

Dynamiques des paysages régionaux en zone cotonnière du Mali

S. Dembele^{1*}, M. Soumare¹, C.H. Diakite² & D. Gaillard³

Keywords: Landscape dynamics- Biodiversity- Land use- Spatial analysis- Landscape index- Mali

Résumé

Au cours de ces dernières décennies, les activités humaines, en particulier l'agriculture, ont conduit à la transformation progressive d'une très grande partie de la surface terrestre. Dans la zone cotonnière du Mali, cette pression anthropique est relativement importante à cause d'un essor de la culture cotonnière depuis trois décennies. Cette étude menée dans la nouvelle zone cotonnière fait une analyse de la structure et de la dynamique de la diversité paysagère. En plus du traitement numérique des images satellites, la méthodologie utilisée s'est basée sur des calculs de métriques paysagères utilisant le logiciel Fragstats pour la quantification de la structure à l'échelle de la tâche, et cela au sein d'une même catégorie de tâches et à l'échelle globale du paysage. On remarque à l'échelle des classes d'occupation, une hétérogénéité surtout liée à l'augmentation de la proportion du paysage occupé par la zone agricole qui passe en 30 ans de 21,92% à 36,57% au détriment de la savane arborée qui perd 21,57% de sa surface. Au niveau de la dynamique paysagère, l'introduction de la culture du coton dans cette zone dans les années 90 a significativement contribué à une augmentation de plus de 260 km² de la zone de culture.

Summary

Regional Landscapes Dynamics in Cotton Zone of Mali

In recent decades, human activities, particularly agriculture, have led to the gradual transformation of a very large part of the earth's surface. In the Mali cotton zone, this human pressure is relatively high due to an increase in cotton and livestock over the past three decades. In addition to the digital processing of satellite images, the methodology was based on calculations of landscape metrics using the Fragstats software for the quantification of the structure at the scale of the task, and this within the same category of tasks and at the global scale of the landscape. At the level of occupancy classes, heterogeneity is observed mainly related to the increase of the proportion of landscape occupied by the agricultural zone which passed in 30 years from 21.92% to 36.57% to the detriment of the wooded savannah which lost 21.57% of its surface. In terms of landscape dynamics, the introduction of cotton cultivation in this area in the 1990s contributed significantly to an increase of more than 260 km² in the cultivated area.

¹Faculté d'Histoire et de Géographie, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Mali.

²Institut d'Economie Rurale (IER), Mali.

³Université de Caen-Normandie France.

Introduction

L'occupation des terres est une variable fondamentale pour la planification régionale, ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement (12). Selon le même auteur, cette thématique est devenue incontournable dans la plupart des inventaires cartographiques et de suivi des phénomènes environnementaux.

Au cours de ces dernières décennies, les activités humaines en général et particulièrement les activités agricoles ont conduit à la transformation progressive d'une très grande partie de la surface terrestre (2). Dans la zone cotonnière du Mali, la pression anthropique est relativement importante à cause d'un essor de cette culture et de l'élevage depuis trois décennies (6).

En effet, la superficie des champs cultivés a augmenté continuellement au cours des cinquante dernières années (6) au détriment des formations végétales d'origine. Selon le même auteur, en 1998, l'espace agricole est quasi saturé dans la plupart des terroirs. Pendant la période 1952-1990, le rythme annuel de défrichement agricole a été de 6%, provoquant une régression considérable de l'espace forestier dont les jachères (6).

Tout comme l'expansion agricole, la croissance démographique très rapide. Cette dernière s'est intensifiée à partir des années 1980 (avec un taux de près de 4%), témoignant d'un fort dynamisme économique induit par la production cotonnière (8). La présente étude a été conduite dans la zone de Kita-centre. Cette dernière constitue le cœur de la culture cotonnière dans la nouvelle région CMDT. On a assisté à l'émergence d'un nombre important d'exploitations agricoles équipées (charrue, bœuf de labour, semoir..etc), qui ont placé le coton au cœur de leur système (près de 50%). Dans cette zone, une bonne partie des exploitations agricoles n'est pas encore équipée. Le paysage est fortement marqué par les fronts d'extension de l'agriculture. Cette extension est très forte sur deux axes : Centre-Nord et Centre-Ouest. C'est la région la plus dynamique en termes d'augmentation des surfaces cultivées dans les zones cotonnières du Mali (12).

Dans l'ensemble, c'est le système agraire ancien à culture et jachère qui prédominait dans les nouvelles zones cotonnières, et les systèmes de culture restent encore principalement basés sur le sorgho et l'arachide. Les terres arables sont très abondantes. Dans les parties occidentales et australes, les cultures s'installent sur les flancs des collines certainement à cause des difficultés pour cultiver les terres lourdes si l'on ne dispose pas des équipements nécessaires. Les agriculteurs arrivent à des rendements en coton élevés (1300 kg/ha) sur les sols gravillonnaires du haut glacis.

En dehors de la couronne cotonnière et de diversification autour de la ville de Kita, les potentialités d'extensions agricoles sont réelles mais les agriculteurs semblent souffrir de la faiblesse des moyens de production et de l'enclavement. La nouvelle zone cotonnière est aussi une région favorable à l'élevage.

