



ARTICLE

Dynamiques Spatio-Temporelles de l'Occupation des Terres dans les Zones de Production Cotonnière et Céréalière au Mali

Spatio-Temporal Dynamics of Land Use in Cotton and Cereal Production Zones, Mali

Moumouni Sidibé^{1,2,*}, Augustin K. N. Aoudji¹, Yaya Issifou Moumouni^{3,*}, Issa Sacko⁴,
Idelphonse Saliou¹, Bourema Koné², Achille Ephrem Assogbadjo⁵ et Afio Zannou¹

¹Laboratoire d'Agroéconomie et d'Agrobusiness (LAGEC-B), Ecole Doctorale des Sciences Agronomiques et de l'Eau (EDSAE), Université d'Abomey-Calavi (UAC), Cotonou, 01 BP 526, Bénin

²Institut d'Economie Rurale (IER), Rue Mohamed V, Bamako, BP 258, Mali

³Laboratoire de Cartographie, Télédétection et SIG (LaCarto), Université d'Abomey Calavi, Cotonou, 10PB 1082, Houéyihou Bénin

⁴Faculté des Sciences Economiques et de Gestion (FSEG), Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB), Bamako, BP 276, Mali

⁵Laboratoire d'Ecologie Appliquée, Université d'Abomey-Calavi (UAC), Cotonou, 01 BP 526, Bénin

*Corresponding Authors: Moumouni Sidibé. Email: sidibezmoumouni@yahoo.fr; Yaya Issifou Moumouni. Email: issifoumyaya@gmail.com

Received: 29 August 2023 Accepted: 20 February 2024 Published: 05 April 2024

RÉSUMÉ

La dynamique d'occupation des terres constitue un préalable pour l'identification des contraintes de gestion des ressources naturelles, l'évolution de pratiques agraires et la croissance démographique. L'objectif de cette recherche est d'améliorer les connaissances sur la dynamique d'occupation des terres agricoles dans les zones de cultures sèches (Cinzana) et cotonnière (Kléla) au Mali. La méthodologie utilisée a consisté à la collecte des données planimétriques et à l'analyse diachronique à travers des images satellitaires Landsat TM (Thematic Mapper) de 2000 et OLI (Operational Land Image) de 2020. Les taux de dégradation et de déforestation des formations naturelles ont été calculés d'une part et d'autre part la vitesse et l'intensité des changements ont été évaluées à l'aide des programmes « Pontius matrix 22 et intensity analysis » à partir de la matrice de transition. Les résultats de l'analyse diachronique ont révélé une nette augmentation des superficies des formations anthropiques, notamment celles des champs et jachères au détriment des formations naturelles. Cela s'est manifesté à Cinzana par une augmentation globale des superficies des formations anthropiques de 45% (soit 2,30% par an), et une réduction globale de 45,15% (2,26% par an) des superficies des unités naturelles ; à Kléla par une progression globale de 131% (soit 6,54%/an) des champs et jachères au détriment des formations naturelles qui ont subi une réduction de 95% (soit 4,76% par an) entre 2000 et 2020. En somme, l'évolution des unités paysagères dans la zone de recherche entre 2000 et 2020 présage une anthropisation à outrance des formations naturelles, ce qui pourrait compromettre la durabilité de ces formations, avec un risque de perte des services écosystémiques et de la productivité agricole. L'étude recommande l'utilisation des pratiques agroécologiques, la facilitation de l'accès aux technologies agricoles, aux services d'encadrement dans une perspective d'intensification agricole. Les mesures politiques dans le sens d'une transition agroécologique doivent être encouragées.



MOTS CLÉS

Occupation des terres ; dégradation des terres ; analyse diachronique ; pratiques agroécologiques ; télédétection

ABSTRACT

Land use dynamics is a prerequisite for identifying natural resource management constraints, the evolution of agrarian practices and population growth. The objective of this research is to improve knowledge of the dynamics of agricultural land use in the dryland (Cinzana) and cotton (Kléla) areas of Mali. The methodology used consisted of planimetric data collection and diachronic analysis using Landsat TM (Thematic Mapper) satellite images from 2000 and OLI (Operational Land Image) from 2020. Degradation and deforestation rates of natural formations were calculated on the one hand, and on the other hand, the speed and intensity of changes were evaluated using the Pontius matrix22 and intensity analysis programs from the transition matrix. The results of the diachronic analysis revealed a clear increase in the area of anthropogenic formations, especially fields and fallow land, at the expense of natural formations. In Cinzana, this was reflected in an overall increase in the area of anthropogenic formations of 45% (i.e., 2.30% per year) and an overall reduction of 45.15% (2.26% per year) in the area of natural units. In Kléla, there was an overall increase of 131% (i.e., 6.54% per year) in the area of fields and fallow land to the detriment of natural formations, which underwent a reduction of 95% (i.e., 4.76% per year) between 2000 and 2020. Definitely, the evolution of landscape units in the research area between 2000 and 2020 points to excessive anthropization of natural formations, which could compromise the sustainability of these formations, with a risk to ecosystem services and agricultural productivity lost. The study recommends the use of agro-ecological practices, and the facilitation of access to agricultural technologies and support services with a view to agricultural intensification. Policy measures to promote an agro-ecological transition should be encouraged.

KEYWORDS

Agricultural productivity loss; land use; land degradation; speed and intensity of change; agroecological practices; remote sensing

1 Introduction

La dynamique de l'occupation des terres est définie comme son évolution dans le temps et dans l'espace [1]. Cette évolution peut tendre vers l'extrême dégradation ou vers un équilibre stable. L'utilisation des terres fait référence aux objectifs pour lesquels les hommes les exploitent [2,3]. L'accroissement de la population, surtout dans les pays en développement, a entraîné une expansion des terres agricoles qui a pour conséquences une exploitation abusive des forêts primaires et des formations végétales inférieures, la diminution de leurs superficies [4,5]. En effet, la perte de couverture forestière a été estimée à plus de quatre millions d'hectares/an pour la période comprise entre 2000 et 2005 [6]. Cette perte s'explique par la conversion des terres forestières en parcelles agricoles au Mali [7]. Cette conversion a entraîné une dégradation de la qualité des sols, à travers l'exportation des éléments nutritifs par les plantes et la faible capacité de minéralisation par les microorganismes [8]. En effet, le Mali s'est classé parmi les pays africains à forte valeur de perte d'éléments nutritifs (NPK) avec plus de 60 kg/ha par an entre 1993 et 1995 causé par la dégradation des sols [6].

L'augmentation de la production afin de satisfaire à une demande croissante de la population, peut se faire de deux manières : i) améliorer la productivité agricole des cultures par unité de surface.

Cette option nécessite le recours à des pratiques ou technologies agricoles qui sont à même d'améliorer la fertilité des sols afin qu'ils puissent être utilisés le plus longtemps possible sans en avoir besoin de défricher de nouvelles terres (pratiques de conservation du sol et des eaux, de gestion de la fertilité des sols, etc.), ii) étendre les superficies en vue de compenser les manques de production dus d'une part à la baisse de la fertilité des sols, mais également à de nouveaux besoins engendrés par l'augmentation de la population. Cette extension se fait aux dépens des formations naturelles à travers les nouveaux défrichages ou déforestations dans les zones où les réserves existent. La deuxième voie reste malheureusement la plus pratiquée [9,10]. En effet, les agriculteurs sont peu demandeurs d'innovations pour l'amélioration de la fertilité des sols aussi longtemps que les possibilités d'extension leur permettent de fournir moins de travail pour intensifier [11,12]. Ils préfèrent plutôt recourir aux pratiques agricoles non appropriées telles que l'utilisation abusive d'engrais et pesticides chimiques [13], qui ont montré leurs limites en termes d'amélioration des rendements des cultures et de la fertilité des sols [14].

D'autre part, il a été établi l'existence d'une forte corrélation (99%) entre la dynamique d'occupation des terres et la croissance démographique, notamment en zone cotonnière dans la zone sud du Mali [15]. En effet, une augmentation des superficies agricoles de 34,60% (action humaine) devrait engendrer une détérioration de la végétation naturelle d'environ 40,63% [16]. Ce qui veut dire que les actions humaines ont une forte influence sur la dynamique d'occupation des terres. Cette influence se manifeste par son impact sur l'environnement à travers les pratiques agricoles inappropriées, la surexploitation des terres et ressources, la baisse de la fertilité des sols et le surpâturage [13,17]. De plus les effets du changement climatique constituent un facteur aggravant dont les formes les plus visibles sont l'augmentation de l'aridité, l'assèchement des zones humides au fil du temps et les changements dans la végétation naturelles [18–20]. Face à ce défi, la pratique d'activités génératrices de revenu, la migration des jeunes vers les centres urbains constituent des voies de recours envisagées par les populations [17]. Le Mali est un pays où coexistent plusieurs systèmes de cultures en fonction des zones agroécologiques notamment le système coton (coton, maïs) dans la partie sud du pays, le système cultures sèches (mil, sorgho) au centre du pays, le système riz (dans le delta du Niger), etc. La culture cotonnière est connue pour la forte utilisation d'engrais (bénéfique à court terme mais effets toxiques et baisse de fertilité du sol à long terme [21]) et de pesticides chimiques contrairement aux cultures sèches. Des expériences antérieures ont montré qu'une réduction de l'apport des engrais inorganiques favorise l'expansion des superficies cultivées. En effet, les programmes d'ajustement structurel des années 1980, prônés par les institutions de Bretton Wood (FMI et BM) et signés par le gouvernement Malien avaient conduit à une réduction drastique des subventions des engrais chimiques ainsi que de leur utilisation. Cette mesure était compensée par une hausse des prix, ce qui s'en était suivie d'une expansion des emblavures par les agriculteurs à travers le défrichage de nouvelles terres en remplacement de l'intensification [11]. Mais cette suspension des subventions n'avait duré que quelques années (au milieu des années 1980s), avant de reprendre avec des mesures incitatives sur le maïs (semences gratuites, garantie de prix d'achat, et fourniture d'engrais à crédit via les organisations villageoises) et qui a entraîné l'augmentation des superficies cultivées en maïs. Ainsi, on pourrait postuler qu'il y a un lien entre l'accès aux services agricoles et les pratiques d'utilisation des terres. En 2006, le Mali a adopté une loi d'orientation agricole (LOA) qui préconise le développement d'une agriculture familiale durable et un accès équitable à la terre. Force est de reconnaître que de nos jours, elle est restée au stade de bonnes intentions, du moins pour les politiques publiques car en dehors des sensibilisations, il n'existe pas de mécanisme d'incitation mis en place à l'image des subventions sur les intrants externes [22]. En s'appuyant sur l'adoption des techniques et technologies d'amélioration de la production agricole et les conséquences futures sur l'exploitation des terres [13]

nous formulons l'hypothèse que le niveau de pression sur les terres est plus élevé au niveau du système cultures céréalières que dans la zone cotonnière. Les études ayant traité la dynamique de l'occupation des terres au Mali ont décrit parfaitement les aspects physiques de l'occupation. Très peu d'études passées se sont intéressées à l'influence des pratiques agricoles sur la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres au Mali.

L'évaluation de la dynamique d'occupation des terres constitue un préalable pour l'identification des bonnes pratiques agronomiques de gestion ou de restauration de la fertilité des sols. Cette recherche vise à étudier la dynamique de l'occupation des terres dans les zones agroécologiques subhumide (zone de production cotonnière) et sèche (zone de production céréalière) sous influence des pratiques agricoles au Mali. Spécifiquement il s'agit de : i) caractériser les unités d'occupation des terres dans ces zones d'étude entre 2000 et 2020, et ii) analyser les facteurs de changement pour la même période. Si le processus de dégradation des terres a des origines lointaines, le choix de l'année 2000 se justifie par le fait qu'elle constitue un point de convergence de la majorité de produits cartographiques relatifs aux étendues forestières et à l'occupation des terres au Mali [23–25].

