

Changements futurs de l'occupation des terres dans la région du *NANDO* : analyse de la trajectoire des unités d'occupation des terres à l'aide du modèle *Land Change Modeler*

Stéphane KOUDOUGOU^{1*},
Oumar KABORE²

Résumé

La conservation des formations naturelles, compte tenu de leur rôle dans le maintien du bien-être des populations à court et long terme, reste une préoccupation majeure au Burkina Faso, en particulier dans la région de Nando. L'objectif de cette recherche est d'établir une prédiction cartographique de la dynamique de l'utilisation des terres dans cette région afin d'orienter les décisions. La méthodologie repose sur la télédétection, l'analyse des variables explicatives et la simulation de la dynamique de l'occupation des sols par Land Change Modeler (LCM). Les données ont été analysées à partir des tendances en 1990 et en 2020, des gains et pertes de surface, de la dynamique des unités d'occupation du sol et des projections spatiales de 2020 à 2050. Les résultats montrent qu'entre 1990 et 2020, 11,81 % des savanes ont été transformées en champs. Le scénario pessimiste prévoit une augmentation des champs, passant de 47 % en 2020 à 55,80 % en 2050. Le scénario moyen montre une légère réduction des champs à 48,12 % en 2050. Dans le scénario optimiste, les savanes progresseraient de 52,4 % en 2020 à 55,1 % en 2050. Face à ces changements, il est nécessaire de renforcer la durabilité institutionnelle, écologique et communautaire afin de promouvoir de bonnes pratiques de gestion des ressources et d'améliorer les conditions de vie des populations du Nando du Burkina Faso.

Mots-clés : Burkina Faso, Nando, Changements des occupations des terres, Modélisation spatiale, Scénarios évolutifs.

Future Land Use Changes in the NANDO Region: Analysis of the Land Use Unit Trajectory Using the Land Change Modeler

¹ Université Joseph KI-ZERBO de Ouagadougou (Burkina Faso) / Laboratoire Dynamique des Espaces et Sociétés ;

² Centre National de Recherche Scientifique et Technologique/ Institut Nationale de l'Environnement et de Recherche Agricole (CNSRT/ INERA), membre associé du Laboratoire Dynamique des Espaces et Sociétés (LDES) de l'Université Joseph Ki-Zerbo

*Auteur correspondant : KOUDOUGOU Stéphane, Email : kdgstephane3@gmail.com, contact : +22676810018, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3074-1559>

Abstract

The conservation of natural formations, given their role in maintaining the well-being of populations in both the short and long term, remains a major concern in Burkina Faso, particularly in the Nando region. The objective of this research is to establish a cartographic prediction of land use dynamics in this region in order to support decision-making. The methodology is based on remote sensing, the analysis of explanatory variables, and the simulation of land use dynamics using the Land Change Modeler (LCM). The data were analyzed based on trends observed in 1990 and 2020, surface gains and losses, land use unit dynamics, and spatial projections from 2020 to 2050. The results show that between 1990 and 2020, 11.81% of savannas were converted into croplands. The pessimistic scenario predicts an increase in croplands, from 47% in 2020 to 55.80% in 2050. The medium scenario shows a slight reduction in croplands to 48.12% in 2050. In the optimistic scenario, savannas would increase from 52.4% in 2020 to 55.1% in 2050. In response to these changes, it is necessary to strengthen institutional, ecological, and community sustainability to promote good natural resource management practices and improve the living conditions of populations in the Nando of Burkina Faso.

Keywords: Burkina Faso, Nando, Evolutionary scenarios, Land use change, Spatial modeling.

Introduction

En Afrique tropicale, l'agriculture demeure la principale activité des populations (A. Garba et al. 2019, p. 6590). Au Burkina Faso, la population rurale occupe 15 145 043 habitants (soit 73,9 %) selon le Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH, 2019, p.11). Cette population agricole est soumise à la variabilité climatique, à la baisse de la qualité des sols et de la biodiversité (H. Dorsouma et M. Requier-desjardins, 2008, p.13). Face à ces aléas, couplés à la quête de satisfaction de besoins primaires tels que se nourrir et se soigner, ils contribuent à l'expansion des terres agricoles. L'impact constaté suite à cette expansion est la perte des espaces végétalisés au profit des terres agricoles rendant ainsi difficile la conservation de la nature. Ainsi, entre 1990 et 2022, le Burkina Faso a perdu 1838854 hectares de superficie forestière selon le secrétariat permanent pour la Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts dans les pays en développement (MEEEA 2022, p.16). L'expansion des superficies agricoles au détriment des formations naturelles constitue une dynamique dominante en Afrique de l'Ouest, où la conversion des terres contribue à une fragmentation accrue des habitats et à une perte de biodiversité (FAO, 2020, p. 12 ; IPBES, 2019, p. 18). Les résultats d'une étude menée dans la commune

de Bieha au Burkina Faso par I. Ouédraogo et al. (2010, p. 276) montrent un taux annuel de conversion des terres boisées en cultures de 0,96 % entre 1986 et 2006, ce qui traduit une dynamique similaire sur plusieurs décennies. Par ailleurs, S. Paré et al. (2008, p. 281) ont observé, dans le sud du Burkina Faso, une augmentation des surfaces cultivées de 7 à 14 % en moins de 20 ans, ce qui témoigne d'une pression agricole importante aux dépens des savanes et des formations boisées. B. J. B. Zoungrana et al. (2025, p.23) ont mis en évidence une expansion continue des terres agricoles entre 1992 et 2022, aux dépens des savanes et des forêts, confirmant ainsi le fait que la conversion des écosystèmes naturels en champs constitue une tendance majeure au Burkina Faso. Les besoins en espace cultivable s'accroîtront davantage au fil du temps, d'où la nécessité d'anticiper sur ce qui adviendra à travers l'analyse prospective. Les auteurs tels que A. Chakraborty et al. (2022, p.1) se sont penchés sur les modèles empiriques et les modèles de simulation de processus. Ils en ont conclu que les modèles empiriques sont basés sur des données observées, alors que les modèles de simulation de processus, en revanche, intègrent les interactions fondées sur les automates cellulaires. Les perspectives futures ont donc été orientées vers la simulation avec les modèles Markov-automate cellulaire (J. Konkobo et al. 2023, p.63386) et les modèles Land cover Modeler (A. Benkhelif et al., 2024, p.22). En effet, ces derniers mettent l'accent sur les méthodes de calibration et de validation, en intégrant plusieurs variables dépendantes et indépendantes au modèle, afin de mieux comprendre les interactions et interrelations entre les changements d'occupation des terres et les dynamiques sociales. Concernant la validation des modèles, les données climatiques, d'élévation, d'utilisation des terres, de population et les données socioéconomiques sont d'une importance capitale (Ks. Rajan et R. Shibasaki, 1997, p.815). Il est à noter que pour prédire, les scénarios offrent une approche flexible permettant d'envisager les changements de biodiversité dans un contexte de politique et de gestion, tout en se concentrant sur l'exploration des incertitudes et l'évaluation des résultats de politiques alternatives. Certes, la prédiction ne prophétise pas avec exactitude l'avenir, mais elle permettra selon Z. Koumou et al. (2018, p.314), M. J. Côté et al. (2001, p.263), la détermination des tendances de la dynamique d'occupation des terres contribuant à fournir un outil d'aide à la décision. La prospective cartographique du paysage dans la région du Nando est très peu abordée et demeure un aspect très important à prendre en compte dans une région qui est en proie à l'isolement des aménagements et des aires de conservation. Face à ce

constat, une question fondamentale émerge. Il s'agira de savoir comment l'occupation des terres dans la région du Nando évoluera à l'horizon 2050, sous l'effet conjugué de la pression agricole, de la variabilité climatique et des dynamiques démographiques, et quelles seront les conséquences potentielles sur les écosystèmes naturels. L'objectif vise à modéliser et à simuler la dynamique prospective de l'occupation des sols dans la région du Nando (Burkina Faso) à partir d'un modèle Land Cover Modeler, intégrant des variables biophysiques (sols, géomorphologie et topographie), socio-économiques (densité de population, distance aux axes routiers, aux cours d'eau, aux localités) et agraires (distance à la surface agricole exploitée).