Matériels et méthodes

Présentation de la zone d'étude

L'étude a été conduite dans la nouvelle zone cotonnière du Mali dans le cercle de Kita, sur une zone appelée par la CMDT «Kita-centre». Cette dernière regroupe 12 communes qui sont Kassaro, Sébékoro, Senko, Badia, Benkadi-founa, Bendougouba, commune de Kita, Kita-Ouest, Kita-Nord, Boudofo, Djidian et Souransan tomoto (figure 1). La zone d'étude couvre une superficie d'environ 6 317 km² et est caractérisée par un climat de type Soudanien avec des moyennes annuelles de pluie oscillant autour de 900 mm. L'année est divisée en deux saisons. La première est la saison des pluies de juin à octobre. La seconde est la saison sèche d'octobre à juin. Elle commence avec l'harmattan (vent sec frais et poussiéreux). Le relief est relativement accidenté, avec des plateaux cuirassés. La végétation naturelle est dominée par les savanes (arborée et boisée) et est riche en essences floristiques.

La zone est drainée dans sa partie Est par le Baoulé sur environ 50 km et à l'Ouest sur 2 km par le Bakoye un affluent du fleuve Sénégal. Selon les résultats du recensement général de la population et de l'habitat de 2009, la zone était peuplée de 191049 habitants (7). La population est composée de malinkés (majoritaires), de bambaras peulhs et de Sarakolés.

Cartographie d'occupation du sol

Les méthodes d'interprétation visuelle et de classification supervisée des images, qui permettent de caractériser les principaux objets présents : sols, végétations, eaux, etc., d'une manière fidèle, systématique et exhaustive par leur comportement spectral (8) ont été adoptées pour la cartographie de l'occupation des sols. La réalisation de la carte a été faite suivant un certains nombres d'étapes.

Acquisition des images satellitaires

Les images avec lesquelles nous avons eu à travailler ont été acquises par téléchargement sur un site internet officiel dont le lien est le suivant: "<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/landsat/>."

Il est nécessaire de connaître les références de la zone (longitude/latitude, numéro de scène, nom de la zone, date de prise de vue) selon vos besoins. Ces références ont été acquises grâce à un fichier image contenant certaines scènes des satellites Landsat.

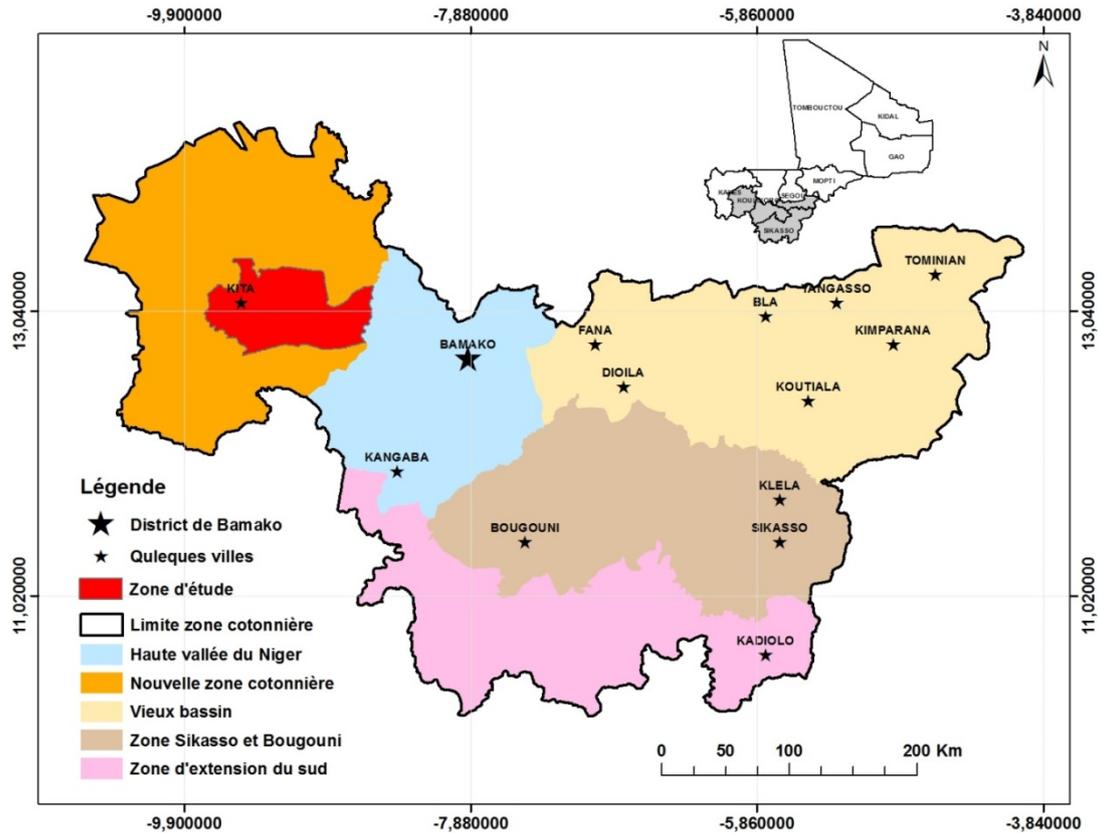


Figure 1: Localisation de la zone Kita-Centre dans la zone cotonnière du Mali.

Importation et combinaison des bandes pour créer une image

Les images satellites (Landsat) sont fournies sous forme de bandes individuelles en format Geotiff. Ces bandes individuelles (Landsat) doivent être importées puis combinées afin de constituer une image multi spectrale.

Dans le cas d'une image Landsat on peut importer les bandes une à une, puis les combiner ce qui constitue une perte de temps. L'importation et la combinaison des bandes Landsat peut se faire en une seule opération. C'est cette méthode qui a été adaptée pour notre étude où cinq bandes ont été combinées, il s'agit de la bande 1, 2, 3, 4, 5.

