice de confusion de l'image de 2002 (Source : classification supervisée de l'image de 2002).

		Validation									
Classes d'occupation du sol		Forêt galerie	Savane arborée	Savane arbustive et herbeuse	Sol nu	Zone de culture	Surface en eau	Total	Erreurs de commission	Précision d'utilisation	
Classification	Forêt galerie	196	0	0	0	0	0	196	0/196 (0%)	196/196 (100 %)	
	Savane arborée	0	323	0	0	0	0	323	0/323 (0%)	323/323 (100%)	
	Savane arbustive et herbeuse	0	0	208	0	0	0	208	0//208 (0%)	208/208 (100%)	
	Sol nu	0	0	0	228	0	0	228	0/228 (0%)	228/228 (100%)	
	Zone de culture	0	0	6	1	72	0	79	7/79 (8,86%)	72/79 (91,14%)	
	Surface en eau	0	0	0	0	0	209	209	0/209 (0%)	209/209 (100%)	
	Total	196	323	214	229	72	209				
	Erreurs d'omission	0/196 (0%)	0/323 (100%)	6/214 (2,80 %)	1/229 (0,44%)	0/72 (0%)	0/209 (0%)		Précision globale: 1236/1243 (99,43%)		
	Précision de production	196/196 (100%)	208/214 (97%)	323/323 (100%)	228/229 (99,56%)	72/72 (100%)	209/209 (100%)		Indice kappa : : (0.9931%)		

Tableau 10 : Matrice de confusion de l'image de 2002 (Source : classification supervisée de l'image de 2023).

3.1.3.2.4. Matrice de transition

La matrice de transition des classifications supervisées de 2002 à 2023, présentée dans les tableaux 11 et 12, met en lumière les évolutions des classes d'occupation du sol entre 2002 et 2023. Celle-ci indique que :

La forêt galerie a connu une très grande dynamique de changement ; seulement 10,85 % (418,91 ha) de sa superficie restée inchangée. Les changements majeurs concernent les savanes arborées avec un taux de 68,78 % (2656,34 ha) et les zones de culture, avec 15,93 % (615,22 ha). Les conversions de savanes arbustives et herbeuses en savanes arborées sont aussi notables, 16,63% (6323,47 ha) des savanes arbustives et herbeuses de 2002 ont été converties en savanes arborées en 2023. Inversement, une reconversion des savanes arborées en savanes arbustives et herbeuses est également notable. 23,56 % soit 2961,32 ha de cette classe en 2002 sont devenus des peuplements de savanes arbustives et herbeuses en 2023. La classe sols nus affiche également une transformation substantielle ; en 2023, la majeure partie de cette classe s'est convertie en zones de cultures (33,85 %), suivie par les savanes arborées (15,48 %), et les savanes arbustives et herbeuses (8,20 %). Nous remarquons aussi qu'une portion importante de la surface en eau a aussi subi des changements, 57,76 % de cette classe en 2002 a été convertie en savanes arborées en 2023. La classe zones de cultures a maintenu 33,07%, soit 1088,39 ha de sa superficie initiale en 2002. En effet 32,41 % soit 1066,86 ha de la superficie cartographiée de cette classe ont été convertis en savanes arborées, 18,96 % en sols nus, 14,63% soit 481,64 ha en savanes arbustives et herbeuses.

	2023 (surface en %)						
	Classes d'occupation du sol	Forêt galerie	Savane arborée	Savane arbustive et herbeuse	Sol nu	Surface en eau	Zone de culture
2002 (surface en %)	Forêt galerie	10,85	1,92	0,04	0,26	3,05	0,81
	Savane arborée	68,78	69,47	23,56	15,48	57,76	32,41
	Savane arbustive et herbeuse	3,65	16,63	58,79	8,20	2,27	14,63
	Sol nu	0,64	1,40	6,59	42,18	15,74	18,96
	Surface en eau	0,15	0,01	0,01	0,03	11,08	0,12
	Zone de culture	15,93	10,57	11,00	33,85	10,09	33,07
	Total	100	100	100	100	100	100

Tableau 11 : Matrice de transition entre 2002 et 2023 en pourcentages (Source : auteur, 2024).

