

Pression anthropique et dynamique végétale dans la Forêt Classée de Tiogo au Burkina Faso: apport de la Télédétection

B. Tankoano^{1,2*}, M. Hien¹, N.H. Dibi¹, Z. Sanon¹, J.T. Yameogo¹ & I. Somda¹

Keywords: Forest Degradation- Dynamics of woody cover- Remote sensing and GIS- Burkina Faso

Résumé

Au Burkina Faso, la surface des aires protégées diminue chaque année sous l'effet de la pression anthropique et des changements climatiques. Afin de bien appréhender cette dégradation exacerbée du couvert végétal, une étude a été initiée dans la Forêt Classée de Tiogo. Elle avait pour objectif principal de mettre en évidence la dynamique forestière entre 1986 et 2014 au moyen de la télédétection et des Systèmes d'information géographique. Pour ce faire, une exploitation des images Landsat de 1986 et de 2014 a été faite. Des traitements numériques d'images satellitaires ont été couplés aux données floristiques (description des types de végétation et le diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m) collectées sur le terrain. Ceci a permis d'identifier les forêts galeries, les savanes arborées (denses et claires), les savanes arbustives (denses et claires) et les champs. Les résultats cartographiques révèlent une régression de la couverture ligneuse de l'ordre de 0,49% par an entre 1986 et 2014. Cette régression de la végétation s'est faite au profit des champs qui ont augmenté de 3.347 ha. Ces résultats suggèrent la mise en place d'une politique efficace de gestion durable de la Forêt Classée de Tiogo pour éviter sa disparition à moyen terme.

Summary

Anthropogenic Pressure and Vegetation dynamics in the Classified Forest of Tiogo in Burkina Faso: Contribution of Remote Sensing

In Burkina Faso, the area of protected areas decreases yearly under the effect of anthropogenic pressure and climate change. In order to understand this extreme degradation of vegetation, a study was initiated in the Classified Forest of Tiogo. It aims at highlighting the forest dynamics between 1986 and 2014 using remote sensing and geographic information systems. To do this, Landsat images of 1986 and 2014 were analysed. Digital processing of satellite images was coupled with floristic data (dendrometric data) collected on the field. This allowed to identify gallery forests, wooded savannas (dense and clear), shrubby savannas (dense and clear) and fields. The cartographic results reveal a regression of forest canopy of about 0.49% per year between 1986 and 2014. This regression of vegetation is made to the benefit of agricultural fields that have increased by 3,347 ha. These results suggest the development of an effective policy of sustainable management of Tiogo Forest to prevent its disappearance in the medium term.

¹Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut du Développement Rural, Laboratoire des Systèmes Naturels, Bobo-Dioulasso, Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement, Burkina Faso.

²Université Félix Houphouët Boigny Abidjan-Cocody, UFR Biosciences et Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Abidjan, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant: Email: btankus67@yahoo.fr

Reçu le 09.04.15 et accepté pour la publication le 09.04.15

Introduction

Les forêts classées, les réserves de faune et les parcs constituent les sites privilégiés pour la conservation de la biodiversité au Burkina Faso (15, 18, 26). Le couvert végétal est l'une des composantes les plus importantes de l'occupation du sol dans une aire protégée. Elle caractérise la nature et l'état de conservation des espaces protégés. En effet, il conditionne la présence de la faune et de la diversité spécifique de la flore (26). Toutefois, la conservation de la biodiversité passe par la protection et la gestion des réservoirs que constituent les formations forestières classées ou protégées.

Malheureusement au Burkina Faso, on observe une forte dégradation de la végétation liée à de nombreux facteurs naturels et anthropiques. Même les aires protégées du pays n'échappent pas à cette dégradation. Le Burkina Faso a perdu 17,5% de son couvert forestier entre 1990 et 2010 (8). Cela a aussi été signalé par Bombiri (2) qui estime la réduction annuelle du couvert végétal du Burkina Faso à 4,04% entre 1992 et 2002. Il est clair qu'en absence d'une réelle volonté politique, ces réserves de biodiversité disparaîtront. Cette dégradation rapide des forêts expose les populations, surtout celles vivant en zone rurale, à des conditions de vie difficiles. En effet, leurs modes de vie sont essentiellement basés sur les profits et services tirés des ressources naturelles. Il s'agit entre autres de la fonction culturelle, du bois-énergie et des produits alimentaires issus de la cueillette, de la pêche et de la chasse.