Extraction de la limite de la zone d'étude dans Image L' image Landsat couvre une superficie de 180*180 km pour une résolution au sol de 30 m. Si la zone d'intérêt n'est pas aussi grande que l'image, il serait utile d'extraire la zone de l'image afin d'accélérer le processus de traitement.

Composition colorée

Pour mieux apprécier la couverture végétale d'une zone, l'occupation du sol, la composition colorée est d'un grand intérêt visuel. Il est important de noter que pour visualiser les images les seules dimensions possibles sont le rouge (R), le vert (V) et le bleu (B), ces couleurs sont appelées couleurs primaires. Généralement pour des thèmes relatifs à l'occupation des sols et à la couverture végétale du sol, la composition colorée est une combinaison de trois bandes notamment, une dans le rouge une bande dans le vert et une autre dans le bleu. Dans le cadre de cette étude, tous les deux types de composées couleurs ont été utilisées: une composition colorée dite « vraies couleurs » et une autre dite « fausses couleurs ».

Une image est en composition colorée vraies couleurs si les objets vus sur l'image ont la même couleur que dans la réalité.

Exemple: couleur Verte pour la végétation; couleur bleue pour l'eau...

Une image est en composition colorée fausses couleurs, si les objets vus sur l'image n'ont pas la même couleur dans la réalité.

Exemple: couleur Noire pour l'eau, Couleur rouge pour la végétation....

NB: nous devons noter qu'il existe plusieurs compositions colorées fausses couleurs et que c'est l'utilisateur qui effectue un choix de composition fausses couleurs pour mieux interpréter et analyser les images.

Définition de zones d'entraînement pour la classification supervisée

Cette phase à consister dans un premier temps à la numérisation de la carte du Projet d'inventaire des ressources ligneuses (PIRL) sur la zone d'étude. Rappelons que le PIRL est une base de données qui fournit une étude cartographique de la formation végétale et de l'occupation agricole des terres dans la partie du territoire national du Mali situé au sud du parallèle 17° 30'. Cette carte nous a permis d'avoir des certitudes sur les différentes formations végétales sur ces zones.

Classification supervisée ou assistée par ordinateur

La bonne compréhension de la classification passe par la définition de certains termes à savoir: «Le pixel»: c'est la plus petite surface homogène constitutive d'une image. Aussi appelée cellule de résolution. Le pixel est défini par sa position en lignes et en colonnes dans une image et par sa valeur (couleur).

Le postulat de base de la télédétection est que tout objet (ou classes d'objets) sur la surface terrestre possède sa propre «empreinte digitale» dans le spectre électromagnétique et ce en fonction de la longueur d'onde du rayonnement qui est réfléchi ou émise par celui-ci. Dans le jargon de la télédétection, on appelle cette empreinte: «signature spectrale». «Classes spectrales»: Les classes spectrales sont des groupes de pixels qui ont les mêmes caractéristiques (ou presque) en ce qui a trait à leur valeur d'intensité dans les différentes bandes spectrales des données.

Les opérations de classification et d'analyse d'image sont utilisées pour identifier et classer numériquement des pixels sur une image.

La classification numérique des images utilise l'information spectrale contenue dans les valeurs d'une ou de plusieurs bandes spectrales pour classer chaque pixel individuellement. Lorsqu'on parle de classes, il faut faire la distinction entre des classes d'information et des classes spectrales. «Les classes d'information ou les thèmes» sont des catégories d'intérêt que l'analyste tente d'identifier dans les images, comme différents types de cultures, de forêts ou d'espèce d'arbres, différents types de caractéristiques géologiques ou de roches, etc. L'objectif ultime de la classification est de faire la correspondance entre les classes spectrales et les classes d'information.

Il est rare qu'une correspondance directe soit possible entre ces deux types de classes.

Des classes spectrales bien définies peuvent

apparaître parfois sans qu'elles correspondent nécessairement à des classes d'information intéressantes pour l'analyse. D'un autre côté, une classe d'information très large (par exemple la forêt) peut contenir plusieurs sous-classes spectrales avec des variations spectrales définies.

Vectorisation et calcul de superficie des unités d'occupation

Pour rendre beaucoup plus maniable et facilité le reste du traitement, les résultats des classifications ont été convertis en mode vecteur afin de procéder aux différentes calculs de surface.

Phase de validation

A défaut d'aller sur le terrain pour cette étude, la phase de validation a été effectuée en confrontant les résultats issus de notre classification avec les données de la cartographie d'occupation du sol du projet ILIWAC. Ce projet à réaliser une cartographie de l'occupation du sol sur toute l'étendue du territoire national sous forme d'atlas et ces cartographies constituent une base solide en matière d'occupation du sol.

NB: il y'a très souvent de confusion entre la savane arborée et la savane boisée dans l'interprétation cela est dû au fait que ces deux formations végétales se ressemblent beaucoup. et le critère de différenciation important pour l'interprétation est la densité (Tableau 2).

Analyse de la dynamique du paysage

La dynamique de l'occupation du sol peut être définie comme l'évolution dans le temps et l'espace des classes d'occupation du sol, soit vers un stade de dégradation ou d'amélioration, soit vers un état d'équilibre plus ou moins stable (1). Elle rend compte de l'ensemble des variabilités spatio-temporelles. L'étude de la dynamique du paysage à travers l'imagerie satellitaire constitue un élément important dans la gestion des ressources naturelles et le suivi des changements environnementaux. Elle permet de décrire et de quantifier les changements intervenus dans le temps et l'espace d'une unité d'occupation des sols. Cette présente analyse de la dynamique des paysages de la zone cotonnière s'est faite à partir des images satellitaires de trois dates 1985, 2000 et 2015. Ces scènes Landsat, d'une résolution de 30 m ont été utilisées pour déterminer la dynamique de l'occupation du sol. Il s'agit d'une image Landsat TM (Thematic Mapper) acquise le 04 Mars 1985, une image Landsat ETM+ du 10 Mars 2000 et une image Landsat 8 OLI (Opérationnel Land Imager) du 19 Mars 2015.