	2023 (surface en ha)							
	Classes d'occupation du sol	Forêt galerie	Savane arborée	Savane arbustive et herbeuse	Sol nu	Surface en eau	Zone de culture	Total
2002 (surface en ha)	Forêt galerie	418,91	729,80	5,38	8,37	47,14	26,82	1236,41
	Savane arborée	2656,34	26417,26	2961,32	499,52	892,47	1066,86	34493,77
	Savane arbustive et herbeuse	141,12	6323,47	7387,47	264,79	35,10	481,64	14633,59
	Sol nu	24,71	531,79	828,44	1361,39	243,22	623,92	3613,47
	Surface en eau	5,76	5,04	1,17	0,89	171,19	3,94	188,00
	Zone de culture	615,22	4019,83	1382,87	1092,71	155,96	1088,39	8354,99
	Total	3862,06	38027,19	12566,65	3227,68	1545,09	3291,57	62520,25

Tableau 12 : Matrice de transition entre 2002 et 2023 en hectares (Source : auteur, 2024).

3.2. DISCUSSION

3.2.1. Matrice de confusion : Précision et coefficient Kappa

Les précisions générales et coefficients kappa de 95,84% et 0,9475 pour l'image de 2002, et de 99,43% et 0,9937 pour l'image de 2023 montrent que les deux classifications sont bonnes. Nos résultats sont vérifiés par des auteurs tels que Landis et Koch (1977) ainsi que Lauginie (2007) qui soulignent que : « *Dans une étude de l'occupation du sol, lorsque l'indice de Kappa ou les précisions globales évalués dans les opérations de classification est compris entre 50 et 75%, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés* ». Ces résultats sont similaires à ceux d'autres chercheurs. En effet, N'Guessan et al. (2019) ont obtenu des précisions globales de 90,70 %, 91,78% et 92,19 %, en utilisant la classification dirigée par la méthode de maximum de vraisemblance pour classer les images Landsat (TM, ETM+ et OLI) couvrant la forêt classée d'Agbo1 en Côte d'Ivoire.

En outre, les travaux de Tankoano et al. (2016), ont également montré les avantages de la classification supervisée par la méthode de Maximum de vraisemblance avec des images à haute résolution. Cependant, les précisions globales obtenues étaient de 83,64 %, 84,28 %, et 88,03 % respectivement pour les images Landsat de 1986, 2000 et 2015. Les sources de confusion rencontrées par nos deux classifications sont succinctement dues à :

➤ *Matrice de 2002*

La confusion observée entre les savanes arborées et les forêts galeries est liée à plus facteurs interconnectés. Le premier facteur de confusion est la résolution spatiale (de 30 mètres). Les forêts galeries, souvent étroites et linéaires, peuvent ne pas être entièrement capturées dans des pixels individuels, entraînant ainsi des pixels mixtes. Ces derniers peuvent contenir des éléments des savanes arborées et des forêts galeries, ce qui a rendu la distinction difficile à certains endroits du parc. L'autre facteur de confusion est dû à l'influence que les différents types de sols présents dans la zone, peuvent avoir sur la réflectance spectrale de la végétation qui y pousse. Par exemple, les forêts galeries et les savanes arborées qui poussent sur les sols hydromorphes et ferrugineux peuvent avoir des niveaux de réflectance similaires lorsqu'ils sont saturés en eau à la fin de la saison des pluies, c'est cela qui a faussé la distinction entre ces deux types de végétation.

La confusion entre les savanes arborées et les zones de cultures est due aux erreurs de photo-interprétation et d'échantillonnage. Il a été difficile d'identifier les cultures dans les zones où les savanes arborées étaient denses. La confusion entre les zones de cultures et les savanes arborées, ainsi qu'entre les zones de cultures et les savanes arbustives et herbeuses, est due aux mêmes raisons.