La littérature indique une large utilisation de la télédétection dans l'analyse des changements spatio-temporels de l'occupation des terres à travers les données géospatiales. Cette méthode est très courante d'utilisation notamment par les institutions intéressées par la gestion des ressources végétales [26]. Elle a été utilisée pour analyser l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur les berges dans la vallée du fleuve Niger au Bénin [27]. Les méthodes de télédétection et de SIG (Système d'Information Géographique) ont été utilisées pour étudier la dynamique de l'occupation du sol de la Commune de Tessékéré au Sénégal [28]. En raison de sa grande popularité, cette méthode sera utilisée dans le cadre de la présente recherche.

2 Matériels et Méthodes

2.1 Zone d'Étude

L'étude a été conduite dans deux zones agroécologiques du Mali. Les communes de Cinzana dans le cercle de Ségou (région de Ségou) en zone cultures sèches et de Kléla dans le cercle de Sikasso (région de Sikasso) en zone cotonnière ont été sélectionnées pour conduire cette recherche. La commune de Cinzana est située dans le cercle de Ségou entre la latitude 13°10'00" et 13°30'00" Nord et la longitude 5°40'00" et 6°10'00" Ouest (Fig. 1). Elle couvre une superficie estimée à 108 054 ha. Le relief est formé de plaines favorables à la culture du mil (*Pennisetum glaucum*), du sorgho (*Sorghum bicolor*), du maïs (*Zea mays*) et à l'élevage. Les sols sont limoneux, argilo-sabloneux, argilo-limoneux et gravillonnaires. Le climat est tropical de type sahélien caractérisé par une saison de pluies (Juin à octobre) et une saison sèche (novembre à mai). Les précipitations moyennes varient entre 650 et 750 mm de pluie par an et se caractérisent par des irrégularités, des mauvaises répartitions et d'une grande variabilité d'une saison à une autre. La température moyenne annuelle est de 28°C, pour des extrêmes variant entre 22°C en janvier et 33°C en mai.

La population de la commune de Cinzana était estimée en 2020 à 45 329 habitants (42 habitants/Km²) (projection à partir du RGPH 2009). La population est dominée par les Bambaras. D'autres ethnies cohabitent avec les Bambaras notamment les Sarakolés, les peulhs, les Bobos, les Somonos et les Mossis. L'agriculture de type pluvial et l'élevage de type extensif sont les principales activités économiques qui occupent la population de cette commune. C'est un élevage dominé par des bovins, ovins, caprins, asins, équins, porcins et volaille.

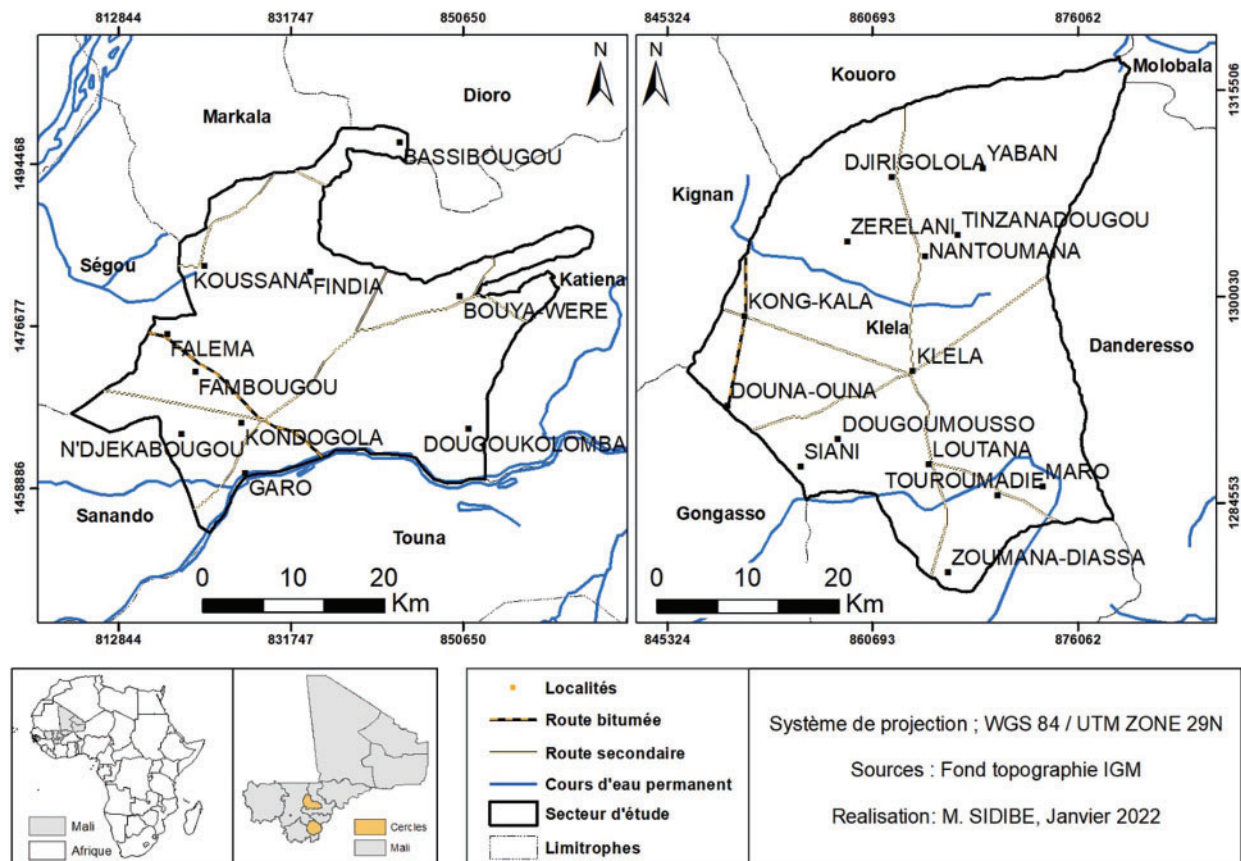


Figure 1: Localisation géographique des communes de Cinzana et de Kléla

La commune de Kléla est située entre la latitude $11^{\circ}32'30''$ et $11^{\circ}52'30''$ Nord et à la longitude $5^{\circ}30'00''$ et $5^{\circ}52'30''$ Ouest (Fig. 1). Elle couvre une superficie de 77 800 ha. Les sols de la commune de Kléla sont de type argilo-sableux à limoneux. Le climat est de type soudano-sahélien et se caractérise par une saison pluvieuse et une saison sèche. La commune est arrosée par quelques cours d'eau dont le plus important est le fleuve Lotio. La pluviométrie atteint les 1000 mm de pluie par an. Le relief est accidenté et se caractérise par des plateaux gravillonnaires et des dépressions. La végétation est dominée par les espèces comme le Néré (*Parkia biglobosa*), le Baobab (*Adansonia digitata*), le Caïllédrat (*Azvelia africana*), le Karité (*Vitellaria paradoxa*).

La population de la commune de Kléla est estimée à 31 398 hbt (40 habitants/Km²) (PDSEC 2016–2021) et est composée majoritairement de Sénoufo. Les Sénoufos cohabitent avec d'autres ethnies notamment les Miankas, les Bobos et les Peulhs. L'agriculture reste la première activité économique dans la commune de Kléla avec comme principales spéculations le coton, le maïs, le mil, le sorgho et le riz. L'arachide et le soja y sont cultivés dans le cadre de la diversification agricole. L'élevage constitue la deuxième activité économique dans la commune et le cheptel est composé de bovins, ovins, caprins, équins, asins, porcins et volaille. Les autres activités économiques sont le commerce, relativement développé avec l'existence de nombreuses opportunités. Les activités comme l'artisanat et le transport y sont aussi pratiqués. La Fig. 1 présente la localisation géographique de la zone d'étude.

2.2 Données Utilisées

Les données planimétriques ou géospatiales et des relevés *in situ* (de terrain) ont été utilisés pour analyser la dynamique spatio-temporelle afin d'apprécier l'évolution des différents états d'occupation des terres au moyen des images satellitaires multitudes.

2.2.1 Données Géospatiales

Les données satellitaires utilisées sont composées : (i) Pour la commune de Cinzana : des scènes d'images Landsat 5 TM (Thematic Mapper) du 04/10/2000 et Landsat8 OLI (Operational Land Image) du 20/11/2020 (WRS_PATH = 198 ; WRS_ROW = 51). Au total, 2 scènes d'image couvrant la commune de Cinzana ont été utilisées.

(ii) Pour la commune de Kléla : des scènes d'images Landsat 5 TM du 16/12/2000 et Landsat8 OLI du 31/12/2020 (WRS_PATH = 197 ; WRS_ROW = 52). La résolution spatiale des images Landsat est de 30 m. Au total, 2 scènes d'image ont suffi pour couvrir la commune de Kléla.

Ces différentes images ont été téléchargées sur le site de EarthExplorer ([usgs.gov](https://earthexplorer.usgs.gov)) et celui de Remote Pixel Home. L'organigramme de la démarche suivie pour le traitement des images est présenté sur la Fig. 2.

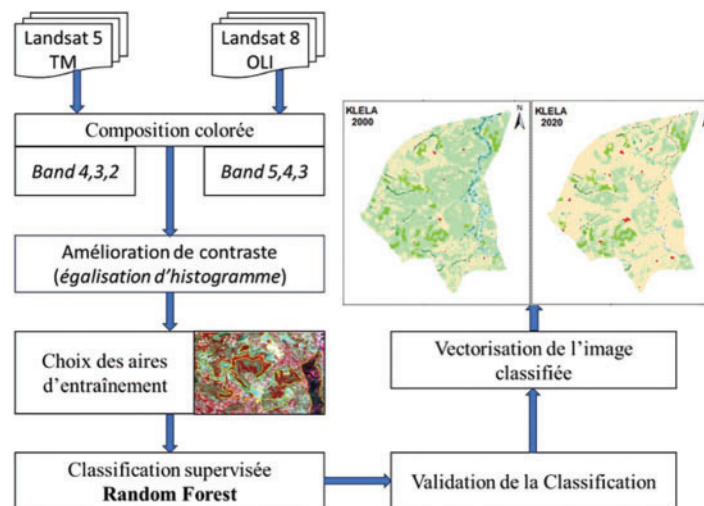


Figure 2: Organigramme de la démarche méthodologique de traitement des images

2.2.2 Données de Terrain

Les données GPS (Global Positioning System) relevées *in situ* ont été mises à contribution pour améliorer la qualité de celles issues de l'interprétation des images satellites.

Des points de contrôle ont été pris dans chacune des unités d'occupation des terres pour vérification à l'aide du GPS. Au total, 270 points ont été enregistrés dans les deux communes à raison de 15 points de contrôle au niveau chaque formation végétale naturelle (Forêts galeries, Forêts claires, Formations marécageuses, Savanes) 10 points au niveau de chacune des formations anthropiques (Plantation, Champs et jachères, Etablissement humain, Sol nu) et 10 points au niveau des Plans d'eau.

Google earth Pro a été aussi utilisé pour l'évaluation de la qualité. Chaque classe de pixels a été représentée par ses coordonnées géographiques.

Outre les images satellites et les relevés *in situ*, le fond topographique de l'IGM 2016 a été utilisé pour extraire le secteur, les réseaux routiers et hydrographiques, les localités.

L'ensemble des données collectées ont été traitées à l'aide des outils de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG). La démarche méthodologique repose sur une approche transversale, combinant à la fois la méthode analytique et diachronique [1].

2.3 Outils de Traitement des Données

Le traitement de l'information a été effectué grâce une combinaison d'outils, entre autres :

- Les images satellite Landsat ont été traitées à l'aide des logiciel QGIS Remote Sensing 2.18 et Orfeo Toolbox (OTB) ;
- Le contrôle pour la phase terrain a été effectué à l'aide du récepteur du GPS ;
- La vérification instantanée des classes suspectes sur Google Earth a été effectuée au moyen de la fonction Plugin GearthView pour QGIS ;
- L'extraction des données GPS a été faite à l'aide du logiciel Base Camp ;
- Logiciel Google Earth Pro utilisé pour vérifier et contrôler les unités d'occupation.

Ces outils ont servi à la réalisation des cartes d'occupation du sol pour 2000 et 2020.

2.4 Méthode de Traitement des Données

Le traitement des données est réalisé en 4 étapes dont la synthèse colorée, la sélection de la région d'entraînement, la classification supervisée, la validation suivie de la vectorisation de la classification.