Analyse statistique

Pour quantifier la dynamique d'occupation des paysages, La méthode de taux d'expansion proposée par (7) a été utilisée. La méthode a consisté à calculer le taux d'expansion à partir de l'équation 1. $T = \text{taux}$,

$$T = S2 - S1 \quad (1)$$

$S1 =$ superficie année 1 et $S2 =$ superficie année 2.

La variable considérée ici est la superficie (S). Les valeurs positives représentent une progression de la superficie de la classe durant la période analysée et les valeurs négatives indiquent la perte de superficie entre les deux dates. Les valeurs proches de zéro indiquent que la classe reste relativement stable entre les deux dates.

L'analyse quantitative de la structure du paysage intègre toute une série de métriques issues de l'écologie du paysage. Ces métriques sont calculées sur le logiciel Fragstats © pour la quantification de la structure à l'échelle de la tache (patch), d'une même catégorie de tache et à l'échelle globale du paysage (4). Leur principale finalité consiste de recréer des structures paysagères et leur dynamique dans le temps, ainsi que d'évaluer les fonctions et les processus écologiques qui s'y déroulent (9).

Certaines de ces métriques sont utilisées dans la mesure de la composition du paysage (présence et abondance de taches ou de types de taches) pendant que quelques autres sont appliquées à la mesure de la structure du paysage (distribution et arrangement spatial des taches (3)).

Pour mesurer la composition et la configuration de la structure paysagère, les cartes d'occupation du sol 1985, 2000 et 2015 ont été transformées en format grid (raster) avec une taille du pixel de 30 m correspondant à la résolution spatiale des images Landsat. Puis, les cartes en format grid ont été à leurs tours convertis en format ASCII (format texte). C'est ces derniers qui ont été importés dans le logiciel Fragstats. Sur ce logiciel, les indices adaptés aux objectifs du travail ont été sélectionnés et calculés. Le tableau 1 présente les indices choisis, le niveau d'analyse où ils ont été appliqués et leurs descriptions.

Résultats et discussion

Analyse quantitative de la structure du paysage: Composition et configuration

Pour caractériser la composition et la configuration, plusieurs métriques du paysage ont été calculées à partir de la couche d'occupation du sol.

Ces métriques ont été regroupées en fonction des différents processus écologiques à mesurer:

Composition, diversification; fragmentation; agrégation/désagrégation.

Mesure de la composition

Pour mesurer la composition du paysage, un certains nombres d'indices a été calculés aussi bien à l'échelle des classes d'occupation du sol qu'à celle du paysage dans sa globalité. Les indices calculés à l'échelle du paysage sont présentés dans le tableau 3. Ce sont: le Nombre de tache (Number of patches NP), la richesse des taches (Patches Richness PR) et l'indice de diversité de Shannon (Shannon Diversity Index SHDI) qui est l'indice le plus utilisé dans l'analyse du paysage en écologie. Pour l'échelle de la classe ; en plus du nombre de taches, les indices de superficie de la classe CA, le pourcentage du paysage PLAND et l'indice de largesse des taches LPI qui mesure la surface de la tache la plus grande pour chaque type d'occupation du sol. Tableau 3 (3.2).

Si nous regardons les résultats d'analyse à l'échelle du paysage dans sa globalité, nous remarquons que le nombre de taches à augmenter de plus de 74% entre 1985 et 2015 ce qui démontre une tendance à l'hétérogénéité. Quant à la richesse, elle est restée constante durant la période d'étude. L'indice de diversité de Shannon confirme l'hétérogénéité avec des valeurs différentes de 0.

Les résultats d'analyse au niveau des classes révèlent que cette hétérogénéité est surtout liée à l'augmentation de la proportion (PLAND) du paysage occupé par la zone agricole qui passe de 21.92 % à 36,57 % en 30 ans au détriment de la savane arborée qui perd 21.57 % de sa surface. La taille moyenne de la surface (LPI) de la zone de culture augmente considérablement de 9,28 % à 21.62 % tandis que celle de la savane arborée diminue de façon importante de 8,97 à 0,33 %. Pour les autres classes que sont la Savane boisée, la forêt galerie et l'eau, seul l'eau a perdu une très grande partie de sa surface entre 1985 à 2015 comme en témoigne ses indices (PLAND 0.61% en 1985, 0.04% en 2015) et (CA qui passe de 6059 à 412) pour les mêmes périodes.

Tableau 1
Indices de structure et de composition du paysage.