➤ *Matrice 2023*

Malgré le fait que nous ayons une image Landsat 9 plus améliorée que celle de Landsat 7 et avons ajusté notre travail avec des données de terrain, des confusions se sont produites. La confusion entre les savanes arbustives et herbeuses et les zones de cultures peut être attribuée aux facteurs liés à la nature des cultures, aux conditions de prise de vue et aux caractéristiques des sols. Premièrement, les cultures de niébé, d'igname et de manioc en stade de maturité, observées lors de ma visite de terrain, peuvent présenter des caractéristiques spectrales similaires à celles des savanes arbustives et herbeuses. Cette ressemblance a entraîné des signatures spectrales presque identiques dans les bandes du visible et du proche infrarouge. Deuxièmement, la fin de saison des pluies (Saison qui correspond à la prise de l'image Landsat 9 du 22 octobre 2023) est une période où les niveaux d'humidité du sol et de la végétation sont élevés. Cette humidité peut uniformiser les différences spectrales entre les savanes et les cultures, ce qui a compliqué le travail de l'algorithme lors de la classification. Troisièmement, les méthodes de cultures telles que l'agroforesterie ou les cultures mixtes, observées lors de la visite de terrain, peuvent créer des mosaïques de végétation qui ressemblent à des savanes arbustives et herbeuses. Cette méthode agricole locale qui a conduit des confusions lors de la sélection des aires d'entraînement.

3.2.2. Analyse de la dynamique d'occupation du sol entre 2002 et 2023

Les valeurs statistiques obtenues à l'issue des deux classifications ont montré que la zone d'étude était dominée par les savanes arborées. Ces résultats sont comparables à ceux enregistrés par Coulibaly (2016) dans le parc national des Deux Balés situés dans la province du Mouhoun (Région de la Boucle du Mouhoun). Selon cette source, la formation forestière de type savanicole est la plus représentée dans cette aire classée. Nos résultats corroborent aussi avec ceux de Tankoano (2015) et de Tankoano et al. (2016) qui ont trouvé comme nous, une dominance de la savane arborée par rapport à la savane arbustive dans la même zone.

Les résultats de l'image 2023, ont montré une augmentation de la superficie des savanes arborées, cela est due à une conversion des savanes arbustives et herbeuses en savanes arborées. Nous avons aussi observé une augmentation des forêts galeries. Il est connu que la croissance des forêts galeries est souvent liée aux zones où l'eau est disponible de manière constante. Par conséquent, l'augmentation des précipitations en 2023, atteignant 694 mm (Cf. **fig 3**), aurait pu améliorer le débit du cours d'eau visible sur l'image fausse couleur de 2023 (Cf. **fig 6b**) et empêcher son tarissement. Cela a contribué à l'augmentation de cette classe.

Les résultats de notre étude ont mis en évidence une forte superficie consacrée aux zones de culture en 2002, suivie d'une baisse de celle-ci en 2023. Ces observations corroborent celles de Zongo (2014), dont l'étude indiquait une diminution substantielle de la superficie des champs, passant de 6 964 ha en 1992 à 1 311 ha en 2012, soit une réduction de 79,04 %. La réduction des zones de cultures dans le parc en 2023 est peut-être liée à la mise en place du projet de gestion participative des forêts classées pour la REDD+) de 2013 à 2018 qui a porté ces fruits. Ce projet a bénéficié à plusieurs forêts classées du Burkina Faso, y compris le parc national des Deux Balés, et visait à réduire la déforestation au moyen du reboisement et la dégradation des forêts classées causé par les activités humaines (Banque africaine de développement, 2013). La réduction des zones de cultures dans le parc est peut-être aussi liée à l'épuisement des sols ou à la dégradation de leur qualité, ce qui a rendu certaines terres moins propices à l'agriculture. La suite de notre analyse a révélé une diminution de plus de 4 hectares des savanes arbustives et herbeuses, cela est dû à une conversion de cette classe vers la classe savanes arborées et forêts galeries, comme le montre la matrice de transition (Cf. **tableau 11 et 12**). Nous avons également observé une diminution de la superficie des sols nus en 2023. Cette diminution est probablement due aux conditions climatiques plus favorables, telle qu'une augmentation des précipitations comme le montre la figure 3 (Variations inter annuelles de la pluviométrie de 2000-2023 au niveau de la station Boromo. Source : infoclimat.fr), qui a encouragé la croissance de la végétation dans des zones auparavant dénudées. Une autre raison peut-être une réduction du bois de chauffage.