1. Méthode et matériels

1.1. Présentation de la zone d'étude

La région du Nando est localisée dans la partie centre-ouest du Burkina Faso, entre les latitudes 11°15' et 12°45' nord et les longitudes 3°00' et 1°30' ouest. C'est un milieu qui abrite une diversité d'aires de conservation. Elle est composée de six (6) forêts classées et de réserves de faune. Les forêts aménagées excepté celle du *Nazinon* n'ont pas fait l'objet d'acte de classement ; elles sont donc soumises au régime commun relatif au droit d'exploitation. Cette zone constitue un réservoir de faunes sauvages, de flores et de stocks de bois pour le ravitaillement des grandes villes du Burkina Faso. Elle appartient au domaine phytogéographique nord-soudanien.

Selon l'analyse de données climatiques de la Nasa (NASA//power data) le nombre de mois humides est passé de 6 mois dans les décennies 1991-2000 à 4 mois (juin, juillet, août, septembre) dans la décennie 2011 à 2020. Les vents ont une vitesse oscillante entre 2,3 m/s et 2,8 m/s et sont globalement orientés Nord-Est-Est, Nord-Est, Sud, Sud-Sud-Est, Sud-Sud-Ouest. La variation interannuelle des moyennes de température est généralement comprise entre 27 et 28 degrés Celsius. Le pic de la série a été atteint en 2020. La maximale atteignait 44,41 degrés. C'est donc une tendance qui illustre la hausse de température et témoigne du ressenti climatique ces dernières décennies dans la zone d'étude.

1.2. Données et matériels utilisés

L'approche méthodologique repose sur la télédétection, l'analyse des variables explicatives et la simulation de la dynamique de l'occupation des sols par Land Change Modeler (LCM).

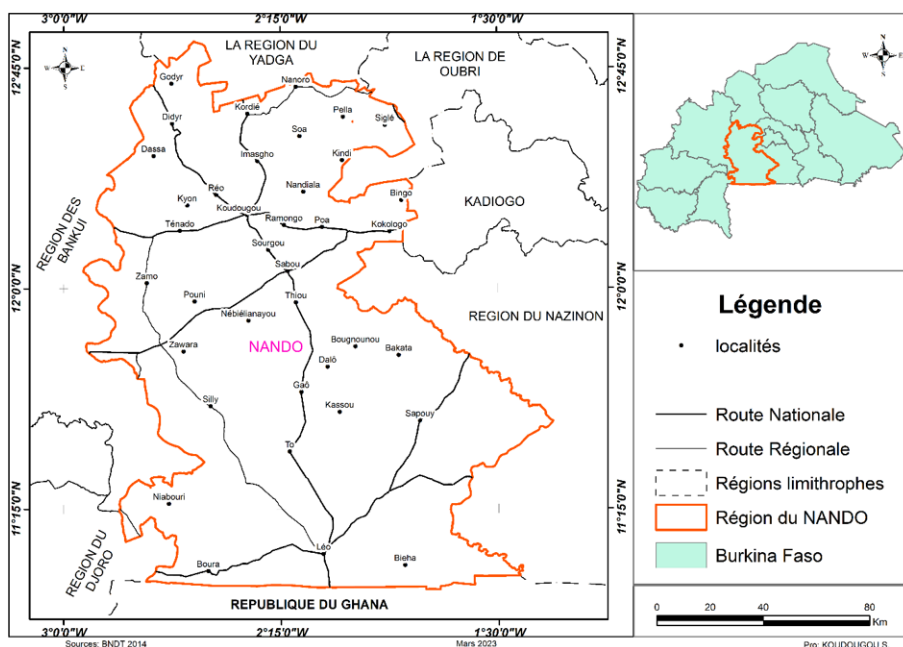


Figure 1 : Situation de la région du Nando

Les images satellitaires Landsat 7 et 8 des années 1990, 2000, 2010 et 2020 ont été utilisées. Ces images sont de la période de décembre.

Cette période a été choisie pour mieux discriminer les unités. Ces données sont issues des scènes Landsat 195/051, 195/052, 196/051 et 196/052, acquises par les capteurs ETM, ETM+ et OLI/TIRS, qui offrent une résolution spatiale adaptée à l'analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres. Ces données ont été prétraitées et classifiées selon l'algorithme de classification maximum *likelihood* (maximum de vraisemblance). La classification a été validée par les indices de Kappa, la visualisation en 3D de la séparabilité des classes et des sorties de terrain. L'exactitude globale de classification est de 73,65 % pour l'année 2000, 87,30 % pour l'année 2010 et 70,05 % pour l'année 2020. Le traitement a été effectué avec le logiciel Envi. Les données générées ont été cartographiées avec le logiciel QGIS 3.34. Les cartes de la dynamique de l'occupation des terres entre 2000, 2010 et 2020 ont été produites. Par la suite, ces résultats ont été importés sur Idrisi Selva pour la modélisation cartographique et prospective de la trajectoire du couvert végétal.

1.3. Processus de modélisation

1.3.1. Préparation des données du modèle

Les données vectorielles destinées au modèle ont été rastérisées en format *Img sous *ERDAS IMAGINE*, à la même résolution spatiale (30 m x 30 m), dans la même emprise spatiale, la même étendue de *Nodata* et dans un même système de projection (*UTM WGS84 Zone 30 Nord*). Cela a permis d'obtenir une cohérence de l'étendue spatiale de toutes les variables, de superposer de façon convenable l'ensemble des rasters afin d'éviter les débordements de pixels. Les données importées sur Idrisi ont été reformatées. Des valeurs continues et catégorielles ont été affectées aux variables en fonction de leur nature. Les valeurs des *NoDatas* et les légendes des données catégorielles des couches raster d'entrée représentant les variables dépendantes ont été formatées de sorte à les uniformiser pour toutes les années. Les différentes transitions entre les variables ont aussi été soumises à des contraintes. En effet, la valeur 0 est affectée aux espaces à contrainte absolue ; 1 lorsqu'il y a une indifférence ou l'absence d'influence sur la transition ; 0 à 1 pour une aire non incitative ; >1 pour une aire incitative.

1.3.2. Paramétrage du *land change modeler*

Les données d'entrée représentées par les unités d'occupation des terres (UOT) de 2000 et 2010, les cartes matricielles des altitudes et des routes, ont été intégrées dans le module *change analysis* du modèle *LCM*. Les différentes transitions possibles ont été calculées et représentées dans une couche raster. Les sous-modèles de transitions ont été ensuite regroupés et tenant compte des transitions les plus pertinentes entre 2000 et 2010.

1.3.3. Évaluation des variables et test de sous-modèle

Le test de sélection des variables a porté sur les variables catégorielles et les variables de distance (continues). Chaque classe d'occupation des terres a été évaluée en fonction de chaque variable explicative par le test de V de Gramer's. Selon J. Cohen (1988, p.222), les valeurs de Cramer's V autour de 0,10 indiquent une faible association, celles proches de 0,30 une association moyenne, tandis que les valeurs $\geq 0,50$ traduisent une forte association. Dans plusieurs études appliquées, des valeurs proches de 0,40 sont déjà considérées comme de bonnes associations. Certains indicateurs et variables peuvent être écartés si la valeur de V Cramer's est faible pour toutes les UOT. Cela a été rendu possible par la méthode de réseaux de neurones artificiels afin de

prédire la dynamique future des unités d'occupation des terres. Pour évaluer et valider le modèle, l'approche bayésienne a été utilisée. Cette approche a permis de mettre en corrélation l'inférence de chaque variable et l'interprétation a porté sur les fausses et vraies imprécisions.

1.3.4. Validation du modèle

Le module *Land prediction* a permis d'élaborer la matrice de transition entre 2000 et 2020 et de produire la carte prédite pour 2020 en vue de la validation du modèle. La méthode de validation repose sur l'évaluation des prévisions actuelles. La robustesse du modèle a été mesurée avec l'AUC (*Area Under the Curve*) comme indicateur métrique principal pour comparer l'efficacité des modèles. L'interprétation courante stipule que si $AUC \geq 0,7$, alors le modèle est acceptable ; si AUC est compris entre 0,8 et 0,9, alors le modèle est bon ; et si l'AUC est $> 0,9$, alors le modèle est excellent.