	Indice	Niveau	Unités	Description
Composition du paysage	CA	Classe	Hectares	mesure la surface occupée pour chaque type d'occupation du sol.
	PLAND	Classe	Pourcentage	mesure la proportion du paysage occupé par des types d'occupation du sol. PLAND donne une idée de dominance des types d'occupation.
	LPI	Classe	Pourcentage	mesure la surface de la tache la plus grande pour chaque type d'occupation du sol. LPI indiquent une forte dominance d'une tache unique.
	NP	Classe/Paysage	Nombres	Nombre de taches au niveau des classes et au niveau du paysage.
	SHDI	Paysage	Valeur	SHDI mesure l'hétérogénéité du paysage combinant la richesse et la régularité. Une valeur égale à 0 indique un paysage homogène.
	PR	Paysage	Nombres	PR mesure le nombre de types d'occupation du sol présent dans le paysage. PR augmente si le paysage accroisse son hétérogénéité.
Structure du paysage/Fragmentation	PD	Classe	Nombre par 100 hectares	mesure le nombre et la densité de taches conformant un type d'occupation du sol. Ces valeurs augmentent si le paysage se présente de plus en plus fragmenté.
	MPS SD CV	Classe	Hectares	MPS mesure la surface moyenne des taches conformant une classe. Cette valeur diminue en tant le paysage se présente de plus en plus fragmenté. SD et CV mesurent la variabilité de la taille des taches par rapport à la moyenne. Petites valeurs de variabilité indiquent des paysages uniformes. Ces mesures servent à comparer les variations dans le temps.
	SHAPE	Classe	Valeur	Valeur moyenne de la forme des taches composant une classe
	ED	Classe / Paysage	Mètres par hectare	ED mesure la densité des contours des taches conformant des types d'occupation du sol. Hautes valeurs de ED accompagnées par faibles valeurs de surface indiquent une haute fragmentation du paysage en plusieurs petites taches
Agrégation	AI	Classe / Paysage	Valeur	AI mesure l'arrangement spatial des taches correspondantes aux types d'occupation du sol. Une valeur AI élevée indique des unités adjacentes et donc des taches agrégés.
	IJI	Classe / Paysage	Valeur	IJI mesure l'adjacence entre types d'occupation du sol différents. Une valeur IJI égale à 100 indique une classe adjacente avec toutes les autres classes.
	CONTAG	Paysage	Valeur	CONTAG mesure l'agrégation des taches au niveau du paysage. Hauts indices de contagion conduisent à la colonisation et à la diffusion potentielle des perturbations

CA (Class area); PLAND (Percentage of Landscape); LPI (Largest Patch Index); NP (Number of Patches); PR (Patch Richness); SHDI(Shannon Diversity Index); PD (Patch Density); MPS (Mean Patch Size); SD (Standard Deviation); CV (Coefficient of Variation); ED (Edge Density); AI (Aggregation Index); IJI (Interspersion/Juxtaposition Index); CONTAG (Contag)

Source: D'après Casado, 2007

Tableau 2
Description des classes d'occupation du sol.

Classes	Définition
Eau	Cours d'eau temporaire ou permanent tel que les rivières, les bas-fonds inondés ou les ravins.
Galerie	Végétation à couvert fermé, de stature moyenne, constituée de plusieurs strates qui forment un couloir de verdure accompagnant les cours d'eau permanents et temporaires ou les dépressions de terrain en zone de savane.
Savane arborée	Les arbres et arbustes sont disséminés parmi le tapis graminéen. Ils sont moyennement nombreux et atteignent 6 à 8 m de hauteur, exceptionnellement plus La hauteur dominante est supérieure à 7m.
Savane boisée	Arbre et arbuste y forment un couvert généralement clair qui laisse largement pénétrer la lumière. La hauteur de la strate arborescente est de 8 à 13m, exceptionnellement plus. Les arbres y sont plus nombreux qu'en savane arborée. Le volume moyen est supérieur à 20m ³ /ha et la hauteur dominante supérieure à 7m. (source Normes Techniques d'Inventaire forestier, DNEF-Mali).
Zone de Culture	Ce sont des domaines de production agricole associés aux arbres utiles. Cultures liées exclusivement aux pluies (mil, sorgho, maïs, arachide, Niébé, fonio, voandzou, etc.)

Tableau 3
Indices de la composition du paysage.

Tableau 3.1
Niveau d'analyse: Paysage.

Années	NP	PR	SHDI
1985	34657,00	5,00	1,43
2000	57862,00	5,00	1,42
2015	62657,00	5,00	1,35

Tableau 3.2
Niveau d'analyse: Classe.

Années	Zone de Culture				Savane arborée				Savane boisée			
	NP	CA	PLAND	LPI	NP	CA	PLAND	LPI	NP	CA	PLAND	LPI
1985	8882	217019	21,9	9,3	10662	279011	28,1	8,9	9961	85362	8,6	0,38
2000	9934	242633	24,5	10,4	21274	247123	24,9	7,9	17818	97393	9,8	1,9
2015	7750	361950	36,6	21,6	36082	65872	6,6	0,3	12018	151534	15,3	3,54

Années	Galerie				Eau			
	NP	CA	PLAND	LPI	NP	CA	PLAND	LPI
1985	4345	37971	3,84	1,29	803	6059	0,61	0,09
2000	8598	37351	3,77	0,2	234	922	0,09	0,01
2015	6666	45653	4,61	0,23	137	412	0,04	0,01

NP (Number of Patches); PR (Patch Richness); SHDI (Shannon Diversity Index, CA (ha) (Class area); PLAND (%) (Percentage of Landscape); LPI (%) (Largest Patch Index);

Tableau 4
Indices de Fragmentation de 1985, 2000 et 2015;

Années	Zone de Culture				Savane arborée				Savane boisée			
	NP	MPS	CV	ED	NP	MPS	CV	ED	NP	MPS	CV	ED
1985	8882	24,43	4070	18,68	10662	26,17	4257	25,51	9961	8,57	791	13,53
2000	9934	24,42	4670	23,57	21274	11,62	5188	27,41	17818	5,47	2860	18,75
2015	7750	46,7	5498	25,67	36082	1,83	1280	22,01	12018	12,61	2932	22,55

Années	Galerie				Eau			
	NP	MPS	CV	ED	NP	MPS	CV	ED
1985	4345	8,74	2310	5,78	803	7,55	529	1
2000	8598	4,34	816	8,11	234	3,94	214	0,25
2015	6666	6,85	674	7,81	137	3	216	0,13

NP (Number of Patches) ; MPS (Mean Patch Size); CV (Coefficient of Variation); ED (Edge Density).