Bien que la pression sur les ressources naturelles ne cesse de s'accroître, des données précises sur la dynamique de la végétation et sur l'appauvrissement de la biodiversité de certaines formations forestières font encore défaut au Burkina Faso. Pourtant, ces informations sont d'une importance capitale pour tout plan d'aménagement forestier visant une exploitation rationnelle des ressources végétales. C'est dans ce contexte que cette étude intitulée «Pression anthropique et dynamique végétale dans la Forêt Classée de Tiogo au Burkina Faso: apport de la télédétection» a été initiée.

Celle-ci propose d'améliorer les connaissances sur le phénomène de la dégradation dans la Forêt Classée de Tiogo et de donner aux gestionnaires des éléments indispensables à la mise en place d'une politique de gestion durable des forêts. Il s'agit plus spécifiquement de caractériser et cartographier les différents types de végétation de ladite forêt et d'évaluer la dynamique forestière entre 1986 et 2014. Pour atteindre ces objectifs fixés, nous avons émis les hypothèses suivantes: l'imagerie satellitaire offre un outil de description fine de l'occupation des sols; les changements observés entre 1986 et 2014 sur la couverture végétale dans la Forêt Classée de Tiogo sont imputables aux activités anthropiques dans un contexte de changement climatique.

Matériel et méthodes

Description de la zone d'étude

Classée en 1940 par l'administration coloniale, la Forêt Classée de Tiogo couvre une superficie de 30.669 ha. Elle est située dans la province du Sanguié (région du Centre-Ouest) sur l'axe Koudougou-Dédougou, à 40 km de la ville de Koudougou. La zone d'étude est précisément localisée entre les longitudes 2°42' et 2°52' Ouest et les latitudes 12°13' et 12°24' Nord (Figure 1). Le relief de la forêt classée est plat et monotone dans l'ensemble, avec un certain nombre de buttes cuirassées (24). L'altitude moyenne est 300 m. Au niveau pédologique, la forêt classée est caractérisée par des sols peu profonds, des sols hydromorphes et des sols à sesquioxyde de fer, avec des profondeurs variables (17). Cette aire protégée est limitée dans sa partie ouest, par le Mouhoun qui est le seul fleuve à régime permanent du pays. La zone d'étude est soumise à un climat de type soudanien, caractérisé par deux saisons. La première qui est pluvieuse s'étale de mai à octobre et la seconde sèche s'étend de novembre à avril (7). La température moyenne annuelle est de 24 °C, avec une amplitude thermique de 15 °C (22). La végétation de la forêt est répartie entre les types de formations suivants: la savane arborée, la savane arbustive, la forêt ripicole ou la forêt galerie et la savane herbeuse (24).