1.3.5. Projection

La modélisation des occurrences de changement observées entre 2000 et 2010 a été réalisée. Les variables explicatives et les transitions ont été définies. Les calculs des probabilités des changements et des facteurs de conversion ont été effectués et les allocations spatiales des probabilités de transition ont été générées. Les cartes d'occupation des terres simulées à l'horizon 2020 et 2050 ont été produites.

3. Résultats

3.1 Rappel sur les processus de changement des UOT de 1990 à 2020

Le tableau I présente les principales mutations observées dans l'espace d'étude. Les changements régressifs les plus importants de 1990 à 2020 sont ceux des classes de savanes. Les gains de superficie sont plus prononcés dans les classes de sols nus (4,91 %) et de champs (7,73 %). Ces gains de superficie se sont opérés suite à la perte de la superficie des savanes. En effet, ces derniers ont perdu entre 1990 et 2020 12,76 % de leur superficie.

Ces mutations sont regroupées en trois catégories dans le tableau II à travers les plus grandes contributions au changement.

Tableau I : Gain, perte et changement par classe d'occupation des terres

Classes	1990-2020		
	Gain (%)	Perte (%)	Changement net (%)
Habitat	0,85	0,00	0,85
Savanes	3,20	-15,96	-12,76
Champs	14,80	-7,06	7,73
Sols nus	4,92	0,00	4,91
Forêt galerie	0,00	-0,82	-0,82
Surface en eau	0,15	-0,01	0,14

Source : Traitement des images Landsat sur Idrisi Selva, 2023

Les plus grandes contributions sont les changements des savanes en champs (11,81 %), la conversion des savanes en sols nus, érodés et dénudés (1,27 %) et la conversion des champs en sols nus, érodés et dénudés (3,60 %).

Tableau II : contribution des plus grands changements à la mutation des espaces entre 1990 et 2020

Type de changement	Proportion (%)
Contribution des savanes au gain de superficie par classes	
Savanes vers habitat	0,13
Savanes vers champs	11,81
Savanes vers sols nus, dénudés, érodés	1,27
Savanes vers surface en eau	0,04
Contribution des forêts-galeries au gain de superficie par classes	
Forêt galerie vers savanes	0,49
Forêt galerie vers champs	0,2
Forêt vers sols nus, dénudés, érodés	0,04
Forêt galerie vers surface en eau	0,04
Contribution des champs au gain de superficie par classes	
Champs vers habitat	0,71
Champs vers sols nus, dénudés, érodés	3,60
Champs vers surface en eau	0,06

Source : Traitement des images Landsat sur Idrisi Selva, 2023

Tableau III : contribution des plus petits changements à la mutation des espaces entre 1990 et 2020

Type de changement	Proportion (%)
Contribution des sols nus au gain de superficie par classes	
Sols nus vers habitat	0,00
Sols nus vers champs	3.60
Sols nus vers forêt galerie	0.04
Sols nus vers surface en eau	00
Contribution des habitats au gain de superficie par classes	
Habitat vers savanes	0,13
Habitat vers champs	0.71
Habitat vers sols nus, dénudés, érodés	0,00
Habitat vers surface en eau	0.00
Contribution des surfaces en eau au gain de superficie par classes	
Surface en eau vers habitat	0,00
Surface en eau vers sols nus, dénudés, érodés	0,00
Surface en eau vers champs	0,06
Surface en eau vers savanes	0,04

Source : Traitement des images Landsat sur Idrisi Selva, 2023

La description des tableaux I, II et III a permis de comprendre les transformations et de considérer les plus grandes d'entre elles dans la perspective de l'horizon 2050.

3.2 Élaboration des scénarios de prédiction de la dynamique

3.2.1 Le scénario pessimiste : déforestations et baisse de la qualité des terres agricoles

Le scénario pessimiste considérera que les politiques et les stratégies de conservation du couvert végétal, ainsi que la participation d'acteurs tels que les ONG et les partenaires techniques et financiers, sont insuffisantes, et que la dynamique de la population va galoper jusqu'à 2050. En plus, les mauvaises pratiques agricoles et la mauvaise utilisation des terres, le non-respect des techniques de coupe ou d'abattage, d'exploitation du bois, ainsi que le manque de contrôle des feux de végétation et de surveillance des forêts, dus à la crise sécuritaire que connaît le Burkina Faso, vont entraîner l'extension des surfaces nues et accentuer la conquête d'espaces nouveaux à des fins agricoles.

Par conséquent, la dynamique de conversion des savanes en champs se poursuivra et on assistera à la conversion des habitats du couvert végétal ligneux en terres agricoles, en voies de communication et en zones résidentielles. Il y aura donc une surexploitation des forêts, des aires de conservation et des forêts résiduelles. L'hypothèse qui en résultera prévoit une forte extension des espaces agricoles, la destruction des souches d'arbres et la régression des savanes.

3.2.2 Le scénario tendanciel : évolution normale des processus de déforestation

Le scénario moyen illustre la cadence d'évolution des paysages entre 2000 et 2010. Il se fonde sur des demandes de satisfaction des besoins socioéconomiques primaires des populations et sur les mauvaises méthodes d'exploitation des ressources forestières. On assistera, dans cette condition, à des mutations des savanes en champs et, dans la même dynamique, à une conversion de champs en savanes. En effet, l'inaccessibilité, par endroits, de certaines forêts, et la mise en jachère forcée des champs, suite au contexte sécuritaire que vit le pays, conduiront à une situation presque équilibrée dans la zone d'étude. Les deux sous-modèles antagonistes reflètent la mutation du paysage en cours dans la zone d'étude.

3.2.3 Le scénario optimiste : reconstitution et récupération du couvert végétal et des terres dégradées

Le scénario optimiste est l'inversion du scénario pessimiste. Le défi sécuritaire s'est nettement amélioré, les activités des politiques, des communautés et des différents acteurs de la conservation reprennent. Ces acteurs devront adopter des stratégies et des politiques nationales fortes et conjointes pour la valorisation de la biodiversité, la gestion durable des forêts et la conservation des zones classées et protégées, tout en appliquant les feux précoces de végétation et en veillant à renforcer l'effectif des personnels chargés de la surveillance des forêts. Par ailleurs, des formations sur les techniques de conservation des eaux et de gestion de la fertilité des sols (Zaï, demi-lunes, corons pierreux, ou association Zaï-demi-lune-cordon pierreuse), les techniques de récupération des terres dégradées, les techniques de régénération naturelle assistée (RNA), la sensibilisation des populations riveraines sur le bien-fondé des forêts pour eux et pour les générations futures et la participation des populations aux instances des décisions de gestion des forêts, vont fortement contribuer à la réduction de la superficie des zones nues, dénudées et dégradées, à la récupération des espaces

végétalisés et à améliorer la fertilité des espaces agricoles. Ainsi, les savanes se maintiendront, et les espaces de conservation du couvert végétal freineront la progression des espaces agricoles et amélioreront les habitats de biodiversité dans la région.

3.2.4 Validation du modèle projeté

Les erreurs liées à la modélisation couvrent une superficie estimée de 242759,723 ha, soit 11,19 % de la superficie de l’aire d’étude. Ces confusions sont sans doute liées au sous-modèle considéré lors de la prédiction en 2020. En effet, 53,44 % de la superficie des sols nus a été considérée comme des champs et 22,15 % des champs ont été ajoutés à la superficie des savanes (Tableau IV). Dans le revers, les champs ont également gagné 11,75 % de la superficie des savanes. Les superficies des champs ont progressé de 4,28 %, celle des sols a régressé de 5,22 %. En ce qui concerne les savanes, leurs superficies ont augmenté de 1,08 %. De façon générale les superficies prédites sont sous-évaluées.