Tableau 5
Indices d'Agrégation / Désagrégation du paysage de 1985, 2000 et 2015.

Tableau 5.1
Echelle d'analyse: Paysage.

Année	AI	IJI	CONTAG	ED
1985	95,15	54,56	54,33	32,53
2000	94,13	59,64	53,43	39,32
2015	94,12	59,31	55,59	39,36

Tableau 5.2
Echelle d'analyse: Classe.

Années	Zone de Culture				Savane arborée				Savane boisée			
	AI	IJI	ED	SHAPE	AI	IJI	ED	SHAPE	AI	IJI	ED	SHAPE
1985	93,6	37,4	18,6	1,3	93,2	49,1	25,5	1,3	88,3	55,2	13,5	1,35
2000	92,8	48,5	23,5	1,2	91,8	62,6	27,4	1,2	85,7	66,4	18,7	1,3
2015	94,7	62,4	25,6	1,3	75,2	47,3	22	1,2	89	67,3	22,5	1,38

Années	Galerie				Eau			
	AI	IJI	ED	SHAPE	AI	IJI	ED	SHAPE
1985	88,85	74,81	5,78	1,32	88,09	47,68	1	1,31
2000	84,01	60,05	8,11	1,27	80,47	68,47	0,25	1,34
2015	87,43	54,56	7,81	1,28	77,06	55,32	0,13	1,34

AI (Aggregation Index); IJI (Interspersion/Juxtaposition Index); ED (Edge Density) SHAPE (Valeur moyenne de la forme des taches).

Tableau 6

Changements à l'échelle du paysage entre 1985 et 2000.

Classes occupation	Surface en km ² 1985	Surface en km ² 2000	Différence entre 1985 et 2000	Taux d'expansion entre 1985 et 2000
Eau	60,25	9,16	-51,09	-0,81
Galerie	378,9	371,07	-7,83	-0,13
Savane arborée	2 793,67	2 472,72	-320,96	-5,13
Savane boisée	852,14	971,66	119,53	1,91
Zone de Culture	2 169,02	2 429,37	260,35	4,17

Tableau 7

Changements à l'échelle du paysage entre 2000 et 2015.

Classes occupation	Surface en km ² 2000	Surface en km ² 2015	Différence entre 2000 et 2015	Taux d'expansion entre 2000 et 2015
Eau	9,16	5,22	-3,94	-0,06
Galerie	371,07	582,11	211,04	3,38
Savane arborée	2 472,72	989,62	-1483,1	-23,71
Savane boisée	971,66	1718,87	747,21	11,95
Zone de culture	2 429,37	2 957,00	527,63	8,45