CONCLUSION GENERALE

La dégradation de la nature et le mauvais usage des sols sont des phénomènes qui touchent un nombre croissant de zones protégées dans le monde, entraînant d'importants problèmes environnementaux et socioéconomiques. Ainsi, l'accès à l'information devient cruciale face à des défis de plus en plus pressants. Les images satellitaires ont suscité de grandes attentes en ce qui concerne l'étude des dynamiques des paysages, apparaissant comme une source de connaissances pour l'interprétation de l'environnement. L'objectif principal de cette étude était de quantifier et d'analyser les changements dans la couverture végétale au fil du temps à l'aide d'images Landsat de 2002 à 2023, tout en examinant l'impact des précipitations sur la phénologie et d'autres facteurs pouvant influencer négativement la végétation du parc national des Deux Balés. Pour mener à bien ce travail, nous avons utilisé les images Landsat 7 et 9 (ETM+ & OLI 2 -TIRS 2) obtenues via la plateforme USGS, ainsi que des données de terrain récoltées par nous-mêmes et auprès du service des eaux et forêts de la commune de Boromo et les logiciels de traitement (ENVI, ARCGIS, QGIS).

Pour poursuivre notre étude, nous avons utilisé une méthode de classification supervisée basée sur le Maximum de vraisemblance, celle-ci a permis d'avoir deux matrices de confusions. Les précisions globales respectivement de 95,84% et de 99,43% pour l'image de 2002 et 2023 obtenues à partir des matrices ont su démontrer la capacité des images Landsat pour l'analyse des dynamiques écologiques du parc national des Deux Balés sur une période de deux décennies.

Afin de déterminer et d'analyser périodiquement les différents changements qui ont eu lieu dans les différentes classes d'occupation du sol, nous avons utilisé une approche combinant l'analyse cartographique et techniques quantitatives, telle que l'analyse des superficies et des matrices de transition, en complément de nos recherches bibliographiques. Les informations obtenues grâce à ces données nous ont aidées à comprendre les changements qui se sont produits dans la zone étudiée. Par exemple, les résultats obtenus ont montré que l'augmentation des savanes arborées en 2023 était attribuable à la conversion des savanes arbustives et herbeuse, ainsi que des zones de cultures. Un autre exemple concerne les sols nus, dont nous avons remarqué une

diminution, certainement due à l'augmentation de la pluviométrie et à la diminution de l'exploitation de bois de chauffage.

Malgré les résultats de nos classifications jugés satisfaisants, nous ne devons pas ignorer les limites rencontrées lors de cette étude. Les contraintes liées à la résolution spatiale de Landsat qui ont compliqué la lecture de l'image fausse couleur de 2002, ce malgré les améliorations apportées à la symbologie. Une autre limite de l'étude concerne les similitudes spectrales entre les classes savanicoles et les zones de cultures dans certaines régions du parc, ce qui a perturbé la photo-interprétation réalisée sur nos deux images. Toutes ces contraintes ont contribué aux erreurs de confusion rencontrées lors du traitement des images.

Cependant, malgré ces défis, cette étude ouvre de nouvelles perspectives en termes d'informations sur la dynamique d'occupation du sol dans le parc, comblant ainsi un manque d'études récentes dans cette zone déjà peu explorée par d'autres auteurs.

Dans ce contexte, il nous semble important d'explorer de nouvelles pistes de recherche en complément de celles déjà proposées, afin d'améliorer les analyses quantitatives que nous avons réalisées. Nous envisageons de mener une recherche basée sur des enquêtes auprès des populations résidant à proximité du parc, ainsi que des organismes locaux. Les résultats d'une telle recherche permettront d'avoir des informations actualisées sur le recensement démographique et les conditions socio-économiques des populations notamment sur les enquêtes agricoles et les activités écotouristiques. Cette approche nous permettra d'interpréter les résultats statistiques de l'image de 2023 des données actualisées et factuelles, plutôt que d'utiliser des données obsolètes comme nous l'avons fait dans notre discussion.

