

Research Article

MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE DU COUVERT VÉGÉTAL DANS LA PROVINCE DU IOBA EN DOMAINE SOUDANIEN AU BURKINA FASO PAR LA MÉTHODE DES AUTOMATES CELLULAIRES (SPACELE)

SOMÉ Nifababé Jean, SOMÉYélézouomin Stéphane Corentin, *KONKOBO Jacques

Laboratoire de Recherche en Sciences Humaines (LABOSHS), Université Norbert ZONGO, Koudougou, Burkina Faso.

Received 06th May 2023; Accepted 07th June 2023; Published online 30th July 2023

RÉSUMÉ

Le couvert végétal de la province du Ioba est sujette à de fortes mutations qui menacent sa durabilité. La présente étude vise à prévoir l'état de cette ressource végétale en 2055. La démarche méthodologique s'articule autour d'une revue de littérature, des collectes des données, de traitement d'images satellites Landsat TM de l'année 2000, ETM de 2010 et OLI_TIRS de 2020. Les outils utilisés sont les logiciels de télédétection ENVI, de cartographie ArcGIS, et de projection Spacelle à travers la méthode des automates cellulaires. La méthode de comparaison visuelle et statistique a été utilisée pour valider la qualité du modèle. Les résultats de cette recherche indiquent qu'entre 2000 et 2020, la superficie des cultures annuelles a connu une hausse de 20,26% suivie des forêts galerie avec 18,95%. Des baisses respectives de 27,82% et de 21,14% sont observées au niveau de la superficie des savanes arborées et des savanes arbustives. Selon les grandes tendances, il y a une forte probabilité de mutation des zones de végétation naturelle en zone anthropiques. La projection de 2020 à 2055 suivant le scénario optimiste laisse entrevoir une reconstitution du couvert végétal puisque les superficies des forêts galerie, des savanes arborées connaîtront des hausses respectives de 1,25%, 41,33% tandis que la superficie de la savane arbustive connaîtra une baisse de 2,33%. En revanche, le scénario pessimiste de 2055 indique que les forêts galerie, les savanes arborées et arbustives verront leurs superficies respectives diminuées de 1,05%, 49,18% et 2,19%. Les activités anthropiques influenceront négativement la dynamique du couvert végétal de la province du Ioba.

Mots clefs: Modélisation, Automates cellulaire, couvert végétal, province Ioba, Burkina Faso.

INTRODUCTION

Les changements du climat et leurs impacts sur l'écosystème mondial constituent une question environnementale qui interpelle toute la communauté scientifique et politique en matière de planification de la production agricole, de la diversification des productions agricoles et de la conservation des ressources forestières (Gbesso *et al.*, 2013; Benoudjita *et al.*, 2017). En effet, le rapport du Groupe d'Expert sur le Climat (2007) stipule qu'il y a de plus en plus d'évidence que les fluctuations des variables climatiques notamment les précipitations et la température auront une incidence sur la diversité biologique et sur la répartition géographique des habitats favorables aux espèces. Selon les conclusions de la même source, à une probabilité supérieure à 90%, l'essentiel du réchauffement qui s'est produit depuis 1950 est dû à l'augmentation rapide des concentrations de gaz à effet de serre causée par l'activité humaine. De nouvelles études ont montré que les changements climatiques évoluent plus rapidement que dans les pires scénarios du GIEC ; ceci entraînera des répercussions plus ou moins complexes sur les arbres. Bien qu'étant le moins polluant, l'Afrique est le continent qui est le plus affecté par les effets des changements climatiques en particulier son environnement et plus spécifiquement la végétation. Selon les projections du GIEC (2007), 20 à 30% des espèces végétales et animales du continent feront face à un grand risque d'extinction si le réchauffement global excède 1,5 °C à 2,5 °C (Busby *et al.*, 2010). Boko *et al.*, (2007) estiment que 25 à 42% des espèces végétales du continent pourraient être menacées d'extinction du fait d'une perte de 81 à 97% des habitats favorables d'ici 2085. Pour Akpo *et al.*, (2003)

il y aura une diminution considérable de la densité des arbres dans les paysages ruraux et les systèmes d'utilisation des terres des zones sahéliennes, soudaniennes et guinéennes. Au Sahel, les manifestations du phénomène ont déjà commencé.

En effet, depuis les fréquentes années de sécheresse survenues entre 1960 et 1980, le Sahel connaît sa plus grande transformation environnementale (Agnew et Chappell, 1999). Ces sécheresses ont entraîné la disparition de certaines plantes ligneuses sur des vastes superficies (Toutain et Roberge, 1999). Toutefois la situation de la végétation au Sahel fait l'objet d'une polémique entre les chercheurs : certains estiment qu'il y a une disparition des formations naturelles (Reij et Botoni, 2009) tandis que d'autres clament que dans de nombreuses régions du Sahel, la tendance à la dégradation des terres est contrée par un processus de « reverdissement » ou « ré-végétalisation » depuis les années 1980 notamment au Niger, au Mali et au Burkina Faso (Herrmann *et al.*, 2005; Bégué *et al.*, 2016). Mais l'implication directe ou indirecte des activités humaines sur le couvert végétal ne souffre d'aucune contestation. Les différentes activités de l'homme exercent une forte influence sur les diverses formes de vie présentes dans l'environnement (Haddonou-Yovo *et al.*, 2019). De nos jours, l'habitat de plusieurs espèces est menacé face à l'intensification des activités humaines telles que l'agriculture itinérante sur brûlis, l'exploitation forestière, l'élevage à travers la transhumance et l'urbanisation (Bouko *et al.*, 2016 ; Mouzoun *et al.*, 2018). Au Burkina Faso, les travaux de Béné et Fournier (2012) ont montré que le milieu naturel subit de fortes modifications imputables à l'accroissement de la population, aux aléas climatiques et à la « mondialisation ». Il s'en suit alors des transformations sociales, d'importants changements dans l'occupation des terres et une modification notable du couvert végétal naturel. Par conséquent, il y a une pression accrue sur les écosystèmes qui se traduit par la dégradation et la baisse de fertilité des sols, la raréfaction des

*Corresponding Author: KONKOBO Jacques,

Laboratoire de Recherche en Sciences Humaines (LABOSHS), Université Norbert ZONGO, Koudougou, Burkina Faso.

pâturages naturels et la baisse des services écosystémiques (AKOUDJIN *et al.*, 2016). Pourtant, le pays tire ses principales richesses de l'agriculture et de l'élevage qui contribuent à près de 40% à son PIB, assurent 80% de ses exportations et emploient environ 86% de sa population active (MAHRH, 2009). Il urge alors que des mesures adéquates soient élaborées afin de pallier la disparition de ce bien vital. Dans cette optique, de nombreuses recherches ont été entreprises; certaines pour caractériser le couvert végétal du pays, d'autres pour comprendre son fonctionnement. Ainsi, de nombreuses approches de modélisation de la dynamique de l'occupation du sol ont été développées ces dernières années. Certains modèles pour simuler et explorer l'utilisation actuelle du sol (Ouédraogo *et al.*, 2015; Kaboré *et al.*, 2019) et d'autres qui s'intéressent aux changements possibles dans le futur (Agbanou *et al.*, 2018). Dans le domaine de l'occupation des terres, il y a de nombreux travaux (Palé *et al.*, 2020; Somé *et al.*, 2021), mais la modélisation cette dynamique reste un aspect très peu abordé dans la plupart des études. Parmi les quelques travaux dans ce domaine, il y a ceux de Guelbeogo (2017) dans le lac Bam, de Youma (2021) à Tiogo. Pourtant, de tels travaux peuvent être valorisés dans la mise en place d'un système d'aide à la décision en vue d'une gestion durable des plans d'aménagement (Orekan, 2007) de renforcement de la résilience des populations locales et de gestion durable des ressources naturelles dans un contexte où l'environnement est très changeant. Mieux, l'évolution récente des techniques statistiques et des systèmes d'informations géographiques a permis d'élaborer des modèles de prédiction qui permettent une meilleure compréhension, évaluation et projection de la dynamique des ressources (Elith et Leathwick, 2009). A travers l'étude de la dynamique actuelle et future de l'occupation des terres dans la province du loba, la présente étude s'inscrit dans cette logique de constat et de projection afin d'anticiper les conséquences.