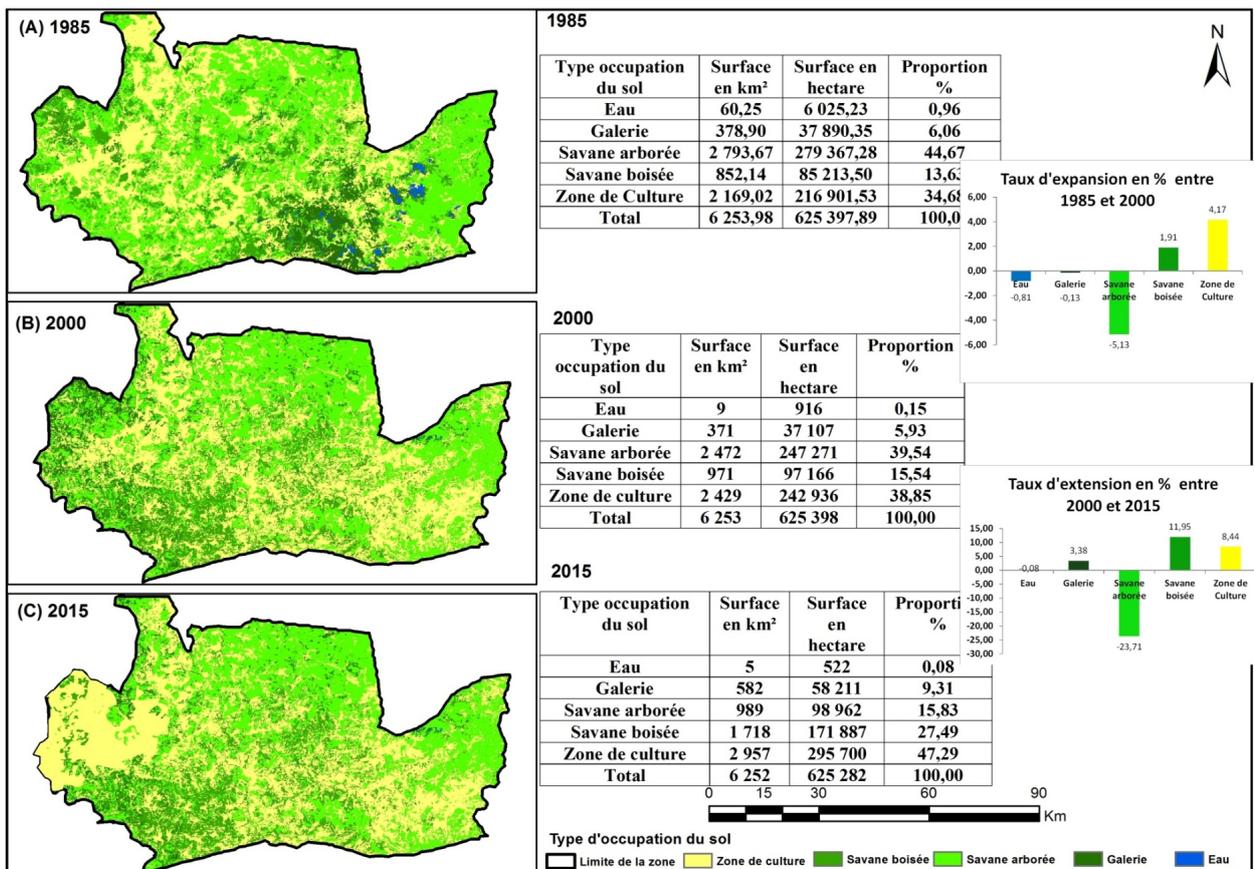


Figure 2: Distribution spatiale des types d'occupation du sol de (A) 1985, (B) 2000 et (C) 2015. Surfaces et Proportion du paysage représentée par chaque type et taux d'expansion des unités paysagères.

Mesure de la fragmentation

A l'échelle des classes d'occupation du sol s'observe un processus global de fragmentation (Morcellement) du paysage (Tableau 4). Nous avons mesuré cette fragmentation à l'aide de la comparaison entre trois indices notamment le nombre de taches NP, la surface moyenne MPS et la densité des contours des taches qui forment les types d'occupation du sol ED. La comparaison entre NP, MPS et ED de la zone culture et les végétations naturelles (Savane arborée, boisée et la galerie forestière) tout en long de la période d'étude indique une augmentation progressive des surfaces moyennes de la zone de culture accompagnées d'une réduction importante du nombre de taches entre 2000 et 2015. Ceci montre une certaine connectivité des zones agricoles. Par contre la savane arborée dont la surface moyenne passe de 26.17 en 1985 à 1.83 en 2015, conjuguée à une augmentation de près de 70% du nombre de taches indique un fort haut degré de fragmentation.

Mesure de l'agrégation

La configuration de la structure du paysage est mesurée par rapport aux processus d'agrégation / désagrégation des types d'occupation du sol (Tableau 5.1 et 5.2).

Ces processus déterminent les potentialités d'expansion entre des types différents. A l'échelle du paysage (tableau 5.1), on observe une forte agrégation des classes en taches compactes (AI) ainsi qu'une moyenne adjacence entre classes différentes (IJI).

A l'échelle de la classe (Tableau 5.2), ces résultats sont encore plus représentatifs. L'indice d'agrégation (AI) indique une forte compacité des taches pour la plupart des types d'occupation du sol, caractéristique qui ne reflète pas de grandes variations dans le temps. Sur tous les cinq types de classes AI à une valeur élevée qui dépasse les 77% ce qui démontre que les unités sont adjacentes et donc des taches agrégées.

La relation entre IJI, ED et SHAPE permet d'identifier les types d'occupation du sol les plus susceptibles de contribuer aux processus de diffusion. Les fortes valeurs d'IJI indiquent une forte potentialité de perturbations entre types d'occupation du sol adjacents, alors que ED et SHAPE expriment le degré de fragmentation/compactation. En mettant en relation ces trois indices, on constate que les espaces agricoles bien agrégés et en constante augmentation restent contigus. Ceux-ci confirment le constat fait par McGarigal *et al.* (9) le paysage est fortement marqué par les fronts d'extension de l'agriculture. Cette extension est très forte sur deux axes: Centre-Nord et Centre-Ouest. On fait le même constat sur la carte d'occupation de 2015 (Figure 2). Les valeurs de ED et de SHAPE restent faibles dans l'ensemble.

Dynamique de l'occupation du sol

L'analyse de la dynamique comprend la description et la spatialisation; ainsi que l'identification et la spatialisation des changements du paysage enregistrés au cours des 30 dernières années.

Mise en évidence des changements à l'échelle du paysage entre 1985 et 2000

Le tableau 6 et la figure 2 présentent les statistiques des cartes d'occupation du sol obtenues après la classification des images Landsat de 1985 et 2000. Il expose les surfaces en kilomètres carrés des cinq types d'occupation du sol identifiés, ainsi que la différence de superficie et le taux expansion entre ces deux dates.

En 1985 le paysage était dominé par les espaces couverts par les végétations naturelles 4024,71 km² soit 64,34%, avec à leurs têtes la savane arborée (2794 km² soit 44,67%). La savane arborée était suivie par la zone agricole 2169 km² soit 34,68% de la superficie totale.

En 2000 avec l'introduction de la culture du coton dans cette zone dans les années 90 on constate une augmentation importante de plus de 260 km² de la zone de culture. Cette augmentation a été faite au détriment de la savane arborée qui perd ainsi plus de 320 km² de sa surface de 1985.

Mise en évidence des changements à l'échelle du paysage entre 2000 et 2015

Les résultats du traitement des images entre 2000 et 2015 (Tableau 7 et Figure 2) montrent un changement significatif de l'occupation des sols durant ces deux périodes.

En effet, durant ces quinze ans, on a assisté à une augmentation sans cesse croissante de la zone de culture qui a vu sa superficie augmentée de 8,45 % soit un gain de 527,63 km². Tout comme dans les années précédentes, cette expansion a été au détriment de la surface de savane arborée qui perd en même temps 23,71 % de sa surface de 2000. Les surfaces en eau ont fortement diminué en passant de 9,16 km² à 5,22 km² soit une perte de 3,94 km². La savane boisée et la galerie ont gagnées respectivement 1483,1 km² et 211,04 km².