2.4.1 Composition des Couleurs

La composition des couleurs permet de créer de véritables images en couleur prenant en compte de la signature spectrale d'un objet. Son objectif principal est de distinguer les différents objets présents dans une image et de faciliter l'interprétation d'images. Dans le traitement actuel, les bandes Landsat 5 4, 3, 2 et Landsat 8 5, 4, 3 ont été utilisées respectivement pour les principaux canaux (rouge, vert et bleu). C'est une méthode non seulement très efficace utilisée dans l'analyse de la végétation, mais aussi elle présente l'avantage d'avoir les mêmes caractéristiques dans la photographie infrarouge en couleur, connue pour son utilisation depuis plusieurs dizaines d'années [29].

Dans le cadre de la présente recherche, l'égalisation d'histogramme a été utilisée pour l'amélioration du contraste des images. C'est une méthode d'assignation des images à de grandes luminosités suivant leur fréquence d'occurrence. Cela permet d'assigner les plus hautes luminosités aux valeurs d'images se produisant le plus fréquemment comme l'indique la Fig. 3.

2.4.2 Sélection des Aires d'Entraînement

Les aires d'entraînement sont assimilées à des sites représentatifs pour les caractéristiques numériques des classes permettant de définir les signatures spectrales d'une unité paysagère spécifique. Sa taille est plus grande par rapport l'erreur de localisation et plus petite en lien avec l'objet à détecter [30] et exprimée par [31] :

$$A = P(1 + 2L) \quad (1)$$

- A = superficie de l'aire d'entraînement ;
- P = dimension du pixel exprimée en mètre ;
- L = précision de la localisation mesurée en mètre.

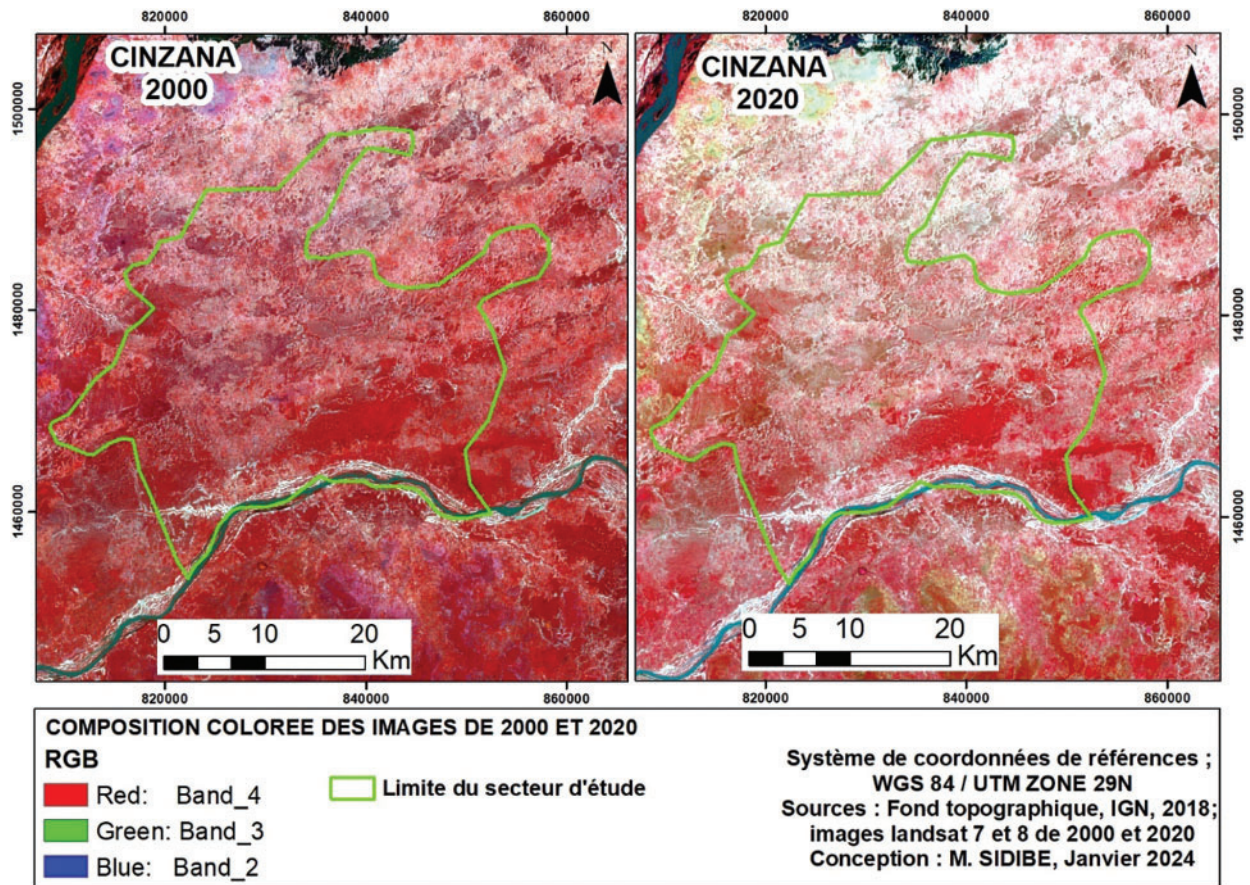


Figure 3: Composition colorée et rehaussement de contraste de l'image

Tracées au pixel près sur les images, 20 aires d'entraînement représentatives de la diversité de chacune des classes de végétation ou unité d'occupation des terres ont été sélectionnées. Ces choix ont été faits pour chaque classe de végétation naturelle (forêts, savanes, marécages), contre 10 pour les cultures et jachères, et 5 pour les autres unités (plans d'eau, établissements humains et sols nus). A l'aide d'une clé d'interprétation, un ensemble de 115 aires d'entraînement couvrant les 9 classes définies ont été sélectionnées à l'échelle du secteur de la zone de recherche puis validées avec des images Google Earth en utilisant le plugin GearthView for QGIS.

2.4.3 Classification Supervisée

C'est une classification pixel par pixel qui repose sur le postulat que la signature spectrale de chacun des pixels est représentative de la classe de végétation où il se trouve. Elle consiste à attribuer à chaque groupe de pixels la classe la plus plausible en fonction de la ressemblance spectrale entre les pixels et la signature des classes. L'ensemble des pixels par image satellite a été classé suivant l'algorithme Random Forest (Forêt d'arbres décisionnels) extrapolant les caractéristiques spectrales pour les aires d'entraînement sur le reste de l'image. Les pixels n'ayant pu être assignés à une classe de végétation ont été placés en rejet et ensuite répertoriés au cours du contrôle-terrain par une vérification des classes de pixels et une validation de l'interprétation de l'image.

La Forêt d'Arbres Aléatoires s'intègre à la famille des algorithmes de classification provenant du champ d'apprentissage machine ou "Machine Learning". Appartenant à la catégorie des algorithmes d'apprentissage supervisés, elle joue un rôle d'explication ou de prédiction d'une variable qualitative (classification) ou quantitative (régression). Il s'agit d'un algorithme de classification de type arbre de décision [32], qui fonctionne selon un principe de partitionnement récursif. Des groupes d'individus (classe) les plus homogènes possibles sont créés au moyen d'un algorithme qui à l'origine de la construction ou encore « pousse » de l'arbre, pose une série de questions binaires (oui/non) en lien avec les variables définies comme explicatives. Les réponses à ces questions constituent les branches de l'arbre.

La Random Forest s'opère en deux étapes. Premièrement, une « forêt » d'arbres décisionnels, où un grand nombre d'arbres de décision suivant le nombre désiré, est construite d'une manière totalement aléatoire. Deuxièmement, à la suite de la construction de cette « forêt », un vote est effectué en ne retenant que la classe ou catégorie la plus fréquente [33].

2.4.4 Processus de Validation et de Vectorisation de la Classification

La qualité de la classification a été évaluée puis suivie du contrôle-terrain en deux niveaux : i) vérification des interprétations réalisées sur le terrain et ii) collecte d'informations portant sur les formations végétales, la toponymie et les informations socioéconomiques.

Avec le GPS "Garmin Etrex 10", 270 points ont été enregistrés dans les deux communes à raison de 15 points de contrôle au niveau chaque formation végétale naturelle (Forêts galeries, Forêts claires, Formations marécageuses, Savanes) 10 points au niveau de chacune des formations anthropiques (Plantation, Champs et jachères, Etablissement humain, Sol nu) et 10 points au niveau des Plans d'eau.

Les images Google earth ont servi à confirmer ou infirmer un certain nombre de catégories d'occupation des terres de manière interactive à travers QGIS avec le plugin GEarthView for QGIS. Les points GPS sont ensuite exportés du format GPX au format fichier de forme (SHP) exploitable dans un SIG (QGIS) à l'aide du logiciel Base Camp.

Chacune des images interprétées a été vectorisée en se servant de l'extension "convert raster to vector" du logiciel QGIS Remote Sensing 2.18. Cela a permis de générer une matrice de confusion pour l'évaluation de la qualité de l'interprétation. Cette évaluation permet de comparer les données en colonne ou données interprétées avec les données en ligne ou données de vérité terrain. La concordance entre les données interprétées et les données de référence terrain est lue sur la diagonale. C'est avec cette matrice de confusion que les différentes erreurs d'omission et de commission (EO, EC), les IPC ou indices de pureté des classes et la précision globale de l'interprétation ont été calculés. La précision globale correspond à l'ensemble des classes d'occupation des terres interprétées et qui s'accroissent à la réalité de terrain est donnée par :

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{Nc} x_{ii} \quad (2)$$

– a : précision globale ; Nc : nombre total de classes ; x_{ii} : nombre de points d'observation dans la colonne i et la ligne i correspondant à la diagonale de la matrice nombre de points d'observation dans la colonne i et ligne i.

– N : nombre total d'observations pour l'ensemble des classes.

2.4.5 Evaluation Quantitative de la Déforestation

L'analyse quantitative de la déforestation a été faite en se basant sur l'évaluation de cinq principaux indicateurs : taux global de changement, taux de déforestation, taux de dégradation, taux d'amélioration des formations végétales naturelles et taux de reconstitution naturelle. Ces évaluations sont réalisées à travers les valeurs issues de la matrice de conversion des principales unités entre 2000 et 2020 qui a été gérée à l'issue de la vectorisation de l'interprétation d'image réalisée.

Cette analyse tient compte de la définition de la forêt retenue dans le cadre de ce papier. Elle provient du code forestier du Mali et consacrée par la Loi n°86-42, mise en application le 30 janvier 1986. Cette loi définit la forêt comme "une association d'arbres biologiquement interdépendants fournissant des produits végétaux non agricoles mais avec une influence sur le milieu dans un territoire plus ou moins grand". Cela inclut les terres villageoises reboisées considérées comme "sacrées" ou "protégées" pour des raisons "socioreligieuses". Plus tard, cette définition a été améliorée par la FAO dans ses rapports FRA 2000 et FRA 2015 pour le Mali comme un terrain d'une superficie d'au moins 0,5 hectare couvert à au moins 10% par des arbres dont la hauteur à maturité est d'au moins 5 m [23,34]. Une distinction importante est faite entre les forêts fermées (Forêt dense sèche, galerie, etc.) et les forêts ouvertes (forêt claire et savanes).

2.4.6 Taux Global de Changement (Tg)

Soit $S1$, la superficie d'une formation végétale spécifique à la date $t1$ (2000) et $S2$, la superficie de la même formation à la date $t2$ (2020). Le taux de changement global (Tg) s'exprime par [32] :

$$Tg = \frac{S2 - S1}{S1} \times 100 \quad (3)$$

2.4.7 Taux de Déforestation (Def)

La déforestation correspond au passage d'une "terre forestière" en une "terre non forestière" [35]. C'est une conversion de la forêt en d'autres utilisations des terres pouvant conduire à long terme à une réduction du couvert arboré en-dessous d'un seuil minimal de 10% [34].