Approche méthodologique

L'approche méthodologique présente le milieu d'étude, les données, les outils et la méthode d'analyse

Présentation du milieu d'étude

L'étude est conduite dans la région du sud-ouest du Burkina Faso précisément dans la province du loba (carte n°1). Le terroir de la localité couvre 3 292 km² (329200 ha) et est circonscrit entre les coordonnées géographiques 10°25 et 11°20 de latitude nord et 2°36 et 3°25 de longitude ouest (DREP/SO, 2000).

Carte n°1 : Secteur d'étude/province du loba



Juillet 2021 Source: BNDT,2012 ; données terrain Réal : Somé N. Jean

Le relief de la province se caractérise par un vaste plateau avec une altitude moyenne comprise entre 250 et 300 mètres. Les sols, dominés par le type ferrugineux tropicaux lessivés, sont soumis à une forte érosion hydrique et éolienne à cause de la déforestation (BUNASOLS, 2007). Du fait de son appartenance au domaine phytogéographique sud-soudanien, le couvert végétal est influencé par la nature et la diversité de ses sols, la clémence de la pluviométrie ; toute chose qui favorise le développement d'une végétation riche et diversifiée (Guinko, 1985). En effet, ce domaine est l'un des plus arrosés du pays car les pluies vont du mois d'avril à octobre avec une moyenne 942 mm d'eau et une température moyenne est de 27°C.

La population de la province est passée de 192 321 habitants en 2006 à 265 876 habitants en 2019 et avoisine 273 366 habitants en 2020 La densité moyenne de la population est estimée à 80,76 habitants au km²(INSD, 2022). Cette valeur est supérieure à la densité régionale (52,66 habitants/km²) et nationale (75,1 habitants/km²). Ce qui en fait l'une des provinces les plus peuplées du pays. En plus, 91,13% des habitants de la province vivent en milieu rural. De plus, la population est majoritairement jeune (60%) et rurale (91,13%). A l'instar de l'ensemble du pays, l'agriculture mobilise la grande majorité (90%) de la population active de la localité. Elle est de type extensif, pratiqué de façon traditionnelle et orientée vers l'autosuffisance alimentaire (INSD, 2022). Les principales spéculations sont le maïs, le mil, le sorgho, le riz, qui constituent l'alimentation de base de la population. Outre cela, la province abrite de nombreux sites d'extraction d'or et de cuirasse sans oublier l'exploitation du bois. Toutes activités fragilisent le couvert végétal de la localité qui connaît une forte dégradation.

Méthode d'analyse

Données et outils utilisés

Des images satellitales Landsat (7 et 8) et OLI_TIRS de 30 m de résolution ont été utilisées pour l'étude de la dynamique de l'occupation des terres. Il s'agit d'images Thematic Mapper (TM) de Landsat 7 pour l'année 2000, Enhanced Thematic Mapper (ETM+) de Landsat 8 pour l'année 2010 et OLI (Operational land Imager) et TIRS (Thermal Infrared Sensor) pour l'année 2020. Les images ont été téléchargées sur la banque de données images de l'USGS (United States Geological Survey) le 8 mai 2020. Toutes les images sont du mois de décembre qui correspond à la période de l'année où la biomasse atteint son pic dans le secteur d'étude. Les limites de la localité d'étude ont été générées grâce à la Base Nationale de Données topographiques (IGB, 2014)¹.

¹Institut Géographique du Burkina, 2014, Bases de données spatiales, Burkina Faso

Tableau 1 : Caractéristiques des images satellitaires

Type d'image	Date et références	Résolution spatiale	Période de l'image	Source
Image Landsat TM	2000 Path=196 et 195 Row=052	30 m	LE07_L1TP19605220001218 LE07_L1TP19605220001107	IGB
Image Landsat ETM+	2010 Path=196 Row=052	30 m	LT05_L1TP19605220101213	IGB
ImageLandsatOLI_TIRS	2020 Path=196	30 m	LC08_L1TP_19605220201208	IGB

Analyse des données

❖ Traitement des images satellites

Le traitement des images a été en grande partie inspiré des normes et des protocoles adoptés en 2020 par le Programme d'Investissement Forestier (PIF) et l'Institut Géographique du Burkina Faso (IGB), lors de la production des bases de données d'occupation des terres MNV REDD+ de 1992, 2002 et 2014. Une composition colorée MIR/PIR/R (Moyen Infrarouge/Proche Infrarouge/Rouge) ou composition fausses couleurs a été utilisée : 6-5-4 pour Landsat 8 et 5-4-3 pour le Landsat 7 et OLI_TIRS. La végétation apparaît en vert, l'eau claire en bleu, l'eau boueuse ou turbide est noirâtre, les roches en violet, la zone d'habitation en rouge (PIF/ IGB, 2020). La couleur et la nomenclature des sites d'entraînement, ROI (Region Of Interest), ont été inspirées de la Base de Données d'Occupation des Terres (IGB, 2014), de CORINE Land Cover (2009) et PIF/ IGB, 2020. Une classification basée sur la méthode du maximum de vraisemblance a été utilisée. Après cette étape, il y a eu l'analyse de la dynamique de l'occupation des terres qui a été basée sur l'approche de détection des changements dans le but de comparer les différentes classes d'occupation des terres de 2000 à 2010 et de 2010 à 2020. La détection des changements a combiné les méthodes de l'interprétation visuelle et des classifications supervisées, aux approches SIG. Les changements de l'occupation des terres ont été appréciés sur la base du taux des changements d'occupation des terres qui est le taux moyen annuel d'expansion spatiale. Pour obtenir la valeur des différentes unités d'occupation, les cartes ont été rasterisées et les proportions des différentes unités d'occupation sont obtenues en nombre de cellules.

Les outils utilisés dans le cadre de cette étude sont entre autres, la version 5.3 du logiciel de télédétection Environment for Visualizing Images (Envi) qui a servi au traitement des images satellitaires; et les informations issues des différents traitements ont été spatialisées avec la version 10.8 du logiciel de cartographie ArcGIS. Les statistiques des valeurs des unités d'occupation des terres et la rédaction ont été respectivement réalisées avec Excel et Word de Microsoft office 2020.

❖ Description de la méthodologie des automates cellulaires avec SpaCelle

Des paramétrages doivent être effectués afin de faire fonctionner le modèle *SpaCelle*. Ainsi, les différents états cellulaires, les règles de vie et de transition ont été déterminés et entrés dans le logiciel (*SpaCelle*). Quant à la durée de vie des cellules, elle peut être fixe, infinie ou aléatoire gaussienne. Une durée de vie aléatoire gaussienne est régie par une espérance de vie et un écart type a été retenu dans le cadre du présent travail. Ces paramètres ont été calculés suivant la formule de l'espérance de vie des espèces en écologie, prenant en compte le taux d'extinction de chaque unité d'occupation des terres (Oloukoi, 2013). La formule utilisée pour déterminer cette variable est celle proposée par Puyravaud (2003) et utilisée par Oloukoi *et al.*, (2007) dans l'étude de modélisation de la

dynamique de l'occupation des terres au sud du Département des Collines au Bénin, Schulz *et al.*, (2010) dans une étude de la dynamique de l'occupation du sol au centre du Chili et par Oloukoi (2013) dans l'étude des changements de l'occupation des terres au centre du Bénin. Partant de là, le taux d'expansion spatiale moyen annuel t , est évalué à partir de la formule ci-dessous :

$$t = (N1 - N2) / [(T1 - T0) * N0]$$

Où $N1$ désigne le nombre de cellules d'une unité d'occupation des terres au temps $T0$ et $N2$ le nombre de cellules à $T1$. De cette formule on peut déduire la durée de vie (D) des cellules au moyen de la formule :