Tableau IV : matrice des erreurs de prédiction cartographique

Classes	Surface en eau	Forêt-galerie	Sols nus	Champs	Savane	Habitat	Total général
Surface en eau	-	0,01	0,07	0,04	0,04	0,02	0,18
Forêt-galerie	0,00	-	0,00	0,01	0,09	-	0,10
Sols nus	0,01	0,00	-	5,93	2,77	0,17	8,88
Champs	0,03	0,01	53,44	-	11,75	1,10	66,33
Savane	0,03	0,07	1,91	22,15	-	0,21	24,37
Habitat	0,00	-	0,08	0,06	0,01	-	0,15
Total général	0,07	0,09	55,50	28,19	14,66	1,49	100,00

Source : Modélisation cartographique sous Idrissi Selva, 2023



Mais la valeur de l'AUC est de 0,8145. Par conséquent, le modèle est bon et peut être utilisé pour prédire l’évolution future des unités d’occupation des terres. Ce modèle de validation a été adopté par plusieurs auteurs en Afrique tropicale et ailleurs (I. Atef et al., 2023, p. 774 ; A. V. Samboua, 2023, p. 52).

Tableau V : comparaison des superficies des différentes UOT

Classes	Superficie (ha) prédite	Superficie (%)	Superficie (ha) observé	Superficie (%)	Erreurs Prédites
Surface en eau	6,583.72	0.30	6,367.28	0.29	0.01
Forêt galerie	5,450.30	0.25	5,448.64	0.25	0.00
Sols nus	108,773.24	5.01	221,951.43	10.23	(5.22)
Champs	1,019,694.70	47.00	926,701.52	42.72	4.28
Savanes	995,734.10	45.90	972,176.99	44.82	1.08
Habitat	33,117.93	1.53	36,373.60	1.68	(0.15)

Source : Modélisation cartographique sous Idrissi Selva,2023

3.3 Variables explicatives de la dynamique

Deux catégories de variables expliquent les mutations du paysage dans la région du Nando. Il s'agit des variables dépendantes et des variables indépendantes.

3.3.1 Variable dépendante

Les variables dépendantes ont été utilisées pour le paramétrage et la validation du modèle. Ce sont les unités d'occupation des terres de 2000, 2010 et 2020. En plus de ceux-ci, la variable dépendante catégorielle des routes et celle des altitudes ont également été intégrées au paramétrage du modèle. L'analyse de la variable altitude met en évidence une relation statistiquement significative entre les conditions topographiques et la distribution spatiale des différentes classes d'occupation du sol. Les p-values très faibles ($p < 0,001$) sont obtenus pour l'ensemble des classes, à l'exception des surfaces en eau, et indiquent que l'altitude constitue un facteur explicatif pertinent des dynamiques spatiales observées dans la zone d'étude. Les résultats du coefficient V de Cramer's montrent que l'altitude influence particulièrement la répartition des sols nus ($V = 0,1247$) et des habitats ($V = 0,1128$). Cette relation suggère que certaines unités topographiques peuvent favoriser des processus de dégradation des sols ou d'occupation anthropique, conduisant à l'apparition de surfaces dénudées ou à l'implantation de zones d'habitat. De telles dynamiques peuvent être liées à des conditions topographiques spécifiques qui facilitent l'accessibilité, l'exploitation des ressources ou l'installation humaine.

3.3.2 Variable indépendante

Les variables indépendantes sont regroupées en deux catégories :

3.3.2.1 Variable catégorielle

Les variables catégorielles retenues à l’issue du test V de Cramer et de l’analyse de corrélation entre les variables dépendantes et les unités d’occupation des terres sont représentées dans la figure 2 ci-dessous. Il s’agit des variables de sols (figure 2A) et de la géomorphologie (figure 2B). La géomorphologie contribue également à expliquer la distribution spatiale des classes d’occupation du sol. Les résultats montrent que cette variable influence particulièrement la répartition des habitats ($V = 0,1614$) et des savanes ($V = 0,1277$). Cela suggère que les caractéristiques morphologiques du terrain, telles que les formes de relief et les conditions topographiques, jouent un rôle structurant dans l’implantation humaine et dans l’utilisation des terres.

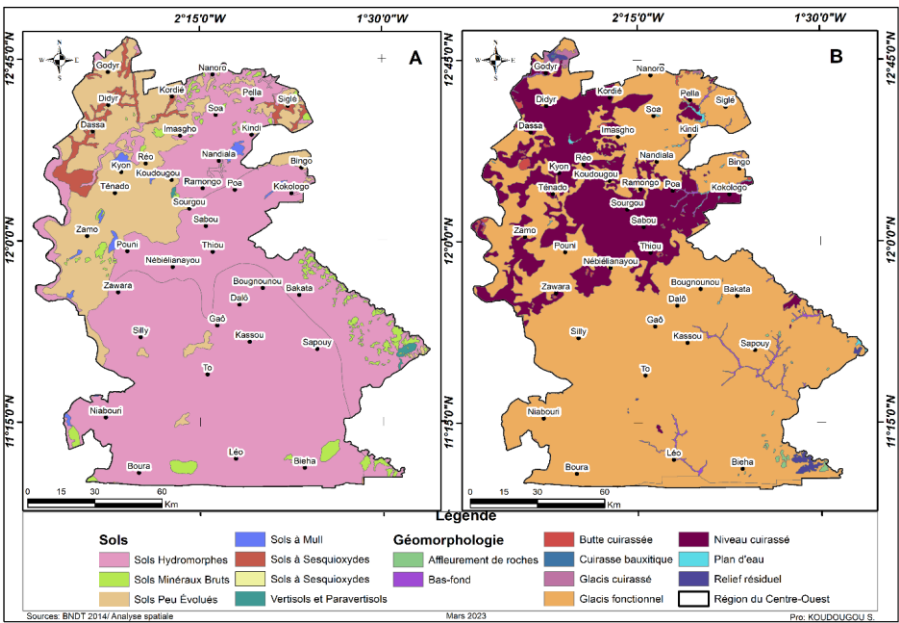


Figure 2 : sols et géomorphologies

Les conditions topographiques peuvent en effet déterminer la fertilité des sols, les régimes hydriques ou encore l’aptitude des terres à l’exploitation agricole.

3.3.2.2. Variable de distance

3.3.2.2.1. Distance aux routes et aux cours d’eau

Les tests effectués sous Idrisi Selva montrent que l'ensemble des variables analysées présente des relations statistiquement significatives avec les différentes classes, comme l'indiquent les p-values très faibles ($p < 0,001$). Ces résultats confirment la pertinence des variables retenues pour expliquer les transformations spatiales observées dans le paysage. Les résultats mettent en évidence l'importance des facteurs d'accessibilité, notamment la distance au réseau routier (figure 3A), dans la dynamique d'évolution du paysage. Les valeurs du coefficient de V de Cramer indiquent une relation relativement plus marquée avec les classes de savanes ($V = 0,1432$) et d'habitats ($V = 0,1744$). Cette tendance suggère que la proximité des infrastructures routières (figure 3A) favorise l'occupation et l'exploitation des espaces naturels, notamment par l'extension des zones habitées et des activités anthropiques. Des relations significatives sont également observées pour les sols nus ($V = 0,573$) et les champs ($V = 0,467$), traduisant l'influence indirecte de l'accessibilité sur les processus de dégradation et de mise en valeur agricole des terres. L'analyse de la cartographie de l'impact des voies de circulation sur les formations végétales indique que les unités végétales situées à 40 961,55 m des voiries présentent une vulnérabilité moindre que celles projetées à 2 570,13 m. En effet, les unités de végétation comprises dans la bande de 0 à 14 778,27 m sont fortement exposées à la dégradation et à la destruction liées aux projets d'infrastructures routières et d'urbanisation. À partir de la bande située entre 14 778,28 m et 40 961,55 m, le couvert végétal subit une pression anthropique décroissante et est moins soumis aux autres formes d'exploitation des savanes susceptibles de compromettre leur intégrité et leur conservation.

La distance aux cours d'eau (figure 3B) constitue également un facteur explicatif des mutations paysagères. Les résultats montrent une association relativement plus forte avec les sols nus ($V = 0,1322$), ce qui peut être interprété comme le résultat de processus de dégradation ou de défrichement des formations végétales riveraines. Les relations observées avec les savanes ($V = 0,675$) et les champs ($V = 0,627$) suggèrent par ailleurs que les zones proches des cours d'eau sont soumises à des pressions anthropiques liées aux activités agricoles et aux usages domestiques des ressources hydriques. L'influence des cours d'eau (figure 3B) est la plus marquée sur les savanes situées à proximité (environ 954,35 m) des berges. Cette vulnérabilité décroît progressivement avec l'éloignement des formations végétales par rapport aux rives. Les secteurs où les formations végétales sont le moins

sous l'emprise des cours d'eau se situent à partir d'une distance minimale de 16 244,00 m des berges. Les formations localisées dans ces zones bénéficient d'une meilleure protection contre les risques de dégradation liés au ruissellement, aux crues et à l'altération des berges.