La déforestation brute est relative à la somme des conversions d'une catégorie "terre forestière" en des catégories "terres cultivées ou autres terres". Le taux annuel de déforestation s'obtient par le rapport du taux de déforestation par le nombre d'années d'étude.

$$Tg (Def) = \frac{Def \times 100}{S1} \quad (4)$$

$Def (b, n)$ est la déforestation brute (b) ou nette (n) et $S1$ représente la superficie des terres forestières naturelles de l'année $t1$.

2.4.8 Taux de Dégradation (Dg)

Le taux de dégradation évalue la somme des transitions d'une catégorie "terre forestière" en catégorie "terre forestière" clairsemée (plus ouverte) et diminuant sa capacité de production en biens et services mais surtout de séquestration du carbone [36]. Il s'exprime par :

$$Tg (Dg) = \frac{Dg \times 100}{S1} \quad (5)$$

– Dg (b ; n) indique la dégradation brute (b) ou nette (n) et S1 correspond à la superficie des terres forestières naturelles en année t1.

2.4.9 Taux de Reconstitution Naturelle (Rn)

La reconstitution traduit la transition d'une terre cultivée ou autres types de terres en terres forestières. Il est évalué par le taux global de reconstitution naturelle Tg (Rn) et s'exprime par [36] :

$$Tg (Rn) = \frac{Rn \times 100}{S1} \quad (6)$$

Rn est la reconstitution naturelle totale enregistrée dans la période et S1 représente la superficie des terres forestières naturelles de l'année t1.

2.4.10 Taux d'Amélioration

L'amélioration (Am) est la conversion d'une terre forestière ouverte à une terre forestière plus fermée ou dense [36]. Son taux global Tg (Am) est :

$$Tg (Am) = \frac{Am \times 100}{S1} \quad (7)$$

– S1 : superficie des terres forestières naturelles de l'année t1.

3 Résultats

3.1 Etat de l'Occupation des Terres entre 2000 et 2020

3.1.1 Etat de l'Occupation des Terres à Cinzana entre 2000 et 2020

L'observation de la carte d'occupation des terres de la commune de Cinzana (Fig. 4) laisse entrevoir une dominance des savanes en 2000 suivies des champs/jachères et des forêts claires. En effet, les savanes et les champs/jachères sont répandues presque au niveau de tous les terroirs villageois à la différence des forêts claires qui sont visibles au niveau de la seconde moitié sud-orientale de la commune. Les formations marécageuses et les forêts galeries sont très dominantes sur l'extrémité sud de la commune tout au long des cours d'eau. Par contre, en 2020, on note une dominance des champs/jachères au détriment des savanes et des forêts claires. La densité des forêts galeries a beaucoup diminué surtout du côté Sud-Ouest de la commune et avec un rétrécissement en épaisseur des formations marécageuses au profit des champs/jachères.

D'une manière générale, il a été constaté que les savanes forment la plus importante unité paysagère en 2000 sur la partie Sud-Ouest à Nord-Est. La tendance est à la régression des unités forestières naturelles due à l'extension des unités anthropiques, en particulier les champs et les jachères sur la période de 2000 à 2020. La matrice de conversion fournit plus de détails sur les tendances d'évolution de l'occupation et de l'utilisation des terres dans la commune de Cinzana entre 2000 et 2020.

3.1.2 Etat de l'Occupation des Sols à Kléla entre 2000 et 2020

L'observation de l'état de l'occupation des terres entre 2000 et 2020 indique une prépondérance des savanes en 2000 ; elles sont observées un peu partout dans la commune. On note la présence des forêts galeries le long des principaux cours d'eau, et quelques îlots de forêts claires çà et là. Les cultures et jachères sont remarquables dans les terroirs villageois.

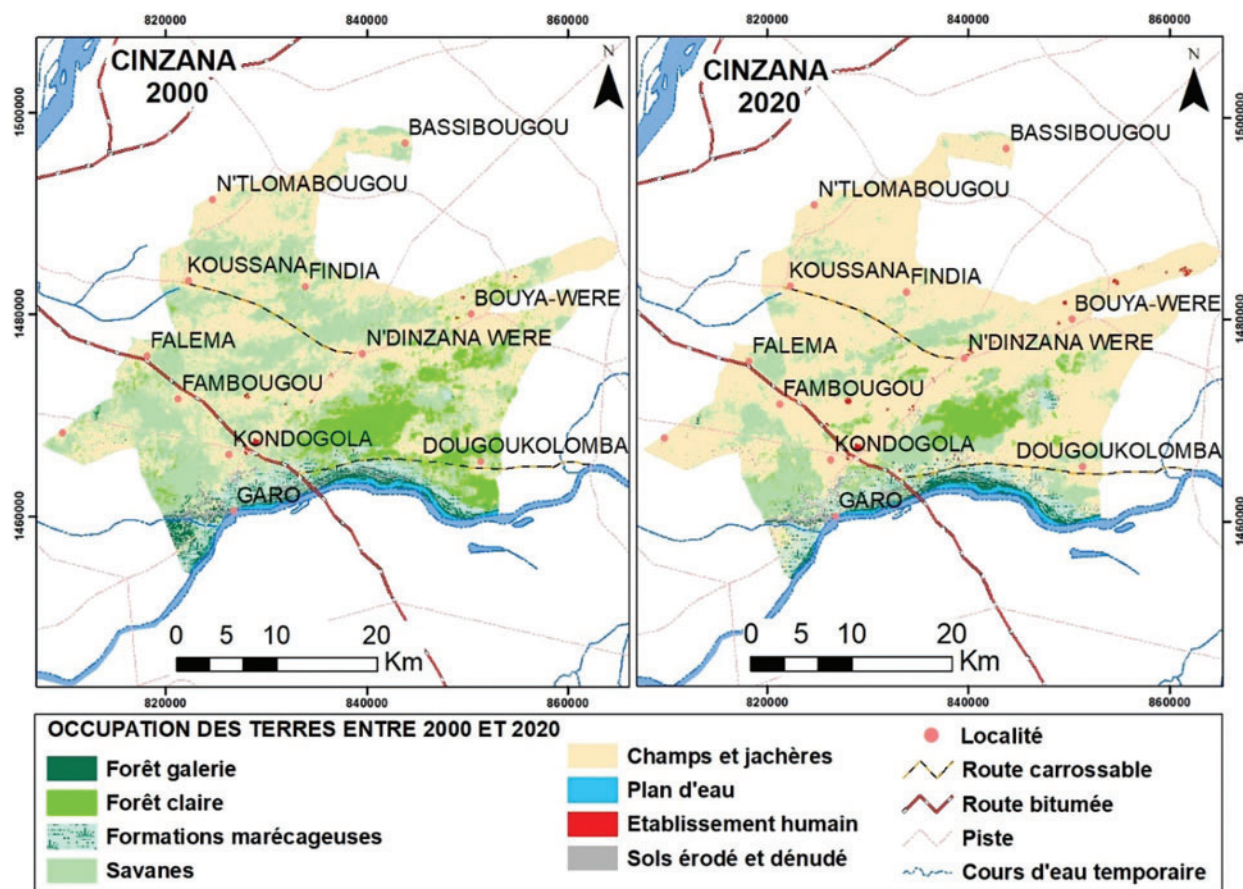


Figure 4: Etat de l'occupation des sols de 2000 à 2020 à Cinzana

En 2020 par contre, ce sont les cultures et jachères qui dominent la physionomie du milieu avec pour conséquence la fragmentation des savanes et forêts. Les forêts galeries ont presque disparu le long des cours d'eau. Les établissements humains sont beaucoup plus perceptibles qu'en 2000 (Fig. 5).

Globalement, on peut observer que les savanes constituent la principale unité paysagère en 2000 quelle qu'en soit la commune. Cette unité a été fragmentée en 2020 par les activités anthropiques en l'occurrence les champs et jachères. La quantification de la conversion des principales unités naturelles en unités anthropiques pourrait être mieux appréciée à travers la matrice de conversion.

3.2 Dynamique de l'Occupation des Sols de 2000 à 2020

3.2.1 Dynamique de l'Occupation des Sols dans la Commune de Cinzana

En termes de régression, les résultats de la matrice de conversion (Tableau 1) indiquent que toutes les unités d'occupation des terres ont connu des pertes et des gains de superficies de façon différentielle.

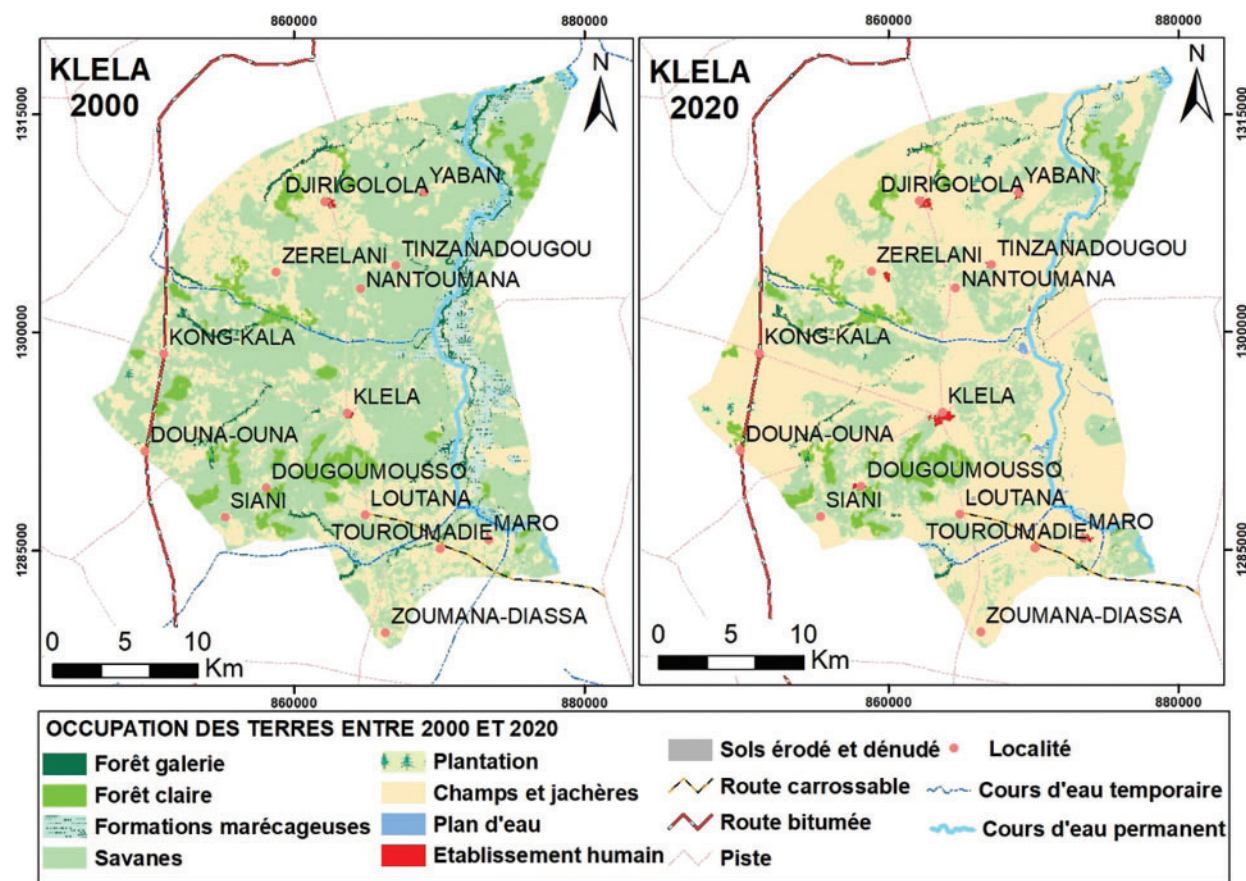


Figure 5: Etat de l'occupation des sols de 2000 à 2020 à Kléla

Tableau 1: Matrice de conversion de l'occupation du sol de 2000 à 2020 à Cinzana

Occupation du sol 2000	Occupation du sol 2020								Pertes	Total 2000
	Formations végétales naturelles				Cultures et jachères		Autres unités			
	FG	FC	FM	Sa	CJ	PE	EH	SN		
FG	1656,36	0	442,06	0	548,38	78,76	0,09	192,23	1262	2918
FC	0	2107,91	231,25	3681,61	3157,48	0	2,2	23,49	7096	9204
FM	81,48	68,11	2926,04	233,76	760,41	1,78	2,7	221,01	1369	4295
Sa	0	1307,6	571,45	12869,41	22356,15	0,31	30,56	486,97	24753	37622
CJ	8,21	498,44	377,8	2090,99	47482,05	0	112,73	450,31	3538	51021
PE	98,23	0	0	0	0,09	1027,67	0	0,02	98	1126
EH	0	0	0	0	0,71	0	123,19	0	1	124
SN	235,19	12,16	133,6	7,84	135,1	3,26	0	1217,11	527	1744
Gains	423	1886	1756	6014	26958	84	148	1374		
Total 2020	2079	3994	4682	18884	74440	1112	271	2591		108054

Note: FG : Forêts galeries, FC : Forêts claires, FM : Formations marécageuses, Sa : Savanes, PL : Plantation, CJ : Champs et jachères, PE : Plans d'eau, EH : Etablissement humain, SN : Sol nu. Source : Images Landsat TM 2000 et OLI 2020.