Dans l'ensemble, il est juste de dire qu'aucune méthode n'est universellement réussie pour traiter les dynamiques d'occupation du sol. Au contraire, il est souvent nécessaire de combiner différentes approches pour obtenir des résultats plus précis. Ainsi, pour améliorer notre étude, il conviendra de récolter de nouvelles informations sur le terrain, comme mentionné précédemment, et explorer d'autres approches de classification telles que la classification par les réseaux de neurones et l'analyse de la texture.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Assouline, S., & Mualem, Y. (1997). Modeling the dynamics of seal formation and its effect on infiltration as related to soil and rainfall characteristics. *Water Resources Research* 33, n° 7 : 1527-36. <https://doi.org/10.1029/96WR02674>.
- Banque africaine de développement. (2013). Projet : Gestion participative des forêts classées pour la REDD+ (PGFC/REDD+), Pays : Burkina Faso, Rapport d'évaluation du projet. Département OSAN.
- Berlin, S. (2002). L'écotourisme : protéger l'éléphant et promouvoir les cultures locales ? : la région de Boromo et l'aire protégée des Deux Balés (Burkina Faso). Mémoire de recherche DEA, Université d'Orléans, 137 p. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010072879>
- Cheikh, M. (2009). Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano-guinéennes du Sénégal. Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Mémoire Online Consulté le 13 octobre 2023 à l'adresses : <https://www.memoireonline.com/02/13/6912>
- Chikhaoui, M., Bonn, F., Merzouk, A., Lacaze, B., & Mejjati, A.M. (2007). Cartographie de la dégradation des sols à l'aide des approches de Spectral Angle Mapper et des indices spectraux en utilisant des données ASTER., *Revue Télédétection*, vol.7, n° 1-4, P. 343-357
- Colditz, R.R., Wehrmann, T., Bachmann, M., Steinnocher, K., Schmidt, M., et al. (2006). Influence of image fusion approaches on classification accuracy: a case study. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, n° 15, pp. 3311-35. <https://www.researchgate.net/publication/224997811>
- Coulibaly, S. (2016). Caractérisation de la végétation ligneuse de la zone de concentration des éléphants (*Loxodonta africana*) dans le parc national des Deux Balés. Université de Cocody, Abidjan, République de Côte d'Ivoire, 65 p.

- Courel, M-F., Cu, F., & Ibtissem, T. (1988). Suivi de l'évolution des pâturages du Sahel malien . Mappemonde 10, n° 2, 26-31. <https://doi.org/10.3406/mappe.1988.2439>
- Cozi, A. (2009). Cartographie du milieu biophysique du parc national des Deux Balés, provinces des Balé et de Tuy. Burkina Faso. Mémoire de master spécialisé en gestion des aires protégées. Institut international de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement, Ouagadougou, Burkina Faso, 77p. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=1729
- Côté, V. (2009). La prise en compte des populations locales dans la mise en place d'aires protégées : études de cas au Guatemala et au Maroc. Essai, Université de Sherbrooke. <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/8092>
- Demaze, T.M. (2006). Les configurations télédéteectées de la déforestation en Amazonie brésilienne. Hal Open Science. <https://shs.hal.science/halshs-00104150>
- Denis, A. (2021). Systèmes d'Information Géographique SIG. Présentation générale des SIG. ULIEGE, Belgique. <https://hdl.handle.net/2268/258452>
- Denis, A. (2021). Travaux Pratiques de Télédétection Spatiale II - Avec données et logiciels libres. ULIEGE, Belgique. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/240835>
- Estes, J.E., Haiic E.J., & Tinney, L.R . (1983). Fundamentals of image analysis: Analysis of visible and thermal infrared data, Manual of Remote Sensing, American Society of Photogrammetric Engineering ad Remote Sensing, Falis Church, Virginia. https://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Fundamentals%20of%20imag20
- Gansaonré, R.N., Benewindé, J-B. Z., & Yanogo, P.I. (2020). Dynamique du couvert végétal à la périphérie du Parc W du Burkina Faso. Belgeo . <https://doi.org/10.4000/belgeo.40786>
- Gueriniai, A. (2012). Analyse spatio-temporelle par télédétection de la région de Djelfa - Évolution de l'occupation du sol. Mémoire de master en sciences agronomiques, École nationale supérieure agronomique, El Harrach-Alger. <http://hdl.handle.net/123456789/245>