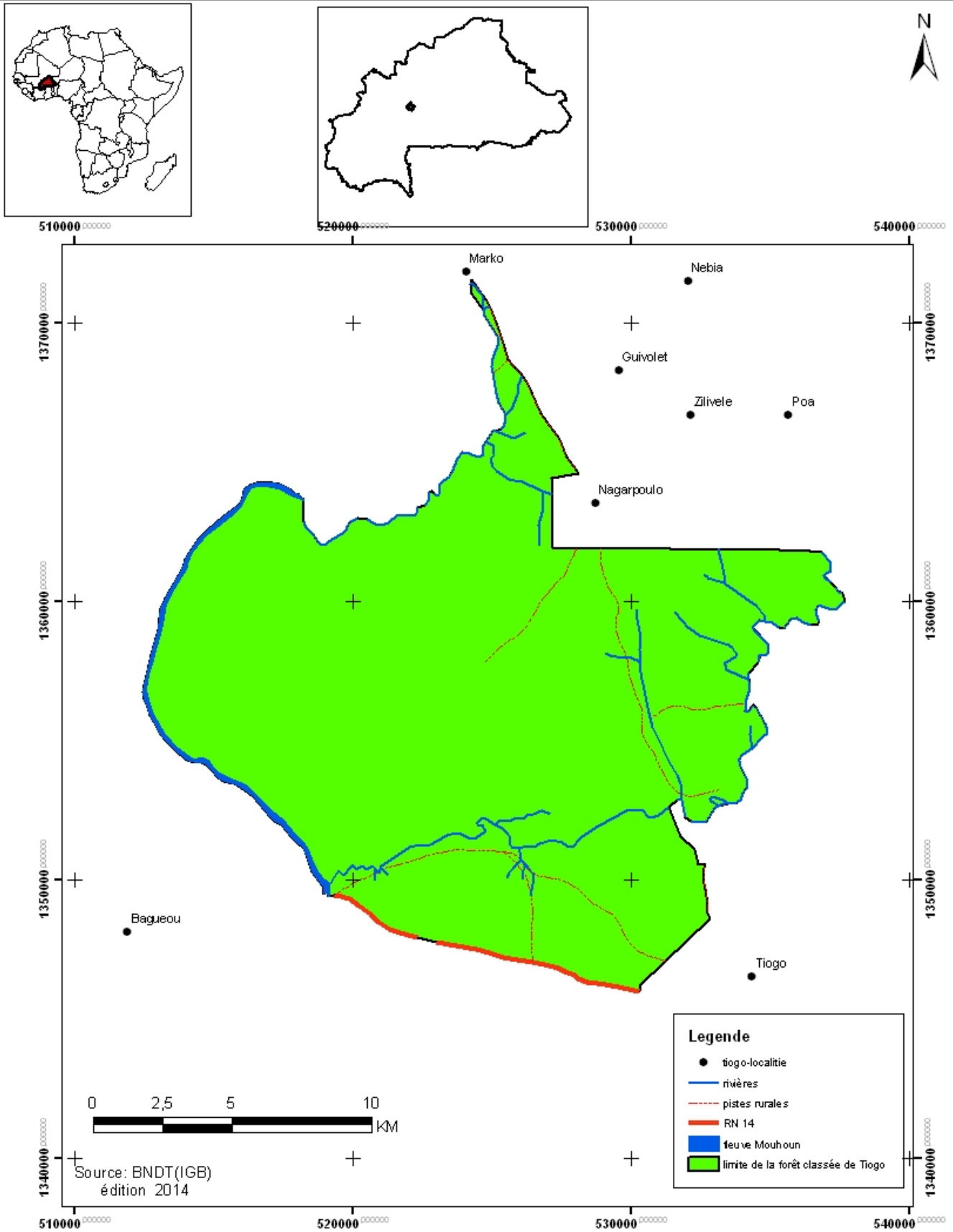


Figure 1: Localisation de la Forêt Classée de Tiogo au Centre-Ouest du Burkina Faso.

Le potentiel hydrographique de la forêt classée repose essentiellement sur le fleuve Mouhoun; auquel s'ajoutent des rivières et marigots à régimes temporaires. Selon le recensement général de 2006, la population de la commune de Ténado (abritant le village de Tiogo) est estimée à 45.506 habitants (11). La population de Tiogo est constituée principalement de l'ethnie Lyela et d'une importante communauté de Mossé et de Peul pasteurs installée dans la zone depuis la sécheresse de 1970. Le centre de soins de la lèpre, installé dans les années 1950 à Tiogo, a attiré des malades et leurs accompagnants venus de certains pays de la sous-région comme le Mali, le Niger et le Togo. Certains y sont restés après guérison (23) et une enclave leur est concédée dans la partie sud de la Forêt Classée de Tiogo (24). L'agriculture traditionnelle est la principale activité des populations de Tiogo à l'instar des autres communautés rurales du pays. L'adoption de la culture du coton dans la zone d'étude a été un facteur ayant stimulé la conquête de nouvelles terres (24). Aussi, les populations se sont tournées vers la Forêt Classée de Tiogo qui est perçue comme une «banque de terres» pour y installer des champs clandestins. L'élevage pratiqué dans la zone est de type extensif. A cause de l'occupation des pistes de transhumance et des pâturages par les champs agricoles, il est noté une tendance à la sédentarisation des Peul pasteurs aux alentours de la forêt classée. L'exploitation forestière et la pêche sont aussi des activités non négligeables qui constituent des facteurs de pression sur la forêt classée (24).

Images satellitaires et logiciels utilisés

Les images satellitaires utilisées ont été acquises à la même période de l'année afin de réduire les problèmes liés aux différences d'angles solaires, aux changements phénologiques de la végétation et à la différence d'humidité des sols. Ainsi, les deux images sont une scène Landsat 5 TM (Path 196, Row 51) du 8 octobre 1986 et une scène Landsat 8 (Path 196, Row 51) du 21 octobre 2014. Toutes les images sont issues de la base de données de United State Geological Survey (USGS, www Landsat.usgs.gov/).