Les pertes observées sont plus prononcées au niveau des formations végétales naturelles avec près de 1262 hectares de régression pour les forêts galeries entre 2000 et 2020. Les pertes les plus importantes sont observées au niveau des savanes, avec près de 24753 ha de régression. Notons que 1307,6 ha ont été convertis en forêt claire, 571,45 ha en formations marécageuses, 22356,15 ha en champs et jachères, 0,31 ha en plans d'eau, 30,56 ha en établissements humains et 486,97 ha en sols nus de 2000 à 2020. La superficie restée stable pour cette catégorie est de 12 869,41 ha. La seconde perte la plus importante a été observée au niveau des forêts claires avec une perte d'environ 7096 ha, dont 231,25 ha converties en formations marécageuses, 3681,61 ha en savanes, 3157,48 ha en champs et jachères, 2,2 ha en établissements humains et 23,49 ha en sols nus. Seuls 2107,91 ha sont restés inchangés.

A propos des formations non forestières, c'est surtout au niveau des champs et jachères que la plus grande perte a été relevée, soit 3338 ha dont 8,21 ha environ se sont converties en forêts galeries, 498,44 ha en forêts claires, 377,8 ha en formations marécageuses, 2090,91 ha en savanes, 112,73 ha en établissements humains, 450,31 ha en sols nus pendant que 47482,05 ha sont restés stables. Ils sont suivis des sols nus qui ont subi une conversion de 235,19 ha vers les forêts galeries, 12,16 ha en forêts claires, 133,6 ha en formations marécageuses, 7,84 ha en savanes, 135,1 ha en champs et jachères et 3,26 ha en plans d'eau. La superficie stabilisée compte pour 1217,11 ha entre 2000 à 2020.

En termes de gains, il faut noter que les formations non forestières ont connu les plus fortes valeurs entre 2000 et 2020 avec 28565 ha de progression. En effet, les champs et jachères ont connu une augmentation fulgurante passant de 51021 ha en 2000 à 74440 ha en 2020. Les plans d'eau ont connu une progression de 84 ha. Les établissements humains ont connu une augmentation de 148 ha en passant de 124 ha en 2000 à 271 ha en 2020. Enfin, les sols nus ont augmenté de 1374 ha en passant de 1744 ha en 2000 à 2591 ha en 2020 ([Tableau 1](#)).

Globalement, dans la commune de Cinzana on remarque que toutes les formations végétales naturelles ont cédé une partie de leurs superficies aux champs et jachères, témoignant ainsi de l'impact des activités agricoles sur le couvert végétal dans la zone de production cotonnière.

3.2.2 Dynamique de l'Occupation dans la Commune de Kléla

Les résultats de la matrice de conversion ([Tableau 2](#)) indiquent que toutes les catégories ont connu des changements de façon différentielle entre 2000 et 2020.

Tableau 2: Matrice de conversion de l'occupation du sol de 2000 à 2020 à Kléla

Occupation du sol 2000	Occupation du sol 2000									Pertes	Total 2000
	Formations végétales naturelles				Cultures et jachères			Autres unités			
	FG	FC	FM	SA	PL	CJ	PE	EH	SN		
FG	617,18	0,00	1,11	0,00	2,30	755,49	30,11	0,00	0,19	789	1406
FC	0,00	2481,08	0,00	166,57	60,68	464,73	0,00	0,00	0,00	692	3173
FM	0,00	0,00	605,44	0,00	0,20	3915,58	49,77	0,00	4,26	3970	4575
SA	0,00	133,07	0,00	19866,32	1168,39	24069,48	42,37	63,94	15,71	25493	45359
PL	0,00	0,00	0,00	0,00	138,61	163,27	0,00	0,00	0,00	163	302
CJ	85,33	0,37	4,09	12,60	85,77	22376,80	35,81	140,81	22,84	388	22764
PE	0,00	0,00	3,14	0,04	0,00	15,31	32,18	0,00	0,37	19	51
EH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	121,36	0,00	0	121
SN	1,32	0,00	0,00	5,18	0,19	10,50	0,00	5,97	24,43	23	48

(Continued)

Table 2 (continued)

Occupation du sol 2000	Occupation du sol 2000									Pertes 2000	Total 2000
	Formations végétales naturelles				Cultures et jachères			Autres unités			
	FG	FC	FM	SA	PL	CJ	PE	EH	SN		
Gains	87	133	8	184	1318	29394	158	211	43		
TOTAL 2020/2004		2615	614	20051	1456	51771	190	332	68		77800

Note: G : Forêt galerie, FC : Forêt claire, FM : Formation marécageuse, Sa : Savane, PL : Plantation, CJ : Champs et jachères, PE : Plan d'eau, EH : Etablissement humain, SN : Sol nu. Source : Images Landsat TM 2000 et OLI 2020.

La plus importante perte a été enregistrée au niveau des savanes, soit 25493 ha qui se sont converties en forêts claires (133,07 ha), en plantations (1168,39 ha), en champs/jachères (24069,48 ha), en plans d'eau (42,37 ha), en établissements humains (63,94 ha) et en sols nus (15,71 ha). Seulement 19866,32 ha se sont stabilisées sur la période considérée. Celles-ci sont suivies des formations marécageuses qui ont enregistré une perte de 3970 ha, résultant de la conversion de 0,20 ha en plantations, 3915 ha en champs/jachères, 49,77 ha en plan d'eau, 4,26 ha en sols nus pendant que 605,44 ha sont restés stables entre 2000 et 2020.

Par rapport aux formations non forestières (Tableau 2), la plus importante perte a été observée au niveau des champs/jachères avec 388 ha issue de leur conversion en forêts galeries (85,33 ha), en forêts claires (0,37 ha), en formation marécageuses (4,09 ha), en savanes (12,60 ha), en plantation (85,77 ha), en plan d'eau (35,81 ha), en établissements humains (140,81 ha) et en sols nus (22,84 ha). La superficie des champs/jachères stabilisée a été estimée à 22376,80 ha entre 2000 et 2020. Ensuite c'est au niveau des plantations (PL) que l'on enregistre la seconde perte la plus importante estimée à 163 ha qui se sont converties en champs/jachères (exclusivement) pour 138,61 ha qui sont restés stabilisées.

Au sujet des gains de superficies entre 2000 et 2020, on note une progression notoire au niveau des superficies des formations non forestières estimée à 31124 ha. Cela s'explique par les augmentations de superficies relevées au niveau des plantations qui sont passées de 302 ha en 2000 à 1456 ha en 2020 ; des champs et jachères qui ont passé de 22764 ha en 2000 à 51771 ha en 2020 ; des plans d'eau qui ont progressé de 51 ha 2000 à 190 ha en 2020 ; des établissements humains qui ont augmenté de 121 ha en 2000 à 332 ha en 2020 ; et enfin les sols nus passant de 48 ha en 2000 à 68 ha en 2020.

Il importe de relever que les plus importantes augmentations obtenues au niveau des formations non forestières proviennent de la cession d'une partie des superficies de toutes les formations végétales naturelles aux plantations et aux champs/jachères. On peut donc dire que les activités agricoles ont contribué à la détérioration du couvert végétal dans la commune de Kléla entre 2000 et 2020.

3.2.3 Analyse des Taux Annuels d'Evolution des Formations Végétales Naturelles et Anthropiques

Les résultats des taux d'évolution des différentes catégories d'occupation (Fig. 6) indiquent que les formations végétales naturelles (FG + FC + FM + Sa) connaissent annuellement 2,26% et 2,80% de régression, respectivement à Cinzana et à Kléla entre 2000 et 2020. Au même moment, des gains annuels sont estimés à 2,30 et 6,54% pour les champs et jachères (CJ) puis à 2,66 et 8,41% pour les autres formations non forestières (PE, EH et SN), respectivement à Cinzana et à Kléla. Il ressort des résultats de la Fig. 6 que les superficies des formations naturelles et celles des formations non forestières évoluent les unes et les autres dans le sens inverse avec une décroissance pour les premières et une augmentation pour les secondes.

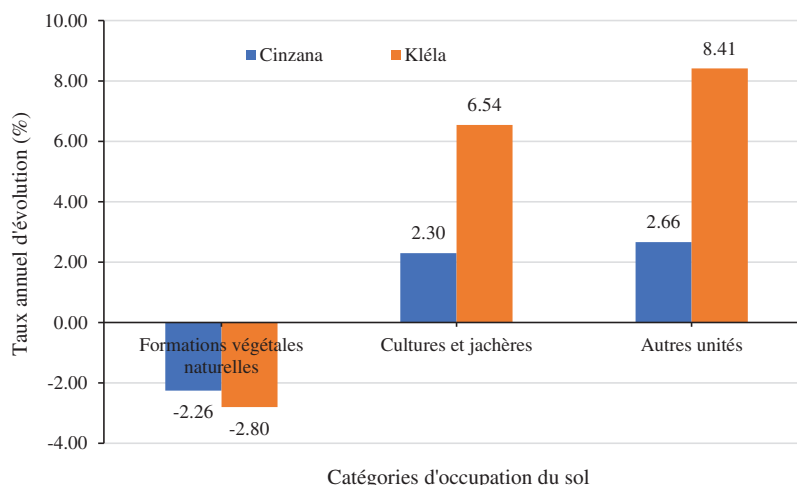


Figure 6: Taux annuel d'évolution des catégories d'occupation du sol à Cinzana et à Kléla

3.3 Taux de Déforestation et de Dégradation du Couvert Forestier entre 2000 et 2020

3.3.1 Taux de Déforestation et de Dégradation du Couvert Forestier entre 2000 et 2020 dans la Commune de Cinzana

Le [Tableau 3](#) présente les taux global et annuel d'évolution du couvert végétal dans la commune de Cinzana entre 2000 et 2020.

Tableau 3: Taux de déforestation et de dégradation du couvert forestier entre 2000 et 2020 (Cinzana)

Phénomène	Evolution globale (ha)	Taux global (%)	Evolution annuelle (ha)	Taux annuel (%)
Déforestation brute	27862,52	51,56	1393,13	2,58
Dégradation brute	4588,68	8,49	229,43	0,42
Régénération forestière	3462,46	6,41	173,12	0,32
Amélioration forestière	2028,64	3,75	101,43	0,19
Déforestation nette	24400,06	45,15	1220,00	2,26
Dégradation nette	2560,04	4,74	128,00	0,24

Note: Source : Images Landsat TM 2000 et OLI 2020.

Entre 2000 et 2020, l'évolution du couvert végétal est marquée par une déforestation brute de 27862,52 ha (51,56%), soit 2,58% par an ([Tableau 3](#)). La déforestation nette est estimée à 24400 ha (45,15%), soit 2,26% l'an. Par contre, la régénération naturelle n'a dépassé guère 3462,46 ha (6,41%) avec un taux annuel de 0,32%. En outre, la dégradation brute est estimée à 4588,68 ha (8,49%), soit un taux annuel de 0,42% contre une amélioration forestière de l'ordre de 2028,64 ha (3,75%), et une progression annuelle de 0,19% de 2000 à 2020. La différence entre la dégradation brute et l'amélioration forestière conduit à la dégradation nette qui estimée à 2560,04 ha soit 4,74% entre les deux dates, ce qui correspond à un taux annuel de 0,24%. Ces résultats résultent d'un déséquilibre entre le pouvoir de régénération naturelle du couvert végétal et la forte pression anthropique due aux besoins sans cesse croissants en terres cultivables dans la zone de production des cultures sèches du Mali.