$$D = 1/t$$

La description du processus des scénarii utilisés pour faire les projections de la dynamique de l'occupation des terres en 2055, est basée sur le modèle des automates cellulaires. Corgne (2004) décrit les automates cellulaires comme des outils informatiques de modélisation de type « individu-centré » pour lesquels on considère l'inscription des comportements des individus des entités spatiales élémentaires appelées « cellules ». Selon Oloukoi (2013), l'espace est représenté par une grille de cellules structurées sur laquelle des règles d'évolution sont définies selon le principe de l'auto-corrélation spatiale et temporelle. Partant de ce principe, la même source estime que l'état d'une cellule qui peut par exemple être une savane arborée à un temps T et arbustive au temps $T + 1$ dépendra de l'état de cette cellule et de son voisinage au temps T . Dans le cadre de la présente étude, le modèle des automates cellulaires utilisé est *SpaCelle*. Le principe de ce modèle est adapté au traitement de l'évolution du paysage et aux simulations environnementales et a fait ces preuves dans d'autres études de thématiques similaires (Langlois, 2001; Dubos-Paillard *et al.*, 2005; Oloukoi, 2013; Guelbéogo, 2017; Youma, 2022). Le choix de la topologie du système de spatialisation utilisé par *SpaCelle* possède plusieurs catégories. En effet, la spatialisation des cellules autour de la cellule centrale peut être faite selon une topologie à quatre voisins, appelée voisinage de von Neumann, ou une topologie à huit voisins, appelée le voisinage de Moore. Dans le cadre de la présente étude, le choix est porté sur ce dernier. D'une part parce qu'il plus large que celui de nous avons de von Neumann puisqu'en plus des cellules des quatre points cardinaux (Nord, Est, Sud, Ouest), la règle de Moore ajoute les cellules intermédiaires que sont celles du Nord-Est, Sud-Est, sud-ouest et du Nord-Ouest. Ce type de voisinage est plus adéquat dans l'étude de la dynamique de l'occupation des terres parce qu'il tient compte de toutes les directions surtout lorsqu'il n'y a aucun obstacle (Oloukoi, 2013).

Le langage des automate Cellulaire est défini par un domaine qui est partitionné en éléments de surface appelés cellules. Il comprend un ensemble d'états, de règles de transition des états et un mécanisme d'évolution temporelle gérant les transitions d'états des cellules. Une cellule désigne une portion régulière d'espace définie par ses coordonnées (i, j) donnant un numéro de ligne i et de colonne j , divisant le domaine selon une partition formant un pavage régulier. Les lignes sont numérotées du haut vers le bas et les colonnes de la gauche vers la droite. Le domaine représente l'espace constitué par

la réunion de l'ensemble des cellules. Il peut être rectangulaire (pour des cellules carrées) ou de forme complexe (cas de cellules hexagonales). Un individu est une cellule $C(i, j)$ munie d'un état X donné. La durée de vie d'un individu est le temps pendant lequel la cellule conserve son état X . Une classe est l'ensemble formé par des individus ayant un état donné X une population est l'ensemble des individus appartenant à différentes classes (X_1, X_2, \dots, X_n). Une transition est la possibilité pour une cellule de pouvoir passer d'un instant à l'autre, d'un état X à un état Z ; elle s'écrit : « $X \rightarrow Z$ ». La durée de vie des individus est régie par une fonction aléatoire gaussienne définie par une espérance de vie et un écart type qui est propre à sa classe. Chaque individu possède une durée maximale de vie ($AgeMax$) qui lui est donnée à sa naissance, en fonction de l'espérance et de l'écart type de sa classe. Si les conditions d'environnement sont défavorables, il peut mourir prématurément. À chaque instant, un individu possède une force de vie (lui permettant de conserver son état X à l'instant suivant) définie par $F(X \rightarrow X) = 1/AgeMax$. Lorsque la force de vie d'un individu est épuisée, celui-ci meurt et se transforme dans un autre état Z qui est propre à sa classe. La transformation quant à elle est régie par des règles de transition en fonction de la force de vie propre à chaque individu et des forces concurrentes des individus évoluant dans son environnement. Chaque individu est soumis à des interactions environnementales qui peuvent aboutir à sa transformation vers un autre état. À chaque instant et en chaque lieu, ces interactions génèrent des forces de transition $F(X \rightarrow Z_1), F(X \rightarrow Z_2) \dots, F(X \rightarrow Z_k)$ sur l'individu présent. Si sa force de vie $F(X \rightarrow X)$ est supérieure à ces forces de transition, il continue de vivre, sinon il se transforme dans l'état dont la force de transition est prépondérante.

Hypothèse de base des projections

Les hypothèses qui ont servi de base à l'élaboration des scénarios pessimiste et optimiste ont été inspirées des travaux sur les grandes tendances de la dynamique d'occupation des terres au Burkina Faso relayées par les travaux de Dipama (2011), Kaboré *et al.*, (2019), Somé *et al.*, (2020 ; 2021) à l'Est et au sud-ouest ; Ouoba (2014) au Sahel, Yaméogo *et al.*, (2021) à Centre-Sud, Guelbéogo (2017) au Centre-Est, Youma (2022) au Centre-Ouest, Tankoano (2017) au Centre-Ouest et Dimobéet *et al.* (2020) au sud-ouest :

- ❖ Scénario pessimiste ou socioéconomique dite de la « tendance vers la catastrophe »

Il se base sur les aspects socioéconomiques dans lesquelles s'est opérée la dynamique de l'occupation des terres jusqu'en 2020. Les considérations de base de ce scénario contribuent à la réduction de la durée de vie des formations végétales, car ces dernières subissent des pressions anthropiques qui provoquent leur dégradation. Ainsi les hypothèses suivantes ont été stipulées :

- La population la province croît à un rythme exponentiel ;
- Cette population est dépendante des ressources naturelles qui constituent la principale source d'énergie, de soins, d'alimentation, de revenus économiques des ménages ;
- La pauvreté sévit dans la province du loba ;
- L'extension des superficies agricoles, l'extraction aurifère et l'exploitation des carrières se font avec des méthodes qui dégradent l'environnement (coupe brûlis, déboisements incontrôlés, réduction de la durée des jachères, monoculture prédominante, utilisation excessive d'engrais chimique, feux de brousse, etc.) contribuant à sa dégradation ;
- Le taux de la dynamique de l'occupation des terres est le même que celui de la période allant de 2000 à 2020.

- ❖ Scénario écologique dite de la « stabilité environnementale » ou optimiste

La base des hypothèses de ce scénario est la prise de conscience des populations locales et l'adoption de politiques de gestion durable de l'environnement. Ainsi, les hypothèses suivantes ont été émises :

- La croissance de la population de la province connaît une baisse de 50% ;
- La situation économique des habitants s'est améliorée ;
- La part du bois dans la satisfaction des besoins en énergie domestique des populations est réduite de moitié au profit d'autres sources d'énergie (biogaz, gaz butane) ;
- Les techniques d'intensification agricoles sont maîtrisées par les populations locales ;
- Le taux de la dynamique de l'occupation des terres est réduit de moitié par rapport aux taux obtenus entre 2000 et 2020 ;
- La dynamique des unités des formations anthropiques telles que les champs, les zones nues, les villes connaît un ralentissement ;
- La mise en place d'une politique de protection des berges et de désensablement des retenues d'eau est effective et fonctionnelle.

Validation du modèle SpaCelle

Grâce à la simulation par automates cellulaires on peut établir une carte prospective de l'occupation des terres dans la province du loba en 2055. Mais auparavant, il est nécessaire de valider le modèle. Pour ce faire, une méthode de validation en trois phases a été utilisée : (i) la validation visuelle qui permet de tester la pertinence des hypothèses émises en comparant les différences entre les états observés et ceux simulés ; (ii) la validation statistique qui nécessite une comparaison entre les effectifs des cellules qui ont changé d'état et (iii) la validation spatiale qui consiste à comparer la localisation exacte ou approximative des unités d'occupation des deux cartes (Langlois, 2012). Selon Dubos *et al.*, (2001) il s'agit d'une validation visuelle des deux cartes qui se fait par comptage global des fréquences de différents états observés (ou théoriques) à différents moments de la modélisation pour en voir l'évolution : le modèle est jugé fiable et utilisable les cartes sont conformes. Ainsi, les cartes d'occupation des terres de 2010 et 2020 ont été projetées dans le l'application *SpaCelle* suivant les grandes tendances et la durée de vie des cellules. Les résultats obtenus sont comparés à la carte d'occupation des terres réelles issue du traitement des images des mêmes dates.

RÉSULTATS

Etat de l'occupation des terres dans la province du loba en 2000, 2010 et 2020

Le traitement des images a permis d'élaborer trois cartes représentatives de l'occupation des terres en 2000, 2010 et 2020 (Carte n°2). Les principales unités d'occupation des terres sont : les cultures annuelles (Ca), les forêts galeries (Fr), les savanes arborées (Sa), les savanes arbustives (Sar), les sols nus (Sn), les surfaces en eau (Se).