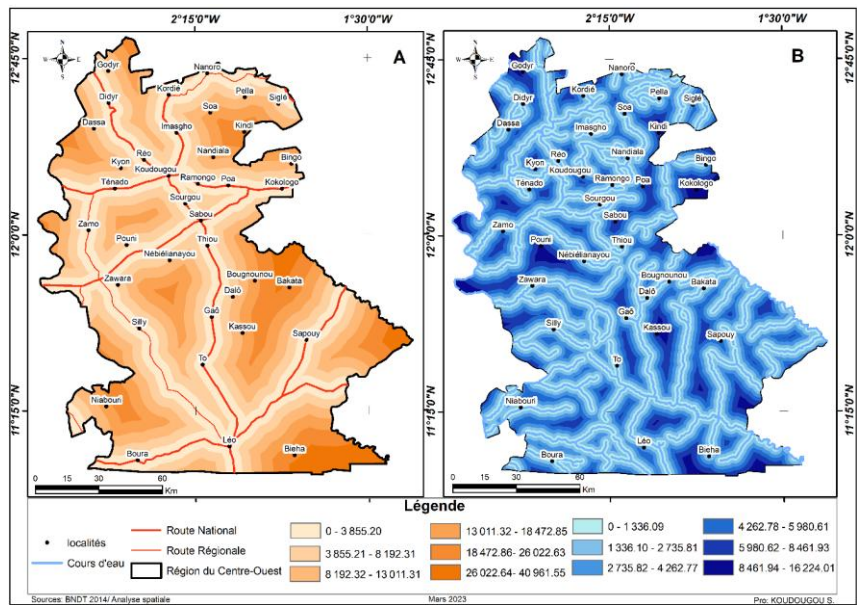


Figure 3 : distance aux routes et aux cours d'eau

3.3.2.2.2. Distance aux localités et aux champs emblavés

La distance aux localités (figure 4A) apparaît comme l'un des déterminants majeurs des transformations de l'occupation du sol. Les valeurs relativement élevées du coefficient de V de Cramer pour les habitats ($V = 0,3015$), les savanes ($V = 0,2248$) et les champs ($V = 0,1628$) mettent en évidence le rôle structurant des pôles d'habitation dans l'organisation spatiale du territoire. La proximité des localités favorise l'expansion des surfaces bâties et agricoles, entraînant une conversion progressive des formations naturelles, notamment des savanes, en espaces anthropisés. La figure 4A illustre que les savanes les moins soumises à l'influence spatiale des localités se concentrent dans les bandes de distance entre 17 900,23 m et 50 160,01 m. En effet, cette influence est très marquée et affecte de manière significative les formations végétales situées dans un rayon de 1 m à 17 900,22 m. Les aménagements forestiers localisés au centre de l'aire d'étude apparaissent comme les plus exposés à cette pression spatiale.

L'analyse de la distance aux champs (figure 4B) révèle des relations particulièrement fortes avec certaines classes d'occupation du sol. Les coefficients très élevés observés pour les savanes ($V = 0,9650$) et les habitats ($V = 0,8502$) traduisent l'influence déterminante de l'expansion agricole dans la transformation des paysages. Cette forte corrélation indique que la dynamique d'extension des terres cultivées constitue l'un des principaux moteurs de conversion des savanes et d'organisation spatiale des habitats. Cette influence spatiale des champs sur les formations végétales s'étend sur un intervalle de distance compris entre 1 et 7 207,05 m. La pression est plus marquée dans les zones proches des espaces agricoles et diminue progressivement à mesure que l'on s'approche des espaces de conservation et des zones d'habitation. Ainsi, les formations végétales situées au-delà d'environ 1 243,56 m des champs deviennent progressivement moins vulnérables à l'expansion agricole. Dans l'ensemble, l'analyse met en évidence la prédominance des facteurs anthropiques, notamment l'accessibilité, la concentration des zones habitées et agricoles, dans l'explication des dynamiques d'occupation du sol.

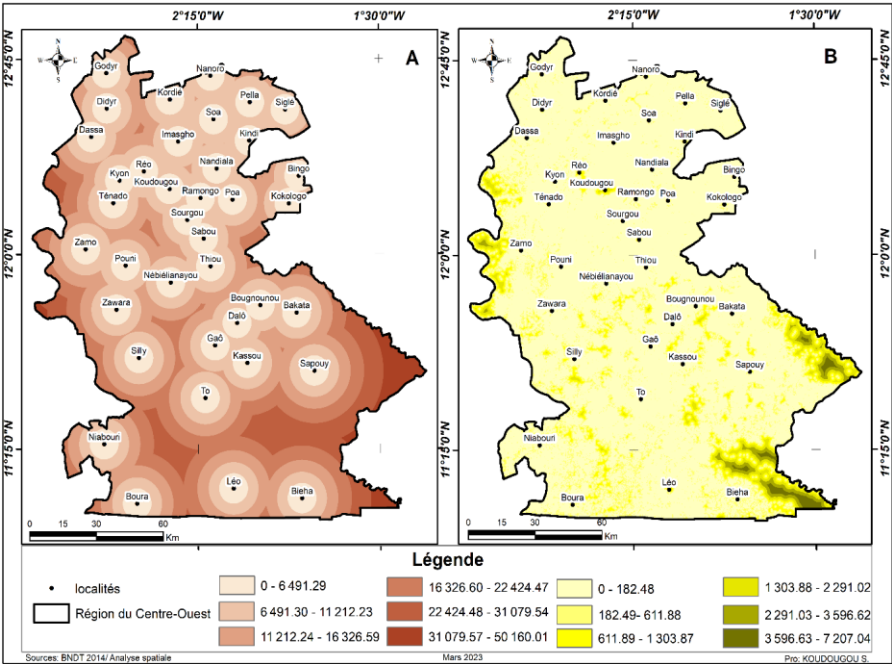


Figure 4: distance aux champs

3.4 Analyse prédictive de la dynamique d'occupation des terres

3.4.1 Analyse prospective : Scénario pessimiste

La figure 5 illustre deux tendances majeures marquées par la croissance des superficies des champs et la décroissance de la superficie des savanes. En effet, la prédiction en se basant sur le scénario pessimiste montre que la superficie des champs évoluera progressivement de 47% à 55,80 % en 2050. Il s'ensuivra une régression de la superficie des savanes qui, elles, passeront de 45,90 % en 2020 à 35 % à l'horizon 2050.

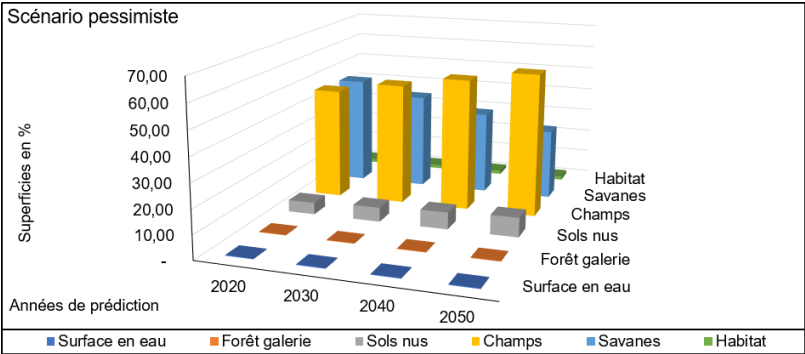


Figure 5 : Évolution prédite de la superficie des UOT

Source : Analyse statistique de la modélisation cartographique sur Idrisi Selva

Dans le présent scénario, la trajectoire des mutations du paysage et de sa structure sera marquée par des usures (attrition), la création de nouveaux champs et la dissection du paysage. Les attritions concerneront les classes de forêt galerie. Les agrégations, quant à elles, affecteront les sols nus. En effet, cette mutation affectera aussi les savanes qui perdront 11,80 % et contribueront avec la forêt galerie à la création de 1162848,46 ha de nouveaux champs. Cela pourrait résulter de la mauvaise exploitation des ressources naturelles due à la démographie, à la mobilité des populations et au comportement des personnes déplacées internes.