3.3.2 Taux de Déforestation et de Dégradation du Couvert Forestier entre 2000 et 2020 dans la Commune de Kléla

Le **Tableau 4** présente l'évolution des taux de déforestation et de dégradation du couvert végétal de 2000 à 2020.

Tableau 4: Taux de déforestation et de dégradation du couvert forestier entre 2000 et 2020 (Kléla)

Phénomène	Evolution globale (ha)	Taux global (%)	Evolution annuelle (ha)	Taux annuel (%)
Déforestation brute	30643,19	56,21	1532,16	2,81
Dégradation brute	167,68	0,31	8,38	0,02
Régénération forestière	112,06	0,21	5,60	0,01
Amélioration forestière	133,07	0,24	6,65	0,01
Déforestation nette	30531,13	56,01	1526,56	2,80
Dégradation nette	34,61	0,06	1,73	0,003

Note: Source : Images Landsat TM 2000 et OLI 2020.

Il ressort que l'évolution du couvert végétal dans la commune de Kléla a enregistré une déforestation brute de 30643,19 ha pour un taux global de 56,21% (2,81%/an) entre 2000 et 2020 (**Tableau 4**). Par ailleurs, la dégradation brute est évaluée à 167,68 ha pour un taux global de 0,31% (0,02%/an) tandis que l'amélioration du couvert végétal ne vaut que 133,07 ha (0,01%/an). Ainsi, la dégradation nette qui résulte de l'écart entre la dégradation brute et l'amélioration forestière est estimée à 34,61 ha, soit 0,06% de taux global et un taux annuel d'amélioration de 0,003%. La déforestation nette était estimée sur la même période à 30531,13 ha contre une faible régénération forestière qui n'a pu dépasser 112,06 ha (0,01%/an). Un tel écart entre la déforestation et le pouvoir de régénération forestière conjugué à une pression anthropique accrue en lien avec l'utilisation des terres agricoles présage une détérioration continue du couvert végétal dans la zone de production cotonnière du Mali.

Globalement, l'analyse des états d'évolution du couvert végétal dans les deux communes indique que les taux de déforestation sont plus importants que ceux de la dégradation et que ces deux taux pris ensemble sont également plus forts que les taux de régénération forestière et de l'amélioration forestière entre 2000 et 2020. On peut donc conclure que la tendance évolutive globale observée est un changement systématique des modes d'utilisation des terres marqué par le passage des formations végétales naturelles en cultures et jachères et accessoirement en d'autres formations non forestières telles que les sols nus, les établissements humains, et les plans d'eau. Ces changements pourraient se justifier par un certain nombre de facteurs, notamment le fait qu'avec l'augmentation de la population et son corollaire de besoins croissants en termes d'alimentation et de revenus, en l'absence d'une augmentation de la productivité agricole, les agriculteurs se tournent vers le défrichement nouvelles superficies au détriment de la préservation des formations végétales naturelles. Ces facteurs pourraient être exacerbés par les mauvaises pratiques agricoles telles que la faible intensification agricole, l'exploitation du bois pour les besoins en énergie, le surpâturage et les effets du changement climatique.

3.4 Intensité et Vitesse de Changement des Catégories d'Occupation des Terres de 2000 à 2020

Les **Figs. 7** et **8** présentent l'intensité et la vitesse de changements des catégories d'occupation des terres entre 2000 et 2020 à Cinzana et à Kléla, respectivement. A Cinzana, on note que toutes les

formations végétales naturelles (FG, FC, SA), excepté les FM ont connu des changements (gain ou perte de superficie) rapides (changement situé à droite de la zone d'intensité uniforme). Les autres formations non forestières (CJ, PE) ont connu des changements lents (changement situé à gauche de la zone d'intensité uniforme) entre 2000 et 2020 à l'exception des établissements humains (EH) et des sols nus (SN) qui ont connu des gains rapides. A Kléla, toutes les formations végétales naturelles (FG, FM, SA) ont connu des changements rapides excepté les FC dont le changement est lent durant la même période.

L'analyse des changements à Cinzana montre pour les formations naturelles, des pertes rapides (FG, FC, FM) et lentes (FM) et des pertes lentes pour les formations non naturelles (CJ, PE, EH, SN). Par ailleurs, des gains de superficies particulièrement actifs ou rapides (FC, EH, SN) et lents (PE, CJ, Sa, FM, FG) ont été observés entre 2000 et 2020. A Kléla, l'analyse des changements pour les formations naturelles (FG, FM, SA) a montré des pertes rapides excepté les FC où la perte est lente. La perte de superficie est particulièrement plus marquée au niveau des formations marécageuses (FM). D'autre part, les formations anthropiques ont connu des pertes plus rapides (SN) et lentes (PE, CJ), mais surtout des gains particulièrement actifs ou rapides (EH, SN, PE, CJ, PL) qui sont surtout occasionnés par les pertes enregistrées au niveau des formations naturelles. Tous les gains observés au niveau de ces dernières sont lents comme le montrent les résultats sur la Fig. 8.

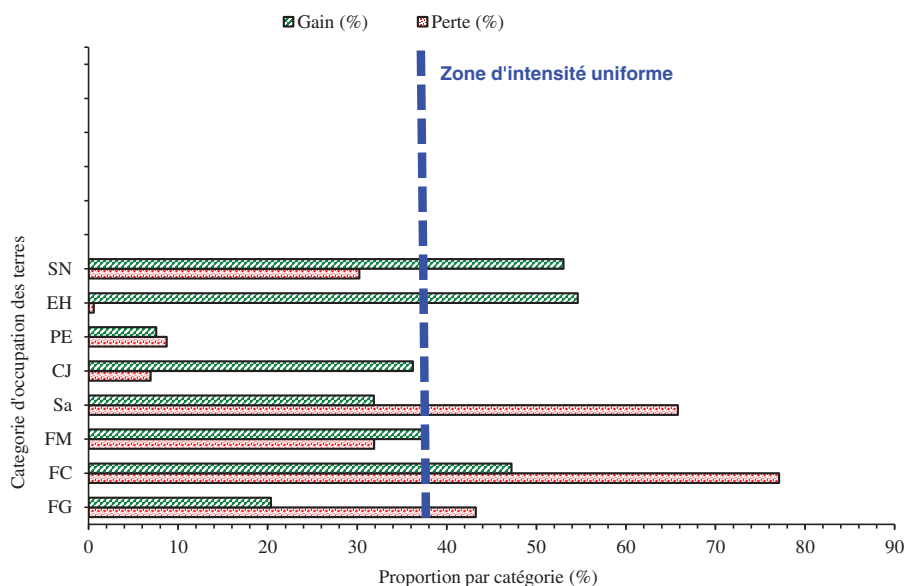


Figure 7: Vitesse de changement des catégories d'occupation des terres à Cinzana

L'analyse des résultats pour les deux sites semble montrer que les pertes rapides au niveau des formations naturelles entraînent des gains rapides au niveau des formations anthropiques. Ces résultats confirment ceux observés au niveau de la matrice de conversion (Tableau 2) qui montraient bien des niveaux de transition des formations végétales naturelles en des catégories anthropiques relativement importantes. Cela suppose des niveaux de pression anthropique plus marqués sur les formations naturelles pour satisfaire les besoins en terres agricoles.

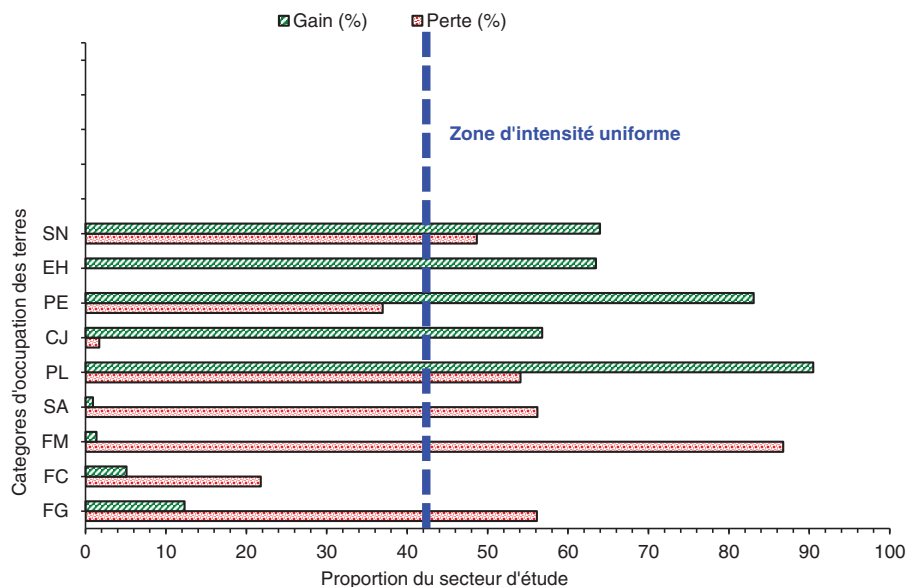


Figure 8: Evaluation de l'intensité et de la vitesse de changement des catégories d'occupation des terres à Kléla

3.5 Dynamique Démographique et ses Effets sur les Formations Naturelles dans la Zone de Recherche

Afin d'apprécier le poids de la pression démographique sur les formations naturelles dans la zone de recherche, nous avons comparé l'évolution de la population et la superficie des formations naturelles en 2000 et 2020 pour les deux sites de recherche (Figs. 9 et 10).

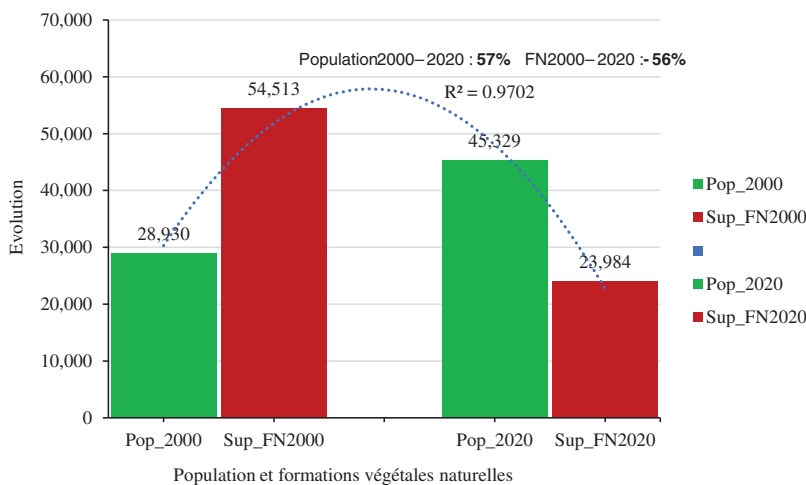


Figure 9: Dynamique d'Evolution de la Population et des Superficies des FN à Cinzana entre 2000 et 2020

A travers les résultats des Figs. 9 et 10, on constate une augmentation de la population passant de 28930 à 45329 habitants puis de 19776 à 31277 habitants en 2000 et en 2020, respectivement à Cinzana et Kléla. Par contre, les superficies des formations naturelles (FN) ont connu une baisse entre 2000 et 2020 en passant de 54513 ha à 23984 ha puis de 54039 ha à 29639 ha, respectivement à Cinzana

et à Kléla. Suivant les zones, on note que le site de Cinzana a perdu 56% de ses formations végétales naturelles à la différence de Kléla où les pertes sont estimées à 45%. Il ressort de cette analyse que l'augmentation de la population s'accompagne d'une régression des formations naturelles. En valeur absolue, le test de corrélation de Pearson indique une corrélation parfaite ($r = 1$) entre la dynamique de l'occupation des terres et la dynamique démographique au seuil de 0.01 entre 2000 et 2020. Le coefficient de détermination (R^2) est de 0,970 et 0,513, respectivement à Cinzana et à Kléla. A Cinzana, 97,0% des variations de la superficie sont expliquées par les variations en taille de la population. A Kléla, 51,3% des variations de la superficie sont expliquées par les variations en taille de la population.