Cette dernière a remplacé la majeure partie des surfaces en eau.

Ces tendances confirment le résultat de Ballo *et al.* (2) qui ont observés une augmentation de la zone agricole dans la zone cotonnière du Mali sud. Cette dynamique est la conséquence d'une forte conversion des superficies de végétation naturelle en zone de culture surtout du coton.

Conclusion

L'étude basée essentiellement sur l'exploitation des images Landsat de 1985, 2000 et de 2015 a été réalisée grâce aux logiciels des SIG/Télédétection (ArcGIS et Erdas Imagine) et d'écologie du paysage (Fragstats). Ces approches ont permis la réalisation des cartes d'occupation des sols et la mise en place des indices de paysage. L'étude montre que la télédétection et les SIG sont très utiles pour cartographier et quantifier les objets géographiques. La comparaison, la mise en relation des résultats de ces trois dates ont permis de mettre en évidence la structure, la composition et la dynamique de changement.

L'analyse des résultats des indices de la composition du paysage révèle qu'à l'échelle du paysage dans sa globalité, le nombre de taches a augmenté de plus de 74% entre 1985 et 2015 ce qui démontre une tendance à l'hétérogénéité. Quant à la richesse, elle est restée constante durant la période d'étude. L'indice de diversité de Shannon confirme l'hétérogénéité avec des valeurs différentes de 0. À l'échelle des classes d'occupation on remarque que cette hétérogénéité est surtout liée à l'augmentation de la proportion du paysage occupé par la zone agricole qui passe de 21.92% à 36,57% en 30 ans au

détriment de la savane arborée qui perd 21.57% de sa surface.

La comparaison entre le nombre de taches (Patch), la surface moyenne de la tache et la densité des contours des taches de la zone culture et les végétations naturelles (Savane arborée, boisée et la galerie) tout en long de la période d'étude indiquent une augmentation progressive des surfaces moyennes de la zone de culture accompagnées d'une réduction importante du nombre de taches entre 2000 et 2015. Ceux-ci montrent une certaine connectivité des zones agricoles. Par contre la savane arborée dont la surface moyenne passe de 26.17 en 1985 à 1.83 en 2015, conjuguée à une augmentation de près de 70% du nombre de taches indiquent un fort haut degré de fragmentation. Quant à la dynamique paysagère, l'introduction de la culture du coton dans cette zone dans les années 90 a beaucoup contribué à une augmentation importante de plus de 260 km² de la zone de culture soit 12%. Cette augmentation a été faite au détriment de la savane arborée qui perd ainsi plus de 320 km² de sa surface de 1985 soit une diminution 11%.

Références bibliographiques

1. Ba T. & Seck D., 2012, *Dynamique de l'Occupation des sols, cartographie des CLPA, des zones de pêche et mise en place d'un système d'information géographique*, Centre de Suivi Ecologique et USAID/COMFISH Project, Sénégal, University of Rhodes Island, Narragansett RI, p66
2. Ballo A. Traoré S.S., Coulibaly B., Diakité C.H., Diawara M., Traoré A., Dembélé S., 2016, Pressions anthropiques et dynamique d'occupation des terres dans le terroir de Ziguéna, zone cotonnière du Mali, article scientifique, *Eur. Sci. J.*, 12, 5, 90-99.
3. Botequilha L.A. & Ahern J., 2002, Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning, *Landscape Urban Plann.*, 65-93.
4. Casado A., 2007, *Etude de la structure et de la dynamique des paysages de montagne: Exemple du bassin versant de La Voireuze, affluent de l'Alagnon entre 1948 et 2000*, Mémoire de Master 2 Géoenvironnement. Université Blaise Pascal, pp 51.
5. CMDT., 1998, Présentation de la filière Coton, Bamako
6. Cuny P. & Sorg J.P., 2003, Forêt et coton au sud du Mali: cas de la commune rurale de Sorobasso, *Bois For. Trop.*, 276, 2, 17-30.
7. FAO. 1996. *Rome Declaration on World Food Security*. World Food Summit, 13-17 of November 1996, Rome Italy.
8. Girard M.C., 1995, Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols. Un exemple dans la région de Lodève, *Et. Gestion Sols*. 2, 1, 7-24.
9. McGarigal K., Cushman S., Neel M., Ene E., 2002, FRAGSTATS: *Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*, Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, p.40
10. RGPH., 2009, *4^{ème} Recensement Général de la Population et de l'Habitat*, INSAT-Mali, Résultats Définitifs Tome 0: Répertoire des villages, p.31
11. Sarr M.A., 2009, Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat», *Cybergeo: Eur. J. Geogr. Environ. Nat. Pays*, 72
12. Soumaré M., 2008, Dynamique et durabilité des systèmes agraires à base de coton au Mali, Thèse de Doctorat à l'Université de Paris X Nanterre, 373 p.

Master en Géomatique, Malien, Enseignant-chercheur, Faculté d'Histoire et de Géographie, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Mali.

M. Soumare, Malien, Docteur, Enseignant-chercheur, Faculté d'Histoire et de Géographie, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Mali.

C.H. Diakite, Malien, Docteur, Enseignant-Chercheur, Géographe spécialiste en Télédétection et Système d'Information Géographique, Institut d'Economie Rurale (IER), Mali.

D. Gaillard, français, Docteur, Enseignant-chercheur, UFR des Sciences Economiques, de Gestion, de Géographie et l'Aménagement des Territoires Université de Caen-Normandie France.