Les logiciels Envi 4.2 et ArcGis 9.3 ont été utilisés respectivement pour le traitement numérique des images et la cartographie. Des données de terrain (présence de champs, pâturages, feux de brousse, coupe du bois, activités minières) ont été également collectées en complément des images spatiales.

Traitement des images satellitaires et analyse des données

Pour le traitement numérique des images satellitaires et la cartographie, une chaîne de traitements a été appliquée. La première opération a consisté à extraire de l'image Landsat, une fenêtre d'étude centrée sur la forêt classée. Pour cette opération, le fichier «shapefile» du contour de la forêt classée a été utilisé. Cette extraction de fenêtre d'étude a été suivie de l'amélioration d'image.

Ce traitement visait à faciliter la discrimination des types d'occupation du sol avant la collecte des données de terrain.

Des compositions colorées ont été réalisées sur les bandes brutes 5-4-3 (Landsat 8) et 4-3-2 (Landsat 5 TM). Ces dernières ont permis de discriminer les différents types d'occupation du sol. Pour affiner les traitements, une analyse en composantes principales a été effectuée sur les images brutes. Cette opération a permis d'améliorer la qualité visuelle de chaque bande brute, de décorréler les néo-canaux et de maximiser l'information sur les trois premiers néo-canaux (composantes principales).

La finalité de ces opérations est d'exploiter les néocanaux dans des compositions colorées. Cette dernière composition a permis de discriminer les types d'occupation du sol suivants: la forêt galerie, la savane arborée dense, la savane arborée claire, la savane arbustive dense, la savane arbustive claire et les champs.

Pour la confirmation de ces premiers résultats (types d'occupation du sol), quatre indices de végétation (indices biophysiques) ont été calculés (10). Il s'agit de l'indice de brillance des sols (Brightness Index), l'indice d'humidité (Wetness Index), l'indice de verdure (Greenness Index) et

l'indice de végétation normalisé (Normalized Difference Vegetation Index) qui ont permis de mettre en évidence :

- le niveau de recouvrement ou densité de la couverture végétale (*BI*) est défini par la formule I:

$$BI = 0,3037 \times Band2 + 0,2793 \times Band3 + 0,4743 \times Band4 + 0,5585 \times Band5 + 0,5082 \times Band6 + 0,1863 \times Band7 \quad I$$

- le niveau d'humidité de la végétation ou du sol sous-jacent (*WI*) est défini par la Formule II:

$$WI = 0,1509 \times Band2 + 0,3279 \times Band3 + 0,3279 \times Band4 + 0,3406 \times Band5 - 0,7112 \times Band6 - 0,4572 \times Band7 \quad II$$

- le niveau de stress hydrique de la végétation (*GI*) est défini par la Formule III:

$$GI = -0,2848 \times Band2 - 0,2435 \times Band3 - 0,5436 \times Band4 + 0,7243 \times Band5 + 0,084 \times Band6 - 0,18 \times Band7 \quad III$$

- et l'intensité de l'activité photosynthétique (*NDVI*) est défini par la Formule IV:

$$GI = (Band5 - Band4) / (Band5 + Band4) \quad IV$$

L'interprétation visuelle des compositions colorées validées avec les différents indices de végétation ont permis de sélectionner dans les différents types d'occupation du sol, plusieurs sites à visiter sur le terrain. Les documents cartographiques (réseau routier) existants ont facilité le choix de ces sites. Finalement, les types d'occupation du sol retenus sont : les forêts ripicoles, les savanes arborées (dense et claire), les savanes arbustives (dense et claire) et les champs ainsi que les sols nus. Les coordonnées des différents sites «vérité terrain» ont été enregistrées dans le GPS. Il s'agit de 150 parcelles dont 18 pour les forêts ripicoles, 30 pour les savanes arborées denses, 42 pour les savanes arborées claires, 18 pour les savanes arbustives denses, 18 pour les savanes arbustives claires et 24 pour les champs et sols nus. Cette répartition tient compte de la superficie de chaque classe d'occupation dans la forêt classée.