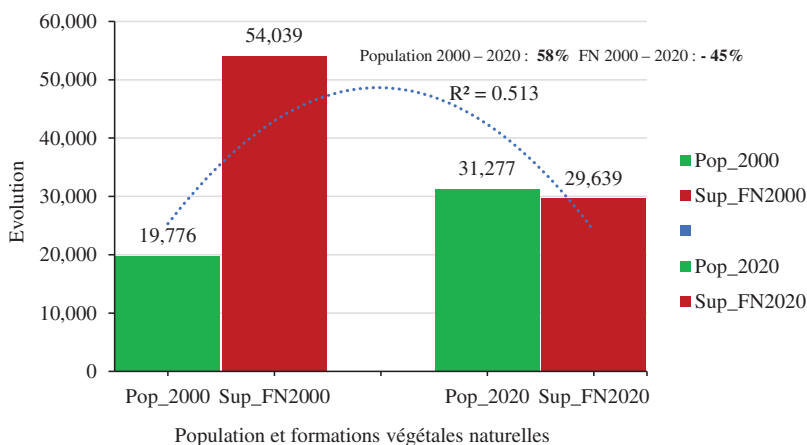


Figure 10: Dynamique d'évolution de la population et des superficies des FN à Kléla entre 2000 et 2020

La différence observée entre les coefficients de détermination serait liée au fait que Kléla étant située dans la zone cotonnière, les exploitations bénéficiant d'un meilleur encadrement et avec accès plus important aux intrants peuvent avoir mieux appliqué l'intensification agricole contrairement à celles de Cinzana qui ont moins accès aux intrants et à l'encadrement permettant d'augmenter leur productivité. Pour cela, il leur faut plus de défrichage pour augmenter leur production, ce qui peut expliquer en partie le niveau de pression élevé à Cinzana par rapport à Kléla. De plus, dans la zone humide les cultures pratiquées permettent d'utiliser moins d'espaces pour satisfaire aux besoins alimentaires des populations qu'en zone sèche. En effet, le maïs constitue la principale culture vivrière en zone humide avec une réponse plus forte à l'utilisation des intrants (productivité plus élevée) tandis que le mil est la culture principale en zone sèche (moins productive). Pour ce faire, un producteur en zone sèche aura besoin de plus de superficie pour satisfaire ses besoins alimentaires qu'un producteur en zone humide.

Les activités humaines ont un lien direct ou indirect avec l'augmentation de la population à travers un accroissement de ses besoins. C'est pourquoi l'accroissement démographique est considéré, non pas comme le principal facteur direct mais comme un facteur indirect qui sous-tend les facteurs directs tels que l'extension des terres agricoles, l'extension des bâtis et établissements humains, l'augmentation des besoins en bois énergie, bois d'œuvre et de service, le surpâturage, et l'occurrence des feux de végétation.

4 Discussion

Dans la commune de Cinzana ou zone de cultures sèches, l'analyse de la matrice de conversion a montré que les différentes unités d'occupation ont diversement enregistré des pertes et des gains entre

2000 et 2020. Elle a mis en évidence une régression plus marquée au niveau des formations naturelles (FG, FC, FM et SA) au profit des formations non naturelles ou anthropiques (PL, CJ, PE, SN). Les résultats ont montré un taux de réduction global estimé à 45,15% pour un taux annuel de 2,26% sur les formations naturelles et une augmentation globale sur les formations anthropiques de 45%, soit 2,30% par an, pour la commune de Cinzana. Par ailleurs, des gains plus importants ont été enregistrés au niveau des formations non forestières dans la commune de Cinzana.

Dans la commune Kléla, les tendances observées restent dans la même dynamique voire plus marquées qu'à Cinzana du fait d'une très grande conversion des formations naturelles en formations anthropiques (notamment en champs/jachères et en plantations). Le taux global de perte de superficie pour les formations naturelles a été évalué à 56%, soit 2,80% par an alors que les champs et jachères ont enregistré 131% de taux global pour 6,54% par an. Ces augmentations constatées au niveau des formations non naturelles sont surtout dues à la conversion des unités naturelles qui font l'objet de convoitise pour satisfaire les besoins des populations (notamment en alimentation, habitation et énergie). Ainsi, l'analyse de la dynamique d'occupation a mis en évidence une tendance régressive continue des formations naturelles et une tendance évolutive montante des formations non naturelles (champs et jachères, établissements humains) résultant de l'anthropisation des formations naturelles. Des résultats similaires ont été obtenus par [37–40].

L'analyse du taux d'évolution du couvert végétal entre 2000 et 2020 a révélé un signe de perturbation se manifestant par une déforestation plus importante au détriment de la reconstitution naturelle au niveau des deux zones. Ceci s'explique en partie par la forte pression anthropique en vue de satisfaire aux besoins en terres cultivables dans les différentes zones de production céréalière et cotonnière. En effet, il faut aussi rappeler qu'avec l'augmentation de la population qui crée des nouveaux besoins alimentaires, les agriculteurs cherchent à les compenser en accroissant des superficies cultivées. Il y a lieu de prendre en compte les autres facteurs en lien avec la satisfaction des besoins des populations notamment le bois énergie, les établissements humains, les charges pastorales [41,42] sachant que les agriculteurs au Mali sont quasiment tous des agro-éleveurs. Une évaluation de la dynamique d'évolution de la population et des formations naturelles (FN) a permis de mettre en évidence que l'augmentation de la population entraîne une diminution des FN dans la zone de recherche. Ce résultat est conforme avec celui de [15] qui avaient trouvé une forte corrélation entre la dynamique d'occupation des terres et l'augmentation de la population en zone cotonnière du Mali. En plus de l'effet démographique, il faut ajouter l'impact des pratiques agricoles et les feux de végétation d'origine anthropique [17,43] sur les dotations environnementales. Cette thèse est en phase avec [12] et [11] pour qui, l'environnement n'est pas constant et subira inévitablement la dégradation causée par les actions humaines.

Par ailleurs, l'accès plus facile aux intrants favorisé par l'encadrement en zone cotonnière permet aux exploitations d'intensifier leur production [12] comparativement aux exploitations de la zone céréalière (accès limité aux intrants et à l'encadrement). En effet, la zone cotonnière, compte tenu du rôle stratégique du coton pour l'Etat, bénéficie d'une plus grande attention en termes d'assistance (encadrement, subvention des intrants), contrairement à la zone céréalière avec un système d'encadrement plus faible et une subvention moins importante. La culture du maïs en zone cotonnière constitue l'exemple le plus illustratif d'une meilleure réponse aux engrais (2345 kg/ha en 2021) contre 716 kg/ha (3,3 fois moins que le maïs) pour le mil dans la zone céréalière [44]. Ainsi, une analyse à court terme ne nous permet pas de confirmer l'hypothèse d'un possible impact négatif des pesticides et engrais sur le niveau de dégradation des terres dans la zone de recherche.

De plus, d'autres facteurs comme les changements climatiques contribuent à l'amplification des effets des actions anthropiques. Cette idée corrobore avec les résultats de plusieurs auteurs [17,20,38,45,46] pour qui les actions anthropiques associées à la variabilité climatique, affectent directement ou indirectement la production végétale, la végétation et les processus de dégradation et les fonctions écosystémiques.

L'examen de l'intensité de changement a montré que toutes les formations naturelles ont enregistré soit des pertes rapides entre 2000 et 2020 à la différence des formations non naturelles qui ont connu des gains rapides. Les pertes les plus importantes ont été relevées au niveau des forêts galeries, les forêts claires et les savanes alors qu'on a enregistré les gains les plus importants au niveau des champs/jachères et les plantations. Ce résultat est en phase avec la dynamique d'évolution des superficies au niveau des catégories anthropiques dans une perspective d'augmentation des productions pour faire face à la croissance démographique. De même, ces résultats corroborent avec ceux obtenus en zone soudanienne du Bénin [39,47] et du Burkina [48,49], indiquant une régression continue des formations naturelles au profit des formations anthropiques à partir d'une étude diachronique.

L'analyse de la vitesse de changement a permis de mettre en évidence la rapidité de la perte sur les principales formations naturelles (forêts galeries, forêts claires et savanes) et un gain rapide au niveau des établissements humains et sols nus. Globalement, la rapidité des pertes de superficies des formations naturelles s'accompagne d'une rapidité des gains des formations anthropiques. Cela est conforme aux résultats de [20] qui dans leur recherche couvrant la période 1975 à 2013 sur la quantification des catégories d'occupation des sols en Afrique de l'Ouest, avaient trouvé les forêts et les autres types de végétations comme des perdants actifs sur l'intervalle 2000 et 2013. Le facteur le plus plausible serait la croissance démographique et l'impact négatif des activités humaines sur le système naturel au profit des catégories gagnantes actives (terres cultivées, établissements humains, et autres formes d'utilisation humaine).

Enfin, les résultats décrivent l'évolution des unités paysagères dans les deux zones entre 2000 et 2020 et mettent en évidence un déséquilibre des formations naturelles au profit des terres de cultures. Ainsi, le nouveau type d'équilibre est une tendance à la diminution (voire disparition) des formations naturelles. Cette situation appelle à encourager la prise de mesures politiques pour une transition agroécologique.

5 Conclusion

La dynamique d'occupation des terres dans les communes de Cinzana et Kléla a été réalisée à partir de l'analyse diachronique à travers des images satellitaires Landsat TM de 2000 et OLI de 2020. Elle a permis de mettre en évidence une régression des formations végétales naturelles au profit des formations anthropiques et particulièrement les champs et jachères. Les résultats relevés au niveau de l'intensité du changement des principales catégories suivent les mêmes tendances de régression des formations naturelles et d'augmentation des unités anthropiques, traduisant une forte pression subie par les formations naturelles occasionnées par l'expansion des champs et jachères et autres formations anthropiques. L'estimation de la vitesse de cette intensité de changement au niveau de ces unités a permis de mettre en évidence une plus grande rapidité des pertes de superficies des formations naturelles (FG, FC, FM, SA) qui s'en suit d'une rapidité des gains des formations anthropiques. Si l'accroissement démographique, ne peut être considéré comme principal facteur de la dégradation des terres, il joue un rôle indirect qui sous-tend les facteurs directs (extension des terres agricoles, établissements humains, bois énergie, bois d'œuvre, bois de service, surpâturage, occurrence des feux de végétation) influençant la dynamique d'occupation des terres au niveau des

sites de recherche. Une pression plus forte sur les formations naturelles dans la zone de recherche et plus particulièrement à Cinzana (cultures sèches) a été observée. Les exploitations à Cinzana avec un accès limité aux technologies agricoles (intrants) et services d'encadrement (ne pouvant donc augmenter leur productivité agricole), semblent être dans une logique de défrichage de nouveaux champs comme principal moyen d'augmenter leur production. L'intensification agricole à travers la facilitation de l'accès aux technologies agricoles, aux services d'encadrement, et l'utilisation des pratiques agroécologiques est nécessaire pour atténuer l'impact de la dynamique d'occupation des terres sur la productivité agricole. L'évolution des unités paysagères dans les deux zones entre 2000 et 2020 présage une anthropisation à outrance des formations naturelles qui pourrait compromettre la durabilité desdites formations au profit des terres de cultures avec des risques certains de baisse de productivité au niveau de ces terres. Cet état des choses appelle à encourager la prise de mesures politiques pour une transition agroécologique et ouvre la perspective d'une recherche sur l'évaluation de l'intensité d'utilisation des pratiques agroécologiques dans la zone de recherche.

Remerciements/Acknowledgment: Nous adressons notre profonde gratitude à la coordination du Projet FAIR-Sahel/Mali, mis en œuvre par l'Institut d'Economie Rurale (IER), notamment au Dr. Harouna Coulibaly pour avoir accepté soutenir financièrement la phase terrain. Les auteurs tiennent à remercier les agents du Projet FAIR-Sahel, Odou Danioko et Seydou Dembelé (site de Kléla), Seni Coulibaly et Samba Doumbia (site de Cinzana) pour leurs énormes efforts à la prise de relevés GPS *in situ* et Danfing Diarra (assistant sur le Projet FAIR-Sahel) pour son appui à l'acquisition des images satellites des sites de recherche. Enfin nous adressons nos sincères remerciements à l'équipe éditoriale de la Revue Internationale de Géomatique (RIG) et aux reviewers pour les observations pertinentes formulées qui ont permis d'améliorer la qualité de ce papier.