3.4.2 Analyse prospective : scénario tendanciel

Dans le scénario tendanciel, on assistera à une reconversion des champs en savanes. La figure 6 illustre une double tendance. La première tendance montre une régression des cultures, tandis que la seconde illustre une progression des savanes, qui tendent à se stabiliser en 2050.

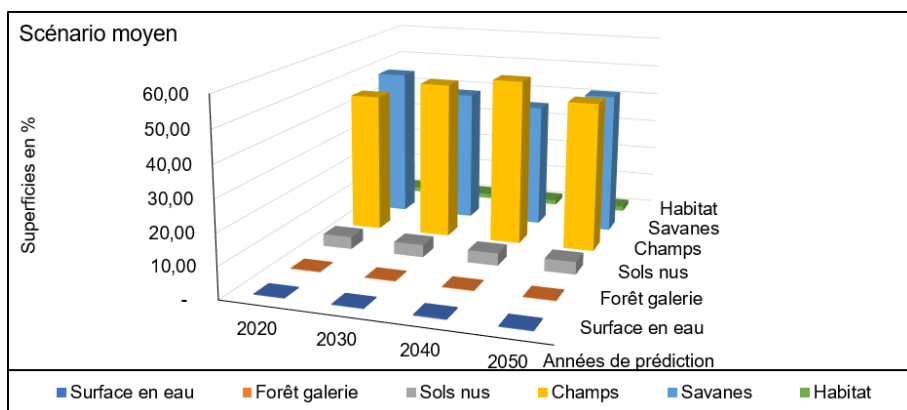


Figure 6: évolution prédite des superficies des unité d’occupation des terres
Source : Analyse statistique de la modélisation cartographique sur Idrisi Selva

Les statistiques issues de la figure 6 montrent que le changement net que subiront les savanes sera un gain de +6,05 %. Les champs dans leur évolution régressive perdront -2,17 % de leur superficie. Il en sera de même pour les sols nus, qui eux subiront une régression de -3,76 %. C’est donc une dynamique spatio-temporelle qui sera marquée par des attritions des sols nus, l’agglomération des savanes et la dissection des champs. Les champs contribueront à l’évolution de la superficie des savanes à hauteur de 5,59 % et des sols nus à 0,38 %. Cependant les récupérations des sols nus, dénudés et érodés permettront aussi l’évolution des champs à 3,38 %.

3.4.3 Analyse prospective : selon le scénario optimiste

Dans ce scénario, les statistiques de la figure 7 illustrent que dans la mutation du paysage, on assistera à une progression des savanes. La superficie occupée par celle-ci passera de 52,4 % en 2020 à 55,1 % en 2050. Cet accroissement de la superficie des savanes se fera suite à la récupération des superficies des savanes dégradées au profit des champs. La régression des champs (41,6 % en 2020 à 38,9 % en 2050) sera aussi le résultat des efforts au niveau gouvernemental pour le renforcement des effectifs du personnel pour la sécurisation (y compris la sécurisation foncière) et la libération des forêts sous l’emprise terroriste.

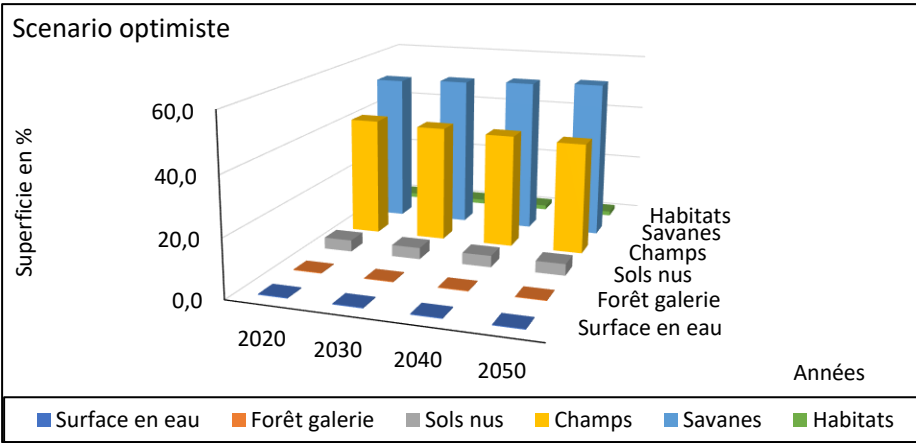


Figure 7: dynamique prédictive des occupations des terres 2020 et 2050
Source : Analyse statistique de la modélisation cartographique sur Idrisi Selva

L'observation de la figure 7 montre une tendance de gain équitable entre les savanes et les champs. La superficie de 6,38 % perdue par les champs a été compensée par la régénération des savanes. En effet, la contribution des champs à l'évolution des savanes est estimée à 4,96 %. Le processus de changement sera marqué par des agrégations (1194698,29 ha), des attritions (12593,12 ha) et des dissections (848025,68 ha).

3.4.4 Cartographie de la dynamique prospective dans la région du Nando

L'observation cartographique (figure 8) de la modélisation prospective de l'occupation du sol dans la région du Nando met en évidence des évolutions contrastées selon les scénarios, optimistes, tendanciels et pessimistes. Les savanes et les champs demeurent les unités paysagères dominantes, tandis que les habitats ruraux et urbains connaissent une progression variable selon l'intensité de la pression anthropique. Le scénario optimiste traduit une meilleure conservation des savanes et forêts galeries, alors que le scénario tendanciel reflète la poursuite des dynamiques actuelles d'occupation du sol. À l'inverse, le scénario pessimiste montre une expansion plus marquée des espaces agricoles et des zones d'habitation, accompagnée d'une fragmentation accrue des formations végétales naturelles. Ces résultats soulignent l'importance

des politiques de gestion durable et de conservation pour limiter la dégradation des écosystèmes dans la région du Nando.

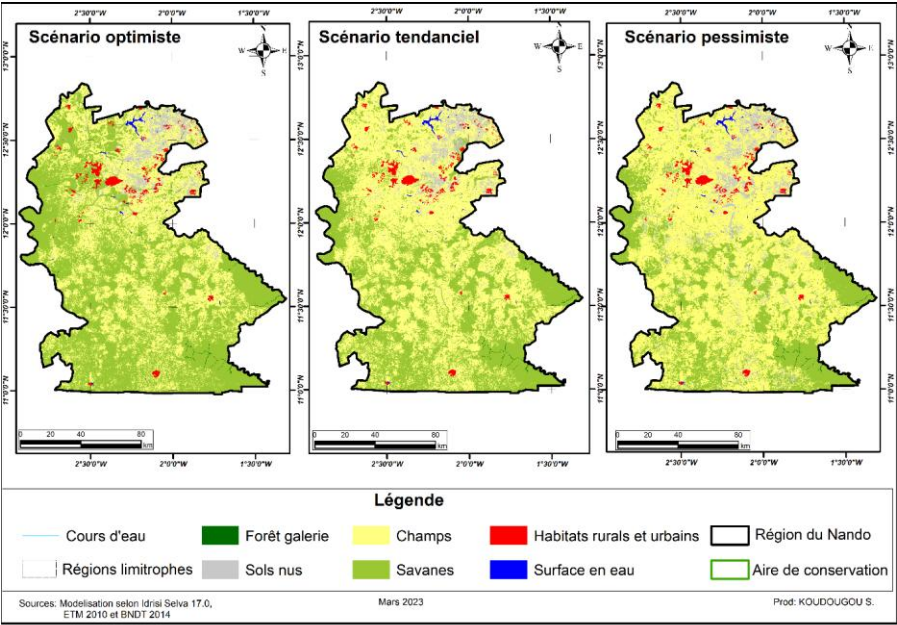


Figure 8 : Scénarios prospectifs de l’occupation du sol dans la région du Nando à l’horizon 2050

4 Discussion

4.1 Dynamique générale de régression des formations naturelles

La dynamique générale observée dans l’évolution des formations végétales révèle une régression progressive des espaces naturels, confirmant les résultats obtenus par plusieurs auteurs en Afrique de l’Ouest (R. N. Gansoaré, 2018, p.110 ; P. A. Ouoba, 2013, p.184). Cette tendance traduit une pression anthropique croissante sur les ressources naturelles, notamment sous l’effet de l’expansion agricole, de l’urbanisation et des mutations socioéconomiques. Les résultats obtenus dans cette étude corroborent également ceux de F. M. H. sambou et al. (2023, p.10), P. H. Djaouga et al. (2022, p.110), B. Ouédraogo et al. (2023, p.1458) et M. Konaté et al. (2024, p.56), qui mettent en évidence une conversion progressive des formations forestières et savaniques au profit des surfaces anthropiques dans plusieurs régions ouest-africaines.