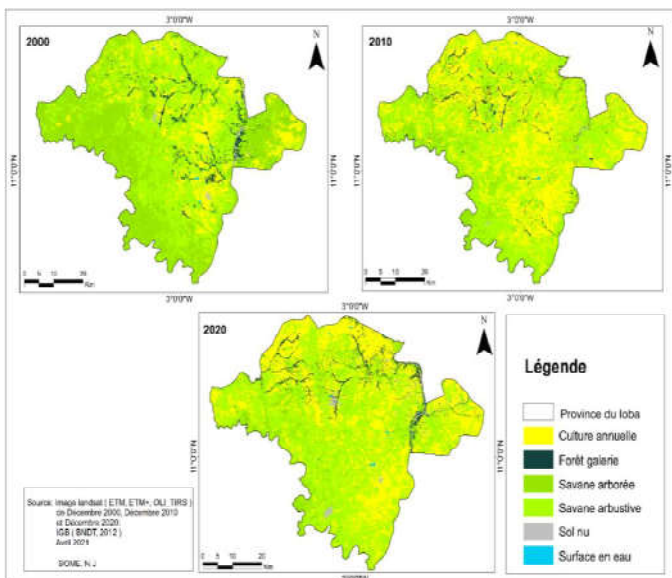


Planche cartographique n°1 : Dynamique d’occupation des terres dans la province du loba en 2000,2010 et 2020

Les statistiques sur l’évolution de la superficie des unités d’occupation des terres dans la province du loba en 2000, 2010 et 2020 ont été consignées dans le tableau n°2 ci-dessous :

Tableau n°2 : Proportion des différentes unités d’occupation des terres

Occupation	Année 2000		Année 2010		Année 2020	
	Superficie (Ha)	%	Superficie (Ha)	%	Superficie (Ha)	%
Culture annuelle	55062,99	16,88	129144,30	39,60	126776,35	38,87
Forêt-galerie	10502,19	3,22	8596,78	2,64	10061,41	3,09
Savane arborée	117701,86	36,09	30937,30	9,49	43415,98	13,31
Savane arbustive	141155,16	43,28	156911,89	48,12	142193,72	43,60
Sol nu	1436,46	0,44	301,60	0,09	3259,55	1,00
Surface en eau	257,85	0,08	224,73	0,07	409,50	0,13

Source: Image Landsat TM de 2000, ETM+ de 2010 et OLI_TIRS de 2020

Du tableau, il ressort qu’en 2000, l’essentiel de la superficie de la province du loba était occupé par la savane arbustive qui couvrait 43,28% du terroir, suivie de la savane arborée (36,09%), des cultures annuelles (16,88%), des forêts galeries (3,22%), des sols nus (0,44%) et des surfaces en eau (0,08%). Dix ans plus tard, c’est-à-dire en 2010, les savanes arbustives occupaient encore la plus importante superficie dans la localité avec 48,12% mais cette fois, secondées par les cultures annuelles (39,60%), suivies des savanes arborées (9,49%), des forêts galeries (2,64%), des sols nus (0,09%) et des surfaces en eau (0,07%). Après vingt ans, les savanes arbustives trônent toujours en termes de superficie dans la province. En 2020, elles occupaient 43,60% de la superficie de la localité ; suivies chronologiquement des cultures annuelles (38,87%), des savanes arborées (13,31%), des forêts galeries (3,09%), des sols nus (1%) et des surfaces en eau (0,13%). Le tableau n°3 dresse le bilan de l’évolution des unités d’occupation des terres. Il s’agit des variations des taux moyens annuels d’expansion spatiale et leur vitesse d’évolution annuelle (extension ou régression).

Tableau n°3 : bilan d’évolution des unités d’occupation des terres entre 2000 et 2020

Date	2000-2010		2010-2020		2020-2000	
	Taux (%)	Δ (Ha/an)	Taux (%)	Δ (Ha/an)	T (%)	Δ (Ha/an)
Culture annuelle	8,52	7408,13	-0,19	-236,80	4,1	3585,6
Forêt-galerie	-2,00	-190,54	1,57	146,46	-	-22,04
Savane arborée	-13,36	-8676,46	3,39	1247,8	-	-
Savane arbustive	1,06	1575,67	-0,98	-	4,9	3714,2
Sol nu	-15,61	-113,49	23,8	295,79	0,0	51,93
Surface en eau	-1,37	-3,31	6,00	18,48	2,3	7,58

Source: Image Landsat TM de 2000, ETM+ de 2010 et OLI_TIRS de 2020

Selon le tableau, deux tendances se dessinent de façon générale entre 2000 et 2020 : une progression des zones nues, des cultures annuelles, des savanes arbustives et des plans d’eau ; et une régression de la savane arborée et de la forêt galerie.

Nombre de cellules des unités d’occupation des terres

Le nombre de cellules par unité d’occupation à une date donnée a été obtenu en convertissant le fichier d’occupation des terres du format « fichier des formes » (shp) en format Raster. Le tableau n°4 ci-dessous présente le nombre de cellules de chaque unité d’occupation des terres.

Tableau 4 : Nombre de cellule par unité d’occupation des terres

Unités d’occupation	Nombre de cellule		
	2000	2010	2020
Culture annuelle	6521	12395	15080
Forêt galerie	1326	1045	9098
Savane arborée	13988	3622	5080
Savane arbustive	16746	13641	10964
Sol nu	162	34	404
Surface en eau	32	28	49

Source: Image Landsat TM de 2000, ETM+ de 2010 et OLI_TIRS de 2020

Une analyse intra-annuelle du tableau montre que la savane arbustive possède le plus grand nombre de pixel en 2000 avec 43% de la superficie du terroir, suivie respectivement de la savane arborée (36%), de la culture annuelle (17%), de la forêt galerie (3,42%), des sols nus (0,42%) et les surfaces en eau (0,08%). En 2010, ces unités sont passées respectivement à 44%, 12%, 40%, 3%, 0,1% et 0,1%. Pour l’année 2020 leurs proportions respectives étaient de 27%, 12%, 37%, 22%, 1% et 0,1%. Une analyse interannuelle a permis d’apprécier la dynamique spatiotemporelle des unités. Ainsi, entre 2000 et 2020, la superficie des cultures annuelles a enregistré une hausse de 20,26% suivie de celle des forêt galerie avec 18,95%, des sols nus 0,58% et des surfaces en eau 0,04%. Des baisses sont observées au niveau de la superficie des savanes arborées (24%) et des savanes arbustives (16%).

Taux d’extinction et durée de vie des cellules

Avec le nombre de cellules il a été possible de déterminer le taux d’extinction et la durée de vie de chaque unité d’occupation (cf. tableau n°5 ci-dessous).

Tableau 5 : Taux d'extinction et durée de vie des cellules

Unités d'occupation	Taux d'extinction			Durée de vie			Durée de vie moyenne	Ecart type
	2000-2010	2010-2020	2000-2020	2000	2010	2020		
Culture annuelle	-0.09	-0.02	-0.07	11	46	15	24	19
Forêt galerie	0.02	-0.77	-0.29	47	1	3	17	26
Savane arborée	0.07	-0.04	0.03	13	25	31	23	9
Savane arbustive	0.02	0.02	0.02	54	51	58	54	3
Sol nu	0.08	-1.09	-0.07	13	1	13	9	7
Surface en eau	0.01	-0.08	-0.03	80	13	38	44	34

Source : Traitement des images Landsat TM de 2000, ETM+ de 2010 et OLI_TIRS de 2020

Du tableau n°5, il ressort que de toutes les unités d'occupation, les savanes arbustives ont la plus importante durée de vie avec 54 ans plus ou moins 3 ans, suivie des surfaces en eau 44 ans plus ou moins 34 ans, des cultures annuelles 24 ans plus ou moins 19 ans, les forêts galeries 17 ans plus ou moins 26 ans et des sols nus 9 ans plus ou moins 7 ans.