Financements/Funding Statement: Ce travail a bénéficié de l'appui financier du Projet FAIR-Sahel, suivant l'accord de financement UE Devco et AFD, et mis en œuvre par l'Institut d'Economie Rurale (IER), République du Mali.

Contributions des Auteurs/Author Contributions: Les auteurs confirment leur contribution au papier comme suit : conception de l'étude : M. Sidibé, A. K. N. Aoudji, Y. Issifou Moumouni, A. Zannou ; collecte des données : M. Sidibé, Y. Issifou Moumouni ; analyse et interprétation des résultats : M. Sidibé, A. K. N. Aoudji, Y. Issifou Moumouni, A. Zannou, I. Sacko, I. Saliou, B. Koné, A. E. Assogbadjo, A. Zannou ; préparation du brouillon du manuscrit : M. Sidibé, A. K. N. Aoudji, Y. Issifou Moumouni, A. Zannou, I. Sacko, I. Saliou, B. Koné, A. E. Assogbadjo, A. Zannou. Tous les auteurs ont examiné les résultats et approuvé la version finale du manuscrit.

Disponibilité des Données et du Matériel/Availability of Data and Materials: Les données seront rendues disponibles à la demande.

Conflits d'Intérêt/Conflicts of Interest: Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt à signaler concernant la présente étude.

Références

1. Oloukoi J, Mama JV, Agba F. Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le Département des Collines au Bénin. *Téledétection*. 2006;6(4):305–23.
2. Fresco LO. Imaginable futures: a contribution to thinking about land use planning. In: *The future of the land*. Chichester: Wiley; 1994. p. 1–8.

3. Verburg P. Exploring the spatial and temporal dynamics of land use with special reference to China. CIP-Koninklijke Bibliotheek, Den Haa, Wageningen University; 2000.
4. Liu M, Tian H. China's land cover and land use change from 1700 to 2005: estimations from high-resolution satellite data and historical archives. *Global Biogeochem Cycles*. 2010;24(3).
5. Kanianska R. Agriculture and its impact on land-use, environment, and ecosystem services. *Landscape ecology-The influences of land use and anthropogenic impacts of landscape creation*. Croatia: InTech; 2016. p. 3–26.
6. Bationo A, Hartemink AE, Lungo O, Naimi M, Okoth P, Smaling EMA, et al. African soils: their productivity and profitability of fertilizer use. In: Background paper for the African fertilizer summit. Abuja, Nigeria: IFDC; 2006.
7. Sidibé D. Mali agricultural pilot: soil baseline and background research. In: Oxfam America research report. Bamako, Mali, 2013.
8. FAO. Situation et faits nouveaux dans le secteur forestier. Rome; 2005. p. 153.
9. Kanté S. Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud. Netherlands, Wageningen University; 2001.
10. Ouédraogo S. Intensification de l'agriculture dans le plateau central du Burkina Faso : une analyse des possibilités à partir des nouvelles technologies. Centre for Development Studies, University of Groningen; 2005.
11. Benjaminsen TA. The malian cotton zone: economic success, but environmental failure? In: Politics, property and production in the West African Sahel. Stockholm: Elanders Gotab; 2001. p. 256–78.
12. Boserup E. The conditions of agricultural growth: the economics of agrarian change under population pressure, London: Earthscan; 1965. p. 108.
13. Hountondji YC, Ozer P, Nicolas J. Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection a basse résolution au Niger. *Cybergeog*. 2004;10(291):1–18.
14. Degla KP. Rentabilité économique et financière des exploitations cotonnières basées sur la Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols et des Ravageurs au Nord-Bénin. In: Bull Rech Agron Bénin BRAB Numéro Spéc Cot Sept. 2012. p. 26–35.
15. Dembele S, Soumaré M, Diakite CH, Gaillard D. Dynamiques des paysages régionaux en zone cotonnière du Mali. *Tropicultura*. 2018;36(2):232–42
16. Ballo A, Traore SS, Coulibaly B, Diakité CH, Diawara M, Traore A, et al. Pressions anthropiques et dynamique d'occupation des terres dans le terroir de ziguéna, zone cotonnière du Mali. *Eur Sci J*. 2016;12(5):90–9.
17. Touré I, Larjavaara M, Savadogo P, Bayala J, Yirdaw E, Diakite A. Land degradation along a climatic gradient in Mali: farmers' perceptions of causes and impacts. *L Degrad Dev*. 2020;31(18):2804–18.
18. Gonzalez P. Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Clim Res*. 2001;17(2): 217–28.
19. Ibrahim YZ, Balzter H, Kaduk J. Land degradation continues despite greening in the Nigeria-Niger border region. *Glob Ecol Conserv*. 2018;16:e00505.
20. Barnieh BA, Jia L, Menenti M, Jiang M, Zhou J, Lv Y, et al. Quantifying spatial reallocation of land use/land cover categories in West Africa. *Ecol Indic*. 2022;135:108556.
21. Assefa S, Tadesse S. The principal role of organic fertilizer on soil properties and agricultural productivity-a review. *Agri Res Tech Open Access J*. 2019;22(2):556192. doi:10.19080/ARTOAJ.2019.22.556192.
22. Soumaré M, Alpha A, Dedieu C, Sidibe O, Sanogo K. La faiblesse des politiques publiques de soutien à l'agroécologie au Mali. 2022. Available from: <https://agritrop.cirad.fr/606495/2/ID606495.pdf>. [Accessed 2023].
23. FAO/FRA. Couvert forestier d'après la carte des forêts du monde 2000. In: Global forest resources assessment 2000 (FRA 2000) main report. Rome: FAO; 2000. p. 36.

24. GIEC. Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie. GIEC I for GES (IGES) pour le, editor. Kanapawa, Japon: Institute for Global Environmental Strategies (IGES); 2003. p. 581. Available from: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>. [Accessed 2023].
25. MEA 2009. Quatrième rapport national sur la mise en œuvre de la convention sur la diversité biologique. Rapport Bamako; 2009. p. 104.
26. Djaouga M, Arouna O, Zakari S, Kouta S, Moumouni YI, Mertens B, et al. Cartographie de la déforestation à la base de l'imagerie satellitaire dans le département de l'Alibori au nord du Bénin. *Rev Française Photogrammétrie Télédétection*. 2021;223:200–16.
27. Ayena A, Sourou TVH, Amoussou E, Vissin EW. Impact de la dynamique de l'occupation du sol sur les berges dans la vallée du fleuve Niger au Bénin. *Rev Ivoir Sci Technol*. 2017;29:119–35.
28. Sylla D, Taibou BA, Diallo MD, Mbaye T, Diallo A, Peiry JL, et al. Dynamique de l'occupation du sol de la commune de Tèssékéré de 1984 à 2015 (Ferlo Nord, Sénégal). *J Anim Plant Sci (J Anim Plant Sci)*. 2019;40(3):6674–89.
29. Kerle N, Van Wyk De Vries B. The 1998 debris avalanche at Casita volcano, Nicaragua—investigation of structural deformation as the cause of slope instability using remote sensing. *J Volcanol Geotherm Res*. 2001;105(1–2):49–63.
30. Kioko J, Okello MM. Land use cover and environmental changes in a semi-arid rangeland, Southern Kenya. *J Geogr Reg Plan*. 2010;3(11):322–6.
31. Arouna O. Cartographie et modélisation prédictive des changements spatio-temporels de la végétation dans la Commune de Djidja au Bénin: implications pour l'aménagement du territoire. Doctorat unique Université d'Abomey-Calavi (Bénin); 2012. Available from: <http://www.academicjournals.org/ijbc>. [Accessed 2023].
32. Gislason PO, Benediktsson JA, Sveinsson JR. Random forests for land cover classification. *Pattern Recognit Lett*. 2006;27(4):294–300.
33. Breiman L. Random forests. *Mach Learn*. 2001;45(1):5–32.
34. FAO/FRA. Evaluation des ressources forestières mondiales 2015. Rapport National. 2015;2226.
35. Issifou Moumouni Y, Toko Imorou I. Estimation des émissions dues à la déforestation dans le bassin moyen de la Sota (Nord-Bénin). *les Cah l'ACAREF*. 2019;1(3):395–408.
36. Issifou Moumouni Y. Evaluation de la déforestation et de la dégradation du couvert végétal et estimation des gaz à effet de serre correspondants dans le bassin moyen de la Sota au Nord-Bénin (Thèse de doctorat). Université d'Abomey-Calavi; 2020.
37. Arouna O, Toko I, Djogbénou CP, Sinsin B. Comparative analysis of local populations' perceptions of socioeconomic determinants of vegetation degradation in sudano-guinean area in Benin (West Africa). *Int J Biodivers Conserv*. 2011;3(7):327–37.
38. Diallo H, Bamba I, Barima YSS, Visser M, Ballo A, Mama A, et al. Effets combinés du climat et des pressions anthropiques sur la dynamique évolutive de la végétation d'une zone protégée du Mali (Réserve de Fina, Boucle du Baoulé). *Sci Chang planétaires/Sécheresse*. 2011;22(2):97–107.
39. Imorou IT, Arouna O, Zakari S, Djaouga M, Thomas O, Kinmadon G. Évaluation de la déforestation et de la dégradation des forêts dans les aires protégées et terroirs villageois du bassin cotonnier du Bénin. In *Conférence OSFACO: Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique*. Cotonou, Bénin; 2019; p. 1–25.
40. Samuel Y, Mamounata B, Dabiemo MH. Aménagement hydro-agricole et dynamique spatio-temporel des unités d'occupation des terres dans le bassin versant de Tapoa, Burkina Faso. *Int J Innov Appl Stud*. 2020;30(2):571–85.
41. Olsson L, Eklundh L, Ardö J. A recent greening of the Sahel—trends, patterns and potential causes. *J Arid Environ*. 2005;63(3):556–66.

42. Gondwe MF, Cho MA, Chirwa PW, Geldenhuys CJ. Land use land cover change and the comparative impact of co-management and government-management on the forest cover in Malawi (1999–2018). *J Land Use Sci.* 2019;14(4–6):281–305.
43. Lassina S, Alain SW, Sata D, Patrice S. Perceptions locales des perturbations écologiques sur la dynamique de la végétation de la réserve de bios-phère transfrontalière Parc National du W, Afrique de l'Ouest Local perceptions of ecological disturbances on the. *Rev Ecosystèmes Paysages.* 2023;3(2):1–14.
44. CPS/SDR E. Rapport de l'Enquête Agricole de Conjoncture EAC 2021/2022; 2022. Available from: <https://instat-mali.org>. [Accessed 2023].
45. Jnr SD. Land degradation and agriculture in the Sahel of Africa: causes, impacts and recommendations. *J Agric Sci Appl.* 2014;3(3):67–73.
46. Assede ESP, Orou H, Biaou SSH, Geldenhuys CJ, Ahononga FC, Chirwa PW. Understanding drivers of land use and land cover change in Africa: a review. *Curr Landsc Ecol Reports.* 2023;1–11(2):62–72.
47. Mama A, Sinsin B, De Cannière C, Bogaert J. Anthropisation et dynamique des paysages en zone soudanienne au nord du Bénin. *Tropicultura.* 2013;31(1):78–88.
48. Tapsoba A, Kokou K, Sanou Z. Dynamique spatiale d'occupation du sol à la périphérie du barrage de Bagré au Burkina Faso. *Rev Ivoi Sci Technol.* 2023;41:66–82.
49. Sama A, Ramdé Z, Ouédraogo PC, Sikuzani YU, Salomon W, Dipama JM, et al. Pression anthropique et dynamique de l'occupation du sol autour du corridor n 1 du complexe écologique Pô-Nazinga-Sissili au Burkina Faso. *Tropicultura.* 2023;41:1–20