4.2 Approches de modélisation prospective et choix méthodologiques

L'élaboration de scénarios prospectifs a été largement mobilisée dans les travaux de modélisation spatiale, notamment ceux de J. Oulokoi et al. (2013, p.5), O. Kaboré (2013, p.195) et J. Konkobo et al. (2023, p.63389). Ces auteurs distinguent principalement deux scénarios (un scénario socioéconomique et un scénario écologique ou de stabilité environnementale). Plusieurs automates cellulaires ont été utilisés dans ces travaux prospectifs, notamment Spacelle (J. Oulokoi et al., 2013), LCM (O. Kaboré, 2013, p.118) et CA-Markov (J. Konkobo et al., 2023, p.63388). Les avantages et limites de ces outils ont permis, dans la présente étude, d'orienter le choix du modèle LCM, jugé plus adapté aux contextes tropicaux pour la simulation des dynamiques spatiales.

Contrairement à plusieurs études antérieures, le modèle utilisé dans cette recherche intègre un troisième scénario orienté vers la régénération des espaces naturels et l'amélioration de la qualité des terres agricoles, conformément à la vision de B. T. Agbanou (2018, p.83). Le choix des sous-modèles a été contextualisé en tenant compte des réalités actuelles du Burkina Faso, notamment la crise sécuritaire, la crise socioéconomique et la crise foncière. Dans cette perspective, l'étude a davantage privilégié les transitions entre champs et savanes, traduisant soit des processus de récupération écologique, soit une dynamique de dégradation environnementale.

4.3 Influence des variables spatiales et environnementales

Plusieurs travaux ont montré l'importance des variables spatiales dans les dynamiques d'occupation des terres. O. Kaboré (2013, p.150) et L. Ouédraogo (2013, p.160) ont notamment utilisé des variables telles que la distance aux cours d'eau, aux infrastructures routières et aux localités pour analyser les impacts spatiaux des transitions d'occupation des terres sur les ressources naturelles. Les résultats obtenus dans cette étude confirment l'influence significative de ces variables sur les transformations des formations végétales, rejoignant également les observations de A. Bensaïd et al. (2007, p.82). Par ailleurs, cette recherche a intégré des variables physiques et catégorielles telles que les sols, le relief et la géomorphologie, à l'instar des travaux de O. Kaboré (2013, p.173). L'ensemble des variables a été soumis au test du V de Cramer afin d'identifier les facteurs les plus pertinents pour chaque unité d'occupation des terres (UOT). Cette approche a permis

d'améliorer la cohérence du modèle et de réduire l'influence des variables faiblement explicatives.

4.4 Limites du modèle et incertitudes liées aux données satellitaires

Malgré la pertinence du modèle LCM couplé aux chaînes de Markov et aux automates cellulaires, certaines limites méthodologiques demeurent. Les résultats obtenus restent fortement dépendants de la qualité des données satellitaires, des choix de classification et des hypothèses de transition intégrées au modèle. Les images Landsat utilisées présentent notamment des contraintes liées à leur résolution spatiale, aux confusions spectrales entre certaines classes d'occupation du sol ainsi qu'aux effets atmosphériques et saisonniers susceptibles d'altérer la précision des classifications. Bien que les exactitudes globales obtenues soient acceptables, des incertitudes persistent dans la délimitation des formations végétales, particulièrement dans les zones de mosaïques agroforestières et de savanes dégradées. En outre, les modèles prospectifs reposent sur une hypothèse de continuité des dynamiques passées, alors que les changements climatiques, les crises sécuritaires, les politiques foncières et les mutations socioéconomiques peuvent modifier considérablement les trajectoires futures d'occupation des terres. Ainsi, les résultats doivent être interprétés comme des tendances probables plutôt que comme des prédictions absolues.

4.5 Implications écologiques et socioéconomiques des scénarios prospectifs

Les scénarios prospectifs élaborés mettent en évidence des implications écologiques et socioéconomiques importantes, particulièrement dans le scénario pessimiste à l'horizon 2050. La progression marquée des champs pourrait accentuer la fragmentation des habitats naturels et réduire la connectivité écologique entre les formations végétales. Cette situation compromettrait la conservation de la biodiversité et favoriserait la dégradation des services écosystémiques tels que la protection des sols, la régulation hydrique et le stockage du carbone.

À l'échelle socioéconomique, l'expansion des superficies agricoles et des espaces habités pourrait accentuer les conflits d'usage des terres et renforcer les tensions foncières dans un contexte déjà marqué par une forte pression démographique et une crise sécuritaire persistante. La réduction progressive des espaces naturels et des terres disponibles pourrait également fragiliser les systèmes agropastoraux et accroître la

vulnérabilité des populations rurales dépendantes des ressources naturelles. Ces résultats soulignent ainsi la nécessité d'intégrer davantage les dimensions foncières, climatiques et socioéconomiques dans les futurs modèles prospectifs afin de produire des scénarios plus robustes et mieux adaptés aux réalités locales.

Conclusion

Au regard de toutes les dynamiques observées dans les trois scénarios, il conviendrait de faire de la soutenabilité écologique, institutionnelle et sociale une priorité. Au plan institutionnel, la promotion des bonnes pratiques visant à réduire l'extension des espaces agricoles tout en améliorant la qualité des terres, les politiques publiques réglementant le foncier, l'application des lois autorisant le recrutement du personnel de protection des espaces de conservation, le respect des accords de cogestion des espaces aménagés par les communautés concourront à être une aubaine pour la survie et la conservation de nos ressources naturelles. Dans le domaine écologique, l'institution devrait veiller à réduire les pratiques qui détériorent la viabilité à long terme des espèces utilisées, tout en encourageant celles compatibles avec le maintien d'une viabilité à long terme des écosystèmes dont elles dépendent. Par conséquent, la soutenabilité écologique et institutionnelle s'avérerait importante pour la conservation des espaces si les initiatives au niveau gouvernemental et local pour la sécurisation foncière totale des réserves forestières étaient appliquées dans toute leur rigueur. Enfin, la capacité des communautés à remplir leur obligation comme convenu dans les accords de cogestion des espaces aménagés exige aussi que les autorités de gestion remplissent les leurs. Les communautés devraient aussi avoir une éducation écologique de sorte à utiliser de façon rationnelle les espèces utiles ou toutes autres espèces en vue de la conservation à long terme des écosystèmes forestiers. En tout état de cause, il conviendra de rester optimiste au regard de la dynamique enclenchée au niveau gouvernemental, allant dans le sens du foncier, de l'environnement et de la sécurité des espaces de conservation.

Références Bibliographiques

AGBANOU Bidossessi Thierry, OREKAN Vincent O. A., DJAFAROU Abdoulaye, PAEGELOW Martin et TENTE Brice, 2018, « Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol en zone d'agriculture extensive : cas du secteur Natitingou-Boukombé au Nord-

Ouest du Bénin », *La géographie au service du développement durable*, Abomey-Calavi, Presses Universitaires d'Abomey-Calavi, pp. 22-34.

AMANI Abdou, GARBA Amadou, ABDYOU Abdoulaye et MAHAMANE Ali, 2019, « Perceptions et usages socioéconomiques du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) dans le Sud-Ouest du Niger », *Journal of Animal & Plant Sciences*, vol. 40, n°2, Nairobi, pp. 6584-6602.