Grandes tendances

Au niveau de la première colonne on a retenu les valeurs importantes ; 0,5 qui représente la probabilité qu'un sol nu (Sn) devienne une zone de culture annuelle (Ca) ; 0,36 désigne la probabilité qu'une savane arbustive (Sar) devienne une zone de culture annuelle ; 0,27 est la possibilité qu'une savane arborée ou une forêt galerie (Fg) devienne une zone de culture annuelle. La valeur 0,19 de la troisième colonne représentant la probabilité qu'une galerie forestière devienne une savane arborée a été retenue. Les valeurs 0,21 ; 0,34 et 0,47 de la quatrième colonne ont été également retenues. La première valeur représente la probabilité qu'une zone de culture annuelle devienne une savane arbustive, la probabilité qu'une forêt galerie devienne une savane arbustive et la possibilité qu'une savane arborée se transforme en savane arbustive. La figure n°1 résume les transitions majeures.

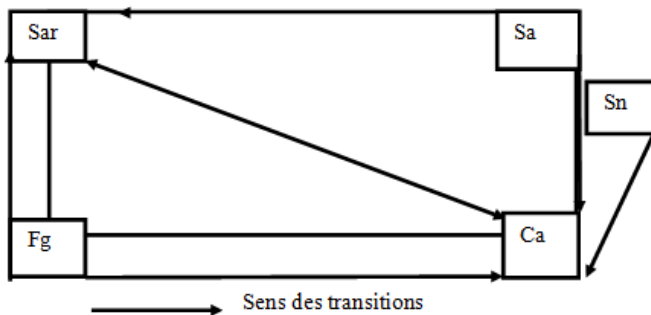


Figure 1 : Les grandes transitions

Scénarii de l'occupation des terres en 2055 dans la province du Jopa
 La combinaison des statistiques sur la durée de vie des cellules et les grandes tendances a permis d'écrire les scénarii suivants :

❖ **Scénario optimiste**

Fg>Ca=DA (51 ; 78) : une forêt galerie a une durée de vie aléatoire de 51 ans et un écart type de 78 avant de se transformer en culture annuelle

Fg>Sar=DA (51 ; 78) : une forêt galerie a une durée de vie aléatoire de 51 ans et un écart type de 78 avant de se transformer en savane arbustive

Sn>Ca=DA (27 ; 21) : un sol nu a une durée de vie aléatoire de 27 ans et un écart type de 21 avant de se transformer en culture annuelle

Cp>Sar=DA (72 ; 57) : une Culture annuelle a une durée de vie aléatoire de 72 ans et un écart type de 57 avant de se transformer en savane arbustive

Sa>Sar=DA (69 ; 27) : une savane a une durée de vie aléatoire de 69 ans et un écart type de 27 avant de se transformer en savane arbustive

Sa>Ca=DA (69 ; 27) : une savane arborée a une durée de vie aléatoire de 69 ans et un écart type de 27 avant de se transformer en culture annuelle

Sar>Ca=DA (162 ; 9) : une savane arbustive a une durée de vie aléatoire de 162 ans et un écart type de 9 avant de se transformer en culture annuelle.

❖ **Scénario pessimiste**

Fg>Ca=DA (17 ; 26) : une forêt galerie a une durée de vie aléatoire de 17 ans et un écart type de 26 avant de se transformer en culture annuelle

Fg>Sar=DA (17 ; 26) : une forêt galerie a une durée de vie aléatoire de 17 ans et un écart type de 26 avant de se transformer en savane arbustive

Sn>Ca=DA (9 ; 7) : un sol nu a une durée de vie aléatoire de 9 ans et un écart type de 7 avant de se transformer en culture annuelle

Ca>Sar=DA (24 ; 19) : une culture annuelle a une durée de vie aléatoire de 24 ans et un écart type de 19 avant de se transformer en savane arbustive

Sa>Sar=DA (23 ; 9) : une savane a une durée de vie aléatoire de 23 ans et un écart type de 9 avant de se transformer en savane arbustive

Sa>Ca=DA (23 ; 9) : une savane arborée a une durée de vie aléatoire de 23 ans et un écart type de 9 avant de se transformer en culture annuelle

Sar>Ca=DA (54 ; 3) : une savane arbustive a une durée de vie aléatoire de 54 ans et un écart type de 3 avant de se transformer en culture annuelle.

Validation du modèle

Méthode visuelle : Cartes comparatives

Dans le but de tester la fiabilité du modèle, une comparaison a été faite entre la carte d'occupation des terres et une carte simulée par SpaCelle en utilisant les informations sur la vie des cellules et les grandes transitions. La figure confronte la représentation réelle des unités d'occupation en 2010 à celle simulée dans SpaCelle.

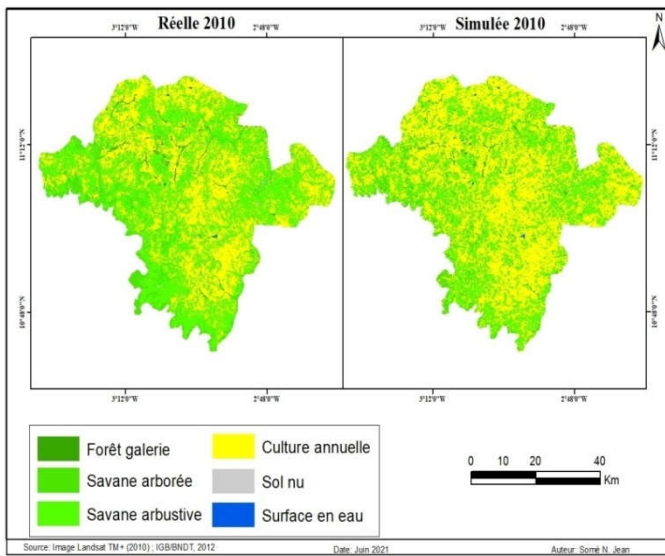


Planche cartographique n°2: Occupation des terres réelle et simulée de l'année 2010

La comparaison des deux cartes indique qu'il y a de nombreuses ressemblances entre elles. La densité et l'emplacement des unités est quasiment similaire. C'est-à-dire que les unités ont le même positionnement sur les deux cartes. La carte ci-dessous est le résultat de la confrontation entre la carte représentative des unités d'occupation des terres obtenue du traitement des images satellites de 2020 et la carte issue de la simulation dans SpaCelle.

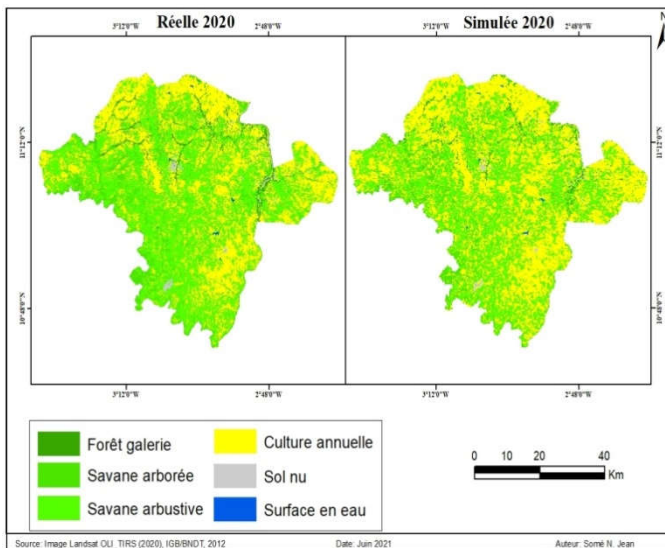


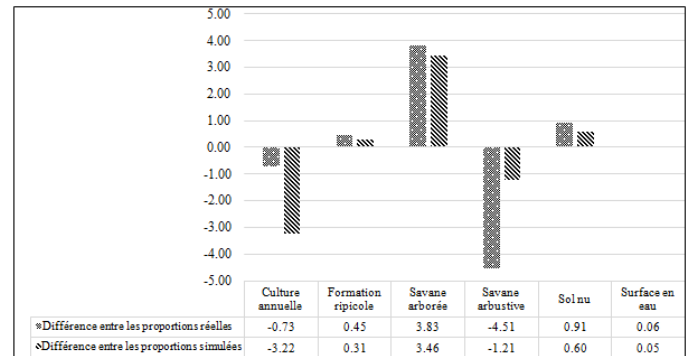
Planche cartographique n° 3 : Occupation des terres réelle et simulée de l'année 2020

Tout comme pour l'année 2010, la comparaison des cartes de 2020 indique une grande similitude dans l'emplacement et la densité des différentes unités d'occupation. Visiblement on peut conclure que le produit de la simulation est presque identique à la réalité.