- Guinko, S. (1985). Contribution à l'étude de la végétation et de la flore du Burkina Faso (ex Haute-Volta). Origine botanique de quelques outils et objets artisanaux en bois. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*. <https://doi.org/10.3406/jatba.1985.3938>
- Hamadou, S. (1999). Apport de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique à la préparation d'un cadastre polyvalent: cas de la région de Niamey (Niger). Mémoire. Département de géographie et télédétection Faculté des lettres et sciences humaines Université de Sherbrooke. <http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/2127>
- Ilboudo, A.J. (2001). Plan de gestion du parc national des Deux Balé. Rapport d'études PAUCOF, 40 p.
- Issifou, A. (2009). Diagnostic des potentialités écologiques pour l'élaboration du plan d'aménagement et de gestion du parc national des deux Balé (Burkina Faso). Mémoire de fin d'étude, centre de documentation et de l'information . http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=4221
- Kiéma, S. (2007). Elevage extensif et conservation de la diversité biologique dans les aires protégées de l'Ouest burkinabé : arrêt sur leur histoire, épreuves de la gestion actuelle, état et dynamique de la végétation. Université d'Orléans, thèse de doctorat. <https://theses.fr/2007ORLE2031>
- Konan, Y. L. (2012). Utilisation de la télédétection pour le suivi de la dynamique des formations végétales dans le périmètre d'exploitation forestière 12530. SlideShare. <https://fr.slideshare.net/ericlandrykonan/memoirefinetudekonanyaoericlandryversionfinale>
- Kumar, M., Singh, R., & Singh, R. (2002). Effect of soil moisture stress on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 72(9), 542-544.
- Lambin, E. F., Rounsevell, M. D., & Geist, H. J. (2000). Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 82, n° 1, 321-31. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00235-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00235-8).

- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers ». *Biometrics* , 363-74.
<https://www.jstor.org/stable/2529786>
- Lauginie, F. (2007). Conservation de la nature et aires protégées en Côte d'Ivoire. UICN.
<https://portals.iucn.org/library/node/28522>.
- Marega, O. (2016). Changements socio-environnementaux et évolution des pratiques agropastorales en Afrique sahélienne : étude comparée entre le Ferlo (Sénégal), le Gourma (Mali) et le Fakara (Niger). Phdthesis, Université paris Diderot-Paris 7 ; UMR 8586 PRODIG-CNRS. <https://theses.hal.science/tel-01783159>.
- Moussa, D. (2016). Apport de la télédétection dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle du couvert végétal dans le vieux bassin cotonnier du mali (Koutiala) : cas de la commune de M'pessoba, Mémoire, Université de Liège, 75p.
- N'Guessan, A. E., Akpa, Y. L., N'g O, Y., & Kassi, J. (2019). Cartographie de la dynamique du couvert végétal de la forêt Classée d'Agbo 1 Cote d'Ivoire. *Agronomie Africaine* 31, n° 1 : 88-99. <https://www.ajol.info/index.php/aga/article/view/186719>
- Nouvellet, Y., Sawadogo, L. (1985). Recherches sur l'aménagement des formations naturelles dans la région du Centre-Ouest du Burkina Faso ». Document technique et de recherche. CIRAD. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=326916
- Olivier, P., Xavier, D., Josiane, Z. (2000). Classification d'images satellites hyperspectrales en zone rurale et périurbaine. [Rapport de recherche] RR-4008, INRIA, p. 64.
<https://inria.hal.science/inria-00072636>
- Ouedraogo, L., & Evette, A. (2015). Conservation et restauration du parc national des Deux Balé au Burkina Faso : une approche originale croisant les enjeux floristiques, faunistiques et sociaux. ECOVEG 11, Colloque en écologie des communautés végétales, p. 25. <https://hal.inrae.fr/hal-02601266>.
- Projet « 4298-Gestion de zones tampons d'aires protégées au Burkina Faso », 2016. Résultats de l'inventaire forestier du Parc des 2 Balé, de la zone tampon et propositions d'axes d'interventions sylvicoles, rapport provisoire, 50p. United Nations Development Programme. <https://erc.undp.org/evaluation/evaluations/detail/9464>