BENKHELIF Amar, SETTI M'hammed, SEHL Boudjemaa, DJEDDAOUI Farid et NAZRUL Islam, 2024, « Prédire la croissance urbaine et son impact sur l'environnement fragile à l'aide du Land Change Modeler (LCM) : cas de Djelfa (Algérie) », *GeoJournal*, vol. 89, Dordrecht, Springer, pp. 1-21.

BENSAID Abdelkrim, 2007, « L'analyse multicritère comme outil d'aide à la décision pour la localisation des zones à forte pression anthropique : cas de Naâma (Algérie) », *Revue Télédétection*, vol. 7, Paris, CNES, pp. 81-90.

BOUZEKRI Abdelhafid et Benmessaoud Hocine, 2016, « Using multi-criteria analysis for studying human impact in agro-forestry-pastoral ecosystems in Khenchela (Algeria) », *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Prague, ISPRS, pp. 123-130.

BROWN Daniel G., WALKER Robert, MANSON Steven et SETO Karen, 2012, *Land Change Science: Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface*, Dordrecht, Springer, 641 p.

COHEN Jacob, 1988, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2e éd., Hillsdale, Lawrence Erlbaum Associates, 567 p.

COTÉ Marie-Josée, POULIN Gaétan, PRÉVIL Carlo, SAINT-ONGE Benoît et WAAUB Jean-Philippe, 2001, « Système d'aide à la décision pour la gestion territoriale durable », *Géocarrefour*, vol. 76, n° 3, Lyon, pp. 253-264.

CUMMING Graeme Stephen, 2007, « Global biodiversity scenarios and landscape ecology », *Landscape Ecology*, vol. 22, Dordrecht, Springer, pp. 671-685.

DORSOUMA Hamndou et Requier-Desjardins Mélanie, 2008, « Variabilité climatique, désertification et biodiversité en Afrique », *VertigO*, vol. 8, n° 1, Montréal, pp. 1-12.

GANSAONRÉ Noël, ZOUNGRANA Benewindé Jean-Baptiste et YANOOGO Isidore, 2020, « Dynamique du couvert végétal autour du Parc W du Burkina Faso », *Belgeo*, Bruxelles, Société Royale Belge de Géographie, pp. 1-18.

GARBA Amadou, AMANI Abdou, ABDYOU Abdoulaye et MAHAMANE Ali, 2019, « Perceptions et usages du tamarinier au Niger », *Journal of Animal & Plant Sciences*, vol. 40, n° 2, Nairobi, pp. 6584-6602.

HERVÉ Dominique, RANDRIAMALALA Josoa, RANDRIAMBANONA Herizo, RAZANAKA Samuel, RAKOTOARIMANANA Vonjison, RANAIVOSON Rado Elysé, RAFIDISON Verohanitra et CARRIÈRE Stéphanie, 2022, *Valoriser les forêts sèches*, Marseille, IRD Éditions, 396 p.

HONVOU Sylvanus Hanania Sèton, ABOH Boya André, SEWADE Clément, TEKA Oscar, GANDONOU Bernard Christophe, OUMOROU Madjidou et SINSIN Brice, 2021, « Modélisation de la dynamique d'occupation des sols au Bénin », *Sciences et Technologies pour l'Agriculture Durable*, Cotonou, pp. 45-62.

INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DE LA DÉMOGRAPHIE (INSD), 2019, *RGPH 2019 : résultats définitifs*, Ouagadougou, INSD, 692 p.

ISLAM Atefa, AHMED Wael, ABDEL-MAGUID Ramadan Hassan, BARAKA Moustafa, DARWISH Walid et SENOUSI Ahmad Mohamed, 2023, « LULC modelling using ANN and CA-Markov in Egypt », *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Nice, ISPRS, pp. 325-332.

KABORÉ Oumar, 2013, *Dynamique de l'utilisation des terres et impacts sur les ressources naturelles au Burkina Faso*, Thèse de doctorat de géographie, Université de Ouagadougou, Ouagadougou, 245 p.

KAFANDO Halidou, OUÉDRAOGO Blaise, OJEH Vincent et Sima Mihaela, 2024, « Groundwater mapping in Loubila », *Revue Roumaine de Géographie*, Bucarest, pp. 55-70.

KONATÉ Ibrahim, ILBOUDO Daniel, DAYAMBA Sidzabda Djibril, TRAORÉ Salifou, SAWADOOGO Louis et HIEN Mipro, 2024, « Land cover and carbon stock dynamics in Tiogo forest », *Biodiversity and Forest Trends*, vol. 12, pp. 45-63.

KONKOBO Jacques, YAMÉOGO Augustin, SOME Jean Nifababé et SOME Yélézouomin, 2023, « Modélisation de l'occupation des terres à Kouka », *International Journal of Development Research*, vol. 13, n°11, pp. 63380-63390.

KOUMOI Zakariyao et ORÉKAN Vincent O. A., 2018, « Apport des SIG dans l'analyse prospective au Togo », *Revue Africaine de l'Environnement et de l'Agriculture*, Lomé, pp. 77-91.

MAMA Djaouga, DOSSOU Adéline et MAZO Ismaël, 2022, « Prospective LULC change in Southern Benin », *European Journal of Geography*, vol. 13, Athènes, pp. 102-118.

MHANGARA Paidamwoyo, 2011, *Land Use/Cover Change Modelling and Spatial Simulation*, Thèse de doctorat, University of Johannesburg, Johannesburg, 210 p.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE, DE L'EAU ET DE L'ASSAINISSEMENT, 2022, *Stratégie nationale REDD+ du Burkina Faso*, Ouagadougou, Gouvernement du Burkina Faso, 154 p.

OLOUKOI Joseph, MAMA Vincent Joseph et AGBO Fulbert Bernadin, 2013, « Modélisation de l'occupation des terres au Bénin », *Télédétection*, vol. 12, Paris, pp. 1-15.

ORÉKAN Vincent O. A., 2007, *Implementation of the CLUE-S Model in Benin*, Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, 275 p.

OUÉDRAOGO Issa, TIGABU Muluaem, SAVADOGO Patrice et COMPAORÉ Halidou, 2010, « Land cover change in Burkina Faso », *Land Degradation & Development*, vol. 21, Londres, Wiley, pp. 1-14.

OUÉDRAOGO Lucien, 2012, *Gestion de l'eau et adaptation climatique*, Thèse de doctorat de géographie, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey, 245 p.

OUOBA Awa, 2013, *Changement climatique et dynamique de la végétation au Sahel burkinabè*, Thèse de doctorat unique de géographie, Université Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou, 305 p.

PARÉ Souleymane, SÖDERBERG Ulf, SANDEWALL Mats et OUADBA Jean-Marie, 2008, « Land use analysis in Burkina Faso », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 127, Amsterdam, Elsevier, pp. 143-152.

RAJAN Kashi Nath et SHIBASAKI Ryosuke, 1997, « Land use change modeling », *Proceedings of the Asian Conference on Remote Sensing (ACRS)*, Kuala Lumpur, pp. 215-220.

SAMBOU Mame Henriette Astou, ALBERGEL Jean, VISSIN Expédit Wilfrid, LIERSCH Stefan, KOCH Hagen, SZANTOI Zoltan, BABA Wassim, SANÉ Moussé Landing et TOURÉ Ibrahima, 2023, « MLP–Markov modelling », *Journal of African Earth Sciences*, vol. 205, Amsterdam, Elsevier, pp. 104-118.

VAN Den Hoof Cornelis, DE NOCKER Leo, SANON Amadou, TIEMTORÉ Souleymane, BUCHHORN Marcel et SMETS Bruno, 2024, *Capital naturel en Afrique de l'Ouest*, Gland, UICN, 210 p.

YARGA Hahadoubouga Paul, GUELBÉOGO Sidiki, ZONGO Abdoul Rasmané, YAO Amoin Flora et OUÉDRAOGO Lucien, 2024, « Pastoral zones modelling au Burkina Faso », *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 42, Rabat, pp. 88-104.

ZOUNGRANA Benewindé Jean-Baptiste, CONRAD Christopher, AMEKUDZI Leonard, Thiel Martin, DA Évariste Dapola, FORKUOR Gérald et LÖW Fabian, 2015, « LULCC detection using Landsat », *Remote Sensing*, vol. 7, Bâle, MDPI, pp. 8569-8593.