Méthode statistique : Différences de nombre de cellules

La méthode statistique consistant à comparer les différences du nombre de cellules par unités d'occupation réelle et simulée a abouti aux résultats suivants : les baisses enregistrées entre 2010 et 2020 dans la réalité au niveau des cultures annuelles (-0,73) et des savanes arbustives (-4,51) ont été également observées lors des simulations avec respectivement des valeurs de -3,22 et -1,21 (Figure n°2). De même, les hausses des

proportions des forêts galeries (+0,45), des savanes arborées (+3,83), des sols nus (+0,91) et des surfaces en eau (+0,06) remarquables en situation réelle entre les deux dates, sont constatées dans les cas simulés où leurs valeurs respectives sont 0,31 ; 3,46 ; 0,60 ; 0,05. Les tendances ont été globalement respectées.



Source : Traitement des images Landsat ETM+ de 2010 et OLI_TIRS de 2020

Figure 2: Comparaison des proportions

Cartes d'occupation des terres à l'horizon 2055

La figure ci-dessous illustre l'état du couvert végétal de la province du loba à l'horizon 2055 selon le scénario pessimiste et optimiste.

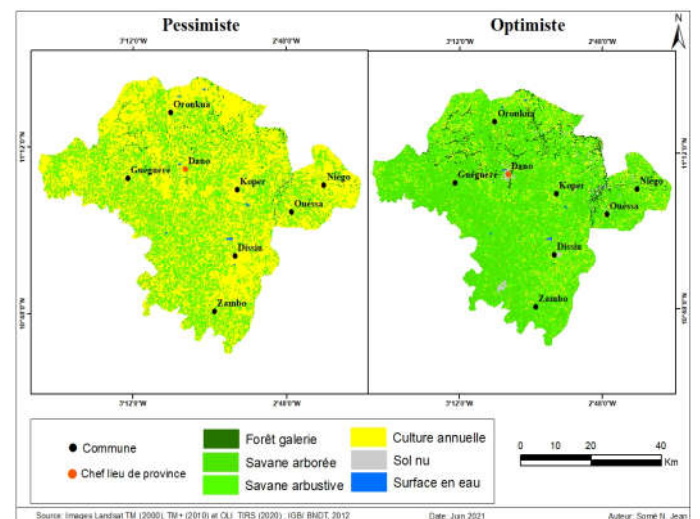


Planche cartographique n°4 : Prévision de l'occupation des terres dans la province du loba à l'horizon 2055

Statistiques des unités suivant les deux scénarii

Le tableau ci-dessous résume l'état du couvert végétal de la province en 2055 selon les deux scénarii (Cf. tableau n°6 ci-dessous).

Tableau n°6 : État de l'occupation des terres en 2055

Occupation	Simulation 2010		Simulation 2020		Simulation 2055 optimiste		Simulation 2055 pessimiste	
	Sup (ha)	%	Sup (ha)	%	Sup (ha)	%	Sup (ha)	%
Culture annuelle	174594,49	53,60	164156,08	50,38	31740,82	9,74	209897,84	64,43
Forêt galerie	4764,76	1,46	5784,22	1,78	9879,72	3,03	2376,33	0,73
Savane arborée	24841,46	7,63	36129,22	11,09	170787,57	52,42	10540,33	3,24
Savane arbustive	121178,24	37,20	117272,88	35,99	109675,76	33,66	102534,22	31,47
Sol nu	137,29	0,04	2106,35	0,65	3340,40	1,03	72,75	0,02
Surface en eau	224,13	0,07	376,84	0,12	393,84	0,12	375,43	0,12
Total	325740,38	100,00	325825,60	100,00	325818,11	100,00	325796,91	100,00

Source : Traitement des images TM+ de 2010 et OLI_TIRS de 2020

Proportions des unités selon le scénario pessimiste

Sur la base de l'hypothèse pessimiste, en 2055, il y aura une dominance de la proportion des cultures annuelles qui occuperont 64% de la superficie du terroir, suivie respectivement de la savane arbustive (31%), la savane arborée (3%), la forêt galerie (0,7%), les sols nus (0,11%) et les surfaces en eau (0,02%). L'anthropisation de la province sera encore plus marquée en 2055.

Proportions des unités selon le scénario optimiste

La projection de l'occupation des terres en 2055 fondée sur les hypothèses du scénario optimiste donne un aperçu des proportions des différentes unités à cette date. Si les conditions éco géographiques s'améliorent d'ici 2055, on devrait observer une hausse de la superficie des forêts galeries, des savanes arborées, des sols nus et des surfaces en eau respectivement d'environ 2%, 41%, 0,3% et 0,005%. En revanche les superficies des cultures pluviales et de la savane arbustive connaîtront des baisses respectives de 40% et 2%. En somme on assistera à une reconstitution du couvert végétal de la zone d'étude.

DISCUSSION

Evaluation du modèle

La finalité des études biogéographiques est d'attirer l'attention des populations locales et des décideurs sur l'état et la dynamique de leur environnement. Mieux, elles doivent leur fournir des aperçus l'impact de leurs comportements sur l'état et surtout l'avenir de leurs ressources. Les travaux scientifiques s'inscrivent dans cette logique ; mieux la géographie se doit de spatialiser ces informations de sorte à rendre les résultats accessibles et compréhensibles par tous. Aujourd'hui *Spacelle* est l'un des outils innovants de stimulation et de modélisation les plus robustes et les plus couramment utilisés.

La méthode des automates cellulaires utilisée par *Spacelle* a été à la base élaborée pour étudier l'urbanisation, prévoir la croissance des villes, et anticiper les différents impacts de celle-ci (Benenson et Torrens, 2004). Dans le cadre de la présente étude, l'outil a été « tropicalisé » et adapté au contexte environnemental (Oloukoï, 2013). Pour ce faire, nous avons exploité le fait qu'il soit basé sur l'état des cellules et de leur voisinage immédiat. En d'autres termes, ce modèle dépend plus des interactions locales entre les cellules que des facteurs qui influencent ces cellules ou automates ; c'est-à-dire que l'état d'un automate est d'abord conditionné par l'état de son voisinage. Les facteurs d'influence ou de changement de cet état viennent en second plan. En somme, le modèle n'était pas calibré sur les facteurs, mais sur les relations de voisinage entre les cellules de base, sinon il faudrait alors tenir compte des facteurs socioéconomiques

des Dagara. Toutefois, cette brèche du modèle que nous avons exploité, s'est avéré être également une limite car elle ne permet pas de considérer l'étalement des agglomérations dans le scénario pessimiste. Pourtant, l'urbanisation est l'un des facteurs clefs de la dynamique environnementale en Afrique et surtout au Burkina Faso.

L'outil s'est beaucoup amélioré au fil du temps et est beaucoup utilisé de nos jours pour de nombreuses raisons. *Spacelle* est l'un des modèles les plus précis en termes de projection à cause de la séparation du réseau et des surfaces (Oloukoï, 2013). En effet, l'équipe de Dubos-Paillard et Langlois (2005) souligne que dans le premier modèle. En outre, le processus de validation visuelle et statistique du modèle permet de réduire les erreurs et de se rapprocher de la réalité terrain. Grâce à ces dispositions, l'étude a permis d'obtenir quelques informations sur la dynamique de l'occupation des terres dans le terroir de la province du loba en 2055. De nombreux chercheurs ont asserté que la dynamique du couvert végétal au Sahel est imputable à une combinaison de facteurs naturels et anthropiques.

Facteurs explicatifs de la dynamique régressive du couvert végétal de la province du loba en 2055 selon le scénario pessimiste.