- Rapport sur les objectifs de développement durable, 2019. Nations Unies. Consulté le 9 octobre 2023 à l'adresse : <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/rapports-sur-les-objectifs-de-developpement-durable/>
- Rietkerk, M., Ketner, P., Burger, J., Hoorens, B., & Olf, H. (2000). Multiscale soil and vegetation patchiness along a gradient of herbivore impact in a semi-arid grazing system in West Africa. *Plant Ecology* 148:207–224. <https://doi.org/10.1023/A:1009828432690>
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). semantic scholar. <https://www.semanticscholar.org/paper/Monitoring-vegetation-systems-in-the-great-plains-Rouse-Haas/fb2f60fe0fe2874e5cbf927a2556d719c32eac29>
- Sarr, M. A. (2009). Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.22707>
- Sellers, P. J. (1985). Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1335-1372. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168508948283>
- Soumahila, S. (2018). Analyse de la dynamique d'occupation du sol à travers une classification d'images Landsat (1990-2007-2017) du bassin Mouhoun Supérieur au Burkina Faso. Mémoire. Institut International d'Ingénierie. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=3689
- Souley, Y. K. (2012). Évolution de l'occupation des sols dans l'Ouest du Niger : influence sur le cycle de l'eau. Phdthesis, Université de Grenoble. <https://theses.hal.science/tel-00864052>
- Stephène, N. (2002). Un modèle dynamique de simulation pour comprendre les processus de changement d'utilisation du sol dans la région soudano-sahélienne. Mémoires de la classe des Sciences naturelles et médicales . Académie royale des sciences d'Outre-mer. https://arsomweb.oma.be/en/mem_nat_298

- Tankoano, B., M, Hien, Dibi, Z., et al . (2016). Cartographie de la dynamique du couvert végétal du parc national des Deux Balé à l'Ouest du Burkina Faso . *International Journal of Innovation and Applied Studies* 16, n° 4 : 837. <https://www.researchgate.net/profile/Tankoano-Boalidioa/publication/305268670>
- Tankoano et al., (2017). Analysis of the spatial and temporal structure of landscape of Deux balé national park, Burkina Faso. *International Journal of Current Research*, Vol. 9, Issue, 06, pp.52280-52286. <https://www.researchgate.net/publication/318792048>
- Tankoano, B., Mipro, H., Zézouma, S., et al. (2015). Dynamique spatio-temporelle des savanes boisées de la forêt classée de Tiogo au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 9 (4): 1983-2000. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i4.23>.
- Turner, B, L., & Meyer, W. B. (1991). Land use and land cover in global environmental change: considerations for study ». *International Social Science Journal* 43 (130): 669-79. <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=0026273057&partnerID=8YFLogxK>
- UICN/PACO. (2009). Evaluation de l'efficacité de la gestion des aires protégées : parcs et réserves du Burkina Faso. <https://portals.iucn.org/library/node/9478>
- UICN. (1994). Lignes directrices pour les catégories de gestion des aires protégées. Commission des parcs nationaux et des aires protégées de l'Union mondiale pour la nature, avec l'assistance du Centre mondial de la surveillance continue de la conservation. 102 p. <https://www.iucn.org/fr/resources/publication/lignes-directrices-pour-lapplication-des-categories-de-gestion-aux-aires>
- Wafo, T. G., Huynh, F . (2009). Caractérisation et suivi de recul des ligneux dans les aires protégées du nord Cameroun analyse par télédétection spatiale dans la réserve de Kalfou. Journée d'animation scientifique (JAS09) de l'AUF Alger, Novembre 2009. 7 p.
- Wafo, T. G., Kenji, O., & Fotsing, J-M. (2008). Analyse spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le parc national de Waza entre 1986 et 2001 (nord Cameroun). *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, (189), pp. 40-50. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=21860358>

- Wang, L., Sousa W.P. & Gong, P. (2004). Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n° 24, pp. 5655-5668. https://www.acsu.buffalo.edu/~lewang/pdf/lewang_sample3.pdf
- Wispelaere, G.D., & Waksman, G. (1977). Contribution du traitement des images-satellite à la cartographie des pâturages sahéliens . *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* 30 (4): 407-24. <https://doi.org/10.19182/remvt.8080>
- Zongo, A. K. (2014). Contribution à la gestion durable du parc national des Deux Balé au Burkina Faso : état des lieux et perspectives. Mémoire pour l'obtention du Master spécialisé en qualité, hygiène, sécurité et environnement. Mémoire de fin d'étude, centre de documentation et de l'information. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2714

SITES VISITÉS

- <https://www.iucn.org/fr/notre-travail/aires-protegees-et-utilisation-des-terres>. Consulté le 9 octobre 2023.
- <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>. Consulté le 9 octobre 2023.
- <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/>). Consulté le 9 octobre 202