Selon le scénario pessimiste, les espaces occupées par les formations anthropiques connaîtront une hausse, car la superficie occupée par les cultures annuelles passera de 50,38% en 2020 à 64,43% en 2055, tandis que les superficies des formations naturelles comme les forêts galeries, les savanes arborées, arbustives enregistreront des baisses en passant respectivement de 1,78% à 0,73%, 11,09% à 3,24%, 34% à 31,47% dans le même intervalle de temps. La dégradation du couvert végétal dans le terroir de la province du loba, pose l'épineuse problème de la controverse scientifique sur la nature des facteurs qui influencent la dynamique du couvert végétal au Sahel. En effet, certains chercheurs estiment que le phénomène est imputable aux facteurs naturels. Ainsi, selon Sawadogo *et al.*, (2008) par exemple, les sécheresses successives entraînent des conséquences sur la végétation ligneuse, en particulier sur les espèces qui ne supportent pas un manque d'eau prolongé, qui se raréfient et finissent par disparaître. Dans la même dynamique, l'équipe de Philippon *et al.*, (2008), constate qu'en milieu semi-aride, la végétation est surtout sensible aux variations des précipitations. En somme, la bonne santé de la végétation est liée aux régimes pluviométriques et aux types d'occupation du sol dominants à savoir les savanes et les cultures (Sawadogo *et al.*, 2016a; Sawadogo *et al.*, 2016 b). En outre, d'autres chercheurs soutiennent la théorie de l'action destructrice de l'homme sur le couvert végétal à travers l'utilisation du bois pour la satisfaction de ses besoins socioéconomiques. Ainsi, à travers ses pratiques culturelles et pastorales, l'homme détruit la végétation de façon directe par les prélèvements abusifs, la coupe-brûlis, le pâturage par

les animaux de manière indirectement par l'encroûtement des sols à la suite du piétinement des troupeaux ou l'accentuation de l'effet *splash* des gouttes de pluie ; toute chose qui va aggraver l'action de l'érosion hydrique et éolienne avec pour conséquence, le déchaussement des arbres (Ozer *et al.*, 2010; Ozer *et al.*, 2009). Le couvert végétal du terroir de Dano n'est pas en marge de ces effets et est donc soumise à la combinaison de facteurs naturels et anthropiques qui entraînent sa destruction. Mieux, l'expansion des activités extractives (or, latérite) et la forte croissance démographique constatés dans la localité, accentue le phénomène. En somme, la situation de la dynamique du couvert végétal au Sahel et à Dano semble peu réjouissante mais la prise de conscience constatée ces dernières décennies offre des lueurs d'espoir subsiste

Paramètres pouvant entraîner une dynamique évolutive du couvert végétal de la province du loba en 2055 selon le scénario optimiste.

Les projections faites de 2020 à 2055 indiquent que la superficie des formations naturelles telles que connaîtra des augmentations de 1,25% pour les forêts galeries et de 41,33% pour la savane arborée. Au même moment, les superficies occupées par les cultures annuelles et la savane arbustive connaîtront des baisses respectivement de 40,64% et de 3%. Ces résultats corroborent ceux de Ouédraogo (2013), Guelbéogo (2017) au centre sud, Youma (2021) au centre ouest et de Oloukoi (2013) au Bénin. L'équipe de Savadogo *et al.*, (2016a; 2016b), Gansaonré *et al.* (2020) ont constaté une reprise de la végétation dans le Sahel parce qu'ils ont observé un changement positif de la végétation et une dominance des arbustes. Selon cet auteur, cette situation s'explique d'une part par la prise de conscience des populations sur l'importance du rôle des plantes dans la fertilisation, la protection et la sécurité alimentaire; ce qui a entraîné l'adoption de nouvelles pratiques et l'application correcte d'autres techniques agro forestières conservatrices de l'environnement. D'autre part, il y a aussi l'impact positif des interventions des ONG, des acteurs communaux et des structures techniques de l'État à travers les sensibilisations, les formations et les patrouilles forestières. Dans la province du loba, ces actions ont été rencontrées, de ce fait, le couvert végétal de la localité d'étude peut également connaître une redynamisation d'ici 2055. L'étude a permis d'apprécier la dynamique d'abondance du couvert végétal de la province du loba sous plusieurs angles mais l'ambiguïté demeure quant à la dynamique de la diversité floristique car les deux ne vont pas forcément de pair; des études dans ce sens doivent donc être envisagées.

CONCLUSION

Le couvert végétal est le marché à ciel ouvert des populations africaines surtout celles rurales. Sa destruction pose la problématique de la survie des populations. Les facteurs imputables à cette dynamique sont à la fois naturels et anthropiques. La ressource subit simultanément l'indisponibilité permanente de l'eau, les fortes températures, les vents forts et permanents et la coupe-brûlis des plantes. Si cette tendance se maintient, le couvert végétal du terroir de Dano sera fort dégradé en 2055 mais si au contraire les comportements changent, on peut espérer une revitalisation de la végétation de la localité. Il serait intéressant que des études complémentaires axées sur les modes d'exploitation des végétaux soient menées afin de mieux comprendre et d'atténuer l'impact des activités anthropiques sur la dynamique du couvert végétal.

REFERENCES

AGBANOU B. T., PAEGELOW M., TOKO I. I., et TENTE B. (2018). Modélisation des changements d'occupation des terres en région Soudanaise au Nord-Ouest du Bénin. *European Scientific Journal*, Vol.14, N°12, pp 248-266.

AGNEW T. C., et CHAPPELL A. (1999). Drought in Sahel. *Geo Journal*, 48, pp. 299-311.

AKOUDJIN M., KIEMA S., SANGARE M., CESAR J., BOUYER J. et KABORE-ZOUNGRANA C. (2016). Influence des activités agricoles sur la végétation le long d'un gradient pluviométrique nord-sud du Burkina Faso. *VertigO*, Volume 16 (1), 16 p.

AKPO L., BANOIN M., et GROUZIS M. (2003). Effet de l'arbre sur la production et la qualité fourragère de la végétation herbacée : bilan pastoral en milieu sahélien, *Revue Méd. Vét.* 154 (10), pp. 619-628.

BEGUE A. (1993). Leaf area index, intercepted photosynthetically active radiation, and spectral vegetation indices : A sensitivity analysis for regular-clumped canopies. *Remote Sensing of Environment* (46), pp. 45-59.

BEGUE A., LEROUX L., LO SEEN D., TONNEAU J.-P., et MORANT P. (2016). Observation spatiale pour l'agriculture : potentiels et défis. *Notes techniques, CIRAD*, 185 p.

BENE A., et FOURNIER A. (2012). Végétation naturelle et occupation des terres au Burkina Faso (Afrique de l'Ouest). Cinq décennies de changement dans un terroir du pays sèmè. Actes du colloque international de Ouagadougou 8-10 mars : Regards scientifiques croisés sur le changement global et le développement ; langue, environnement, culture, pp 143-238.

BENENSON I., et TORRENS M. P. (2004). Géosimulation : Modélisation objet des phénomènes urbains. *Informatique Environnement et Systèmes Urbains*. 28 (1), pp. 1-8.

BENOUDJITA N., et IGNASSOU D. A. (2017). Comment les aires protégées structurent les écosystèmes des périphéries. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, Vol.11, N°5, pp. 2225-2242.

BOKO M., NIANG I., NYONG A., VOGEL C., GITHEKO A., MEDARY M., OSMAN-ELASHA, TABO R., et YANDA P. (2007). Africa. Climate change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the 4th Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. Van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK ; pp 433-467.

BOUKO S. B., DOSSOU J. P., AMADOU B. et SINSIN B. (2016). Exploitation des ressources biologiques et dynamique de la forêt classée de la Mékrou au Bénin. *European Scientific Journal*, Vol. 12 (36), pp. 228-244.

BUNASOLS. (2007). Etude morphopédologique des provinces de la Bougouriba et du loba/ Echelle : 1/100.000è. Rapport d'activité, ministère de l'Agriculture, Burkina Faso, 69 p.

BUSBY W. J., SMITH G. T., WHITE L. K., et STRANGE M. S. (2012). Localiser l'insécurité climatique : où sont les endroits les plus vulnérables en Afrique ? University of Texas, The Robert Strauss Center for International Security and Law, Climate Change and African Political Stability (CCAPS) : Austin, TX, USA, pp 463-511.

DIMOBE K., OUEDRAOGO A., SOMA S., GOETZE D., POREMBSKI S., et THIOMBIANO A. (2015). Identification of driving factors of land degradation and deforestation in the wildlife Reserve of Bontioli (Burkina Faso, West Africa). *Global Ecology and Conservation* 4, pp.559-571.

DIPAMA J.-M. (2011). Les risques de dégradation des écosystèmes liés à la culture du coton au Burkina Faso : le cas du parc national de Pô. *Revue de l'Université de Moncton*, Vol. 40 (2), pp.29-52.

DUBOS-PAILLARD E., et LANGLOIS P. (2005). Modéliser et simuler l'évolution urbaine par automate cellulaire avec spacle. Colloque international "Fabrique de la ville et mutations des formes d'urbanité", Université des sciences et de la technologie d'Oran, Oran, Algérie, 13 p.

- ELITH J., et LEATHWICK R. J. (2009). Modèle de distribution des espèces : explications et prédiction écologique dans l'espace et dans le temps. *Revue annuelle d'écologie, d'évolution et de systématique*, vol. 40, pp. 677-697.
- GANSAONRE R. N., ZOUNGRANA B., J-B., et YANOGO P. I. (2020). Dynamique du couvert végétal à la périphérie du Parc W du Burkina Faso. *Belgeo*[En ligne]. URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/40786>, DOI : <https://doi.org/10.4000/belgeo.40786>.
- GBESSO F.H. G., TENTE A.H. B., GOUWAKINNOU G.N. et SINSIN A. B. (2013). Influence des changements climatiques sur la distribution géographique de *Chrysophyllum albidum* G. Don (Sapotaceae) au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 7(5), pp. 2007-2018.
- GUELBEOGO S. (2017). Dynamique des ressources naturelles dans le bassin versant du lac Bam. Mémoire de master en géographie, Université Ouaga I/Professeur Joseph Ki-Zerbo, 108 p.
- 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* 32 : pp.235-239.
- HADONOU-YOVO G. A., HOUSSOU G. L., LOUGBEGNON O. T., ADEBI Y., SINASSON S.K. G., SEMEVO F. D., et BOKO M. (2019). Diversité et formes d'utilisation des espèces ligneuses de la Réserve de biosphère du Mono (Bénin). *Vertigo*, Volume 19 (2).
- HERRMANN M. S., ANYAMBA A., et TUCKER J. C. (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, Vol.15, Issue 4, pp. 394-404.
- Institut Géographique du Burkina. (2014). Bases de données spatiales, Burkina Faso
- Institut National des Statistiques et de la Démographie. (2022). Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation du Burkina Faso : Fichier des localités du 5e RGPH ; Ministère de l'Economie, des Finances et du Plan ; Burkina Faso ; 366p.
- KABORE O., OUEDRAOGO B., SAWADOGO I. (2019). Facteurs de fragmentation et stratégies de gestion des massifs forestiers au Burkina Faso. *J. Appl. Biosci.* 133, pp. 13516-13531.
- LANGLOIS P. (2001). Le modèle SpaCell. Base de données du Groupe Modèles du GDR Libergéo, pp. 111-125
- Ministère de l'Agriculture, de l'hydraulique et des ressources halieutiques. (2009). Projet d'amélioration de la productivité et de la sécurité alimentaire (PAPSA) : Cadre de gestion environnementale et sociale (CGES), Rapport d'activité, Burkina Faso, 112 p.
- MOUZOUN S., LOUGBEGNON O. T., et CODJIA C.T. J. (2018). Etudes de quelques aspects écologiques de *Hystrix cristata* dans les réserves de biosphère du Bénin. *Journée de la renaissance scientifique de l'Afrique : Actes de la semaine scientifique*, pp. 181-191.
- OLOUKOI J. (2013). Scénario socioéconomique et écologique des changements de l'occupation des terres au Bénin. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 13 Numéro 1 | avril 2013, mis en ligne le 16 avril 2013, consulté le 14 juin 2013. URL : <http://vertigo.revues.org/13267>.
- OLOUKOI J., MAMA J. V., et AGBO B.F. (2007). Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le Département des Collines au Bénin. *Télé-détection*, Volume 6, Numéro 4, pp. 305-323.
- OREKAN V.O. A. (2007). Implementation of the local land-use and land-cover change model CLUE-s for Central Benin by using socio-economic and remote sensing data. PhD Thesis, University of Bonn, 204 p.
- OUEDRAOGO B., OUEDRAOGO L. et KABORE O. (2015). Fragmentation de l'espace et conflits d'usage au Sahel : cas du bassin versant de Yakouta (Burkina Faso). *Int. J. Biol. Sci.* 9 (6), pp. 2727-2739.
- OUBA A. P., DA D. E. C. et PARE S. (2014). Perception locale de la dynamique de peuplement ligneux des vingt dernières années au Sahel burkinabé. *Vertigo*, vol. 14 (2), 13 p.
- OZER P., HOUNTONDI Y-C., et LAMINO M. O. (2009). Evolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop*, 33, pp. 11-30.
- OZER P., HOUNTONDI Y-C., NIANG A. J., KARIMOUNE S., LAMINO M. O., et SALMON M. (2010). Désertification au Sahel : Historique et perspectives. *BSGL*, 54, pp. 69-84.
- PALÉ S., YAMÉOGO A., SOMÉ N. J., TRAORÉ D. (2020). de la naissance des badlands à la désertification, un processus érosif complexe à Sabtenga au BURKINA FASO. *GéoVision* N° 003, Volume 1, pp.59-75.
- PHILIPPON N., RICHARD Y., et MARTINY N. (2008). Impact des précipitations sur l'activité photosynthétique de la végétation en Afrique semi-aride sub-saharienne. *Journées de climatologie-Nantes*, 13-14 mars 2008-Climat et société : Climat et végétation, pp. 77-90.
- PUYRAVAUD J-P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177, 1-3, pp. 593-596.
- REIJ C., et BOTONI E. (2009). La transformation silencieuse de l'environnement et des systèmes de production au Sahel : Impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles, Univ. Libre, Amsterdam, 61 p.
- SAVADOGO O. M., OUATTARA K., OUEDRAOGO I., SAWADOGO/KABORE S., TRAORE M., BARRON J., GORDON L., PARE S. et ZOMBRE N. P. (2016). Vegetation improvement and soil biological quality in the Sahel of Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 10 (3), pp. 1048-1058.
- SAVADOGO O. M., OUATTARA K., PARE S., OUEDRAOGO I., SAWADOGO/KABORE S., BARRON J. et ZOMBRE N. P. (2016). Structure, composition spécifique et diversité des ligneux dans deux zones contrastées en zone sahélienne du Burkina Faso. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 16 (1).
- SAWADOGO H., BOCK L., LACROIX D., et ZOMBRE N. P. (2008). Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zai et du compost dans le Yatenga (Burkina Faso), *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 12 (3), pp. 279-290.
- SCHULZ J. J., CAYUELA L., ECHEVERRIA C., SALAS J., MARI J. et BENAYAS R. M. J. (2010). Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975-2008). *Applied Geography*, 30, pp. 36-447
- SOMÉ N. J., KONKOBO J., IDANI T. F., SOMÉ Y. S. C. (2021). Dynamique des unités physiogéographiques dans les aires protégées au Burkina Faso : cas de la périphérie du parc w. *L'ongbowu*, N° 012, Vol. 2, pp. 345-357.
- SOME N. J., SOME Y.S. C., IDANI T. F., et KONKOBO J. (2021). Impact de la dynamique d'occupation des terres sur la distribution spatiale de *Strophanthus hispidus* dans la province du loba au sud-ouest du Burkina Faso, *SLC* n°15, pp. 324-344.
- TANKOANO B., HIEN M., DIBI H. N., SANON Z., YAMEOGO T. J. et SOMDA I. (2015). Dynamique spatio-temporelle des savanes boisées de la forêt classée de Tiogo au Burkina Faso, *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 9 (4), pp.1983-2000.

- TOUTAIN B., et ROBERGE G. (1999). Cultures fourragères tropicales, Collection : Repères-CIRAD, ISSN 1251-7224, Montpellier : CIRAD, 369 p.
- YAMEOGO A, SOME Y.S. C et PALE S. (2021). Application de SIG/RUSLE à l'estimation de l'érosion par ruissellement en nappe dans le bassin versant supérieur de la Sissili (Burkina Faso). *Geo-Eco-Trop.*, Vol 45 (2), pp. 299-310.
- YOUUMA Y. (2021). Services écosystémiques de la forêt classée de Tiogo en déforestation au Burkina Faso ; Mémoire de master en Géographie : Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso, 112 p.