Cette phase «vérité terrain» a été effectuée lors d'une mission d'observation (octobre-novembre) dans la forêt et sa périphérie. La période de la mission coïncide avec celle d'acquisition de nos images satellitaires. Cette mission terrain nous a permis de faire une description des différents types de végétation et de noter le niveau de dégradation de la forêt. Les parcelles de «vérité terrain» sont caractérisées par leur homogénéité et leur taille suffisamment grande. Pour effectuer les mesures dendrométriques, 47 placettes ont été posées au hasard dans les formations naturelles. Ces placettes de 30x30 m (pour les savanes) et de 50x10 m (pour les forêts galeries ou ripicoles), sont au nombre de 8 pour les forêts ripicoles, 14 pour les savanes arborées claires, 11 pour les savanes arborées denses, 8 pour les savanes arbustives denses et 6 pour les savanes arbustives claires. Ainsi, à l'intérieur des placettes, les diamètres à hauteur de poitrine (1,30 m) des arbres et arbustes dont le diamètre est supérieur ou égal à 10 cm ont été relevés. Aucune placette n'a été posée dans les champs.

Le traitement des données d'inventaire forestier a permis de faire une analyse de la structure horizontale des différents types de végétation. Cela a été possible par le calcul de:

-la densité de ligneux «*D*» selon la formule V:

$$D = \frac{N}{S} \quad V$$

N est le nombre de tiges du milieu considéré et *S* la surface totale des placettes en ha);

- l'aire basale (*G*) selon l'expression de la formule VI:

$$g = d_i^2 \times \pi / 4 \quad VI$$

(*d_i* est le diamètre de la tige et $\pi = 3,14$; *d_i* en m) ;

-la répartition des tiges par classes de diamètres «*T*» (pour l'ensemble de la forêt) selon la formule VII:

$$T = \frac{N}{I} \quad VII$$

(*N* est le nombre de tiges et *I* l'intervalle en cm).

En se basant sur les informations collectées sur le terrain, les traitements des images ont été finalisés. En effet, la classification dirigée des images par la méthode de classification par maximum de vraisemblance a permis de produire les deux cartes d'occupation du sol de la Forêt classée de Tiogo. Cet algorithme utilise des « zones échantillons » pour déterminer les caractéristiques des classes d'objets, qui deviennent également des centres dans l'espace multi-spectral (3).

Au total, 75 parcelles d'entraînement ont servi de base à cette classification dirigée et 75 autres parcelles ont servi de contrôle.

L'évaluation de la classification dirigée de l'image de 2014 a été faite à partir des observations de terrain (données structurales de la végétation) et l'analyse statistique. La matrice de confusion de cette classification a été faite sur la base des parcelles de contrôle issues des parcelles de «vérité terrain», autres que celles ayant servi pour l'entraînement. Ce qui a permis de mettre en évidence la performance du traitement et la fiabilité des résultats obtenus.

Cette même technique a été reprise pour l'évaluation de la classification dirigée de 1986. Mais pour cette dernière, la carte d'occupation du sol de 2014, celle de la BDOT de 2002 et les données de terrain de 2013 ont été la vérité de terrain. En effet, les types de végétation identifiés dans la forêt classée de Tiogo en 1986 sont les mêmes que ceux identifiés en 2013. Mais l'occupation spatiale de ces types de végétation a été modifiée entre les différentes dates (1986 et 2013). Ainsi, les parcelles d'entraînement et de contrôle sélectionnées sur les différentes compositions colorées de 1986 ont été faites dans les zones n'ayant pas subi de changements.

Finalement, un filtre médian a été appliqué à toutes les images classifiées en vue de les rendre plus nettes par élimination de pixels isolés. Ensuite, la vectorisation des images classifiées a été réalisée. Après cette étape, le fichier a été exporté en format «shapefile» pour être utilisé dans le logiciel ArcGis 9.3. Ce fichier, une fois édité a permis de générer les cartes d'occupation du sol de la Forêt classée de Tiogo en 1986 et en 2014.

Dynamique de la végétation ligneuse

Une évaluation des superficies des différents types de végétation et d'occupation du sol a été faite à l'aide du logiciel ArcGis 9.3. Cette évaluation a servi à analyser l'évolution des différents éléments de l'occupation du sol dans la Forêt classée de Tiogo entre 1986 et 2014. Le taux d'évolution moyen annuel de chaque élément de l'occupation du sol a été calculé suivant la formule VIII:

$$T_x = [((S_{2014} - S_{1986}) / S_{1986}) \times 100] / 28 \quad \text{VIII}$$

T_x : Taux d'évolution moyen annuel; S_{1986} : superficie de la classe i en 1986; S_{2014} : superficie de la classe i en 2014; 28: nombre d'années entre 1986 et 2014.

Résultats

Caractérisation des types de végétation

La Forêt classée de Tiogo comporte cinq types de formations végétales

La forêt ripicole et la forêt galerie (forêt) sont rencontrées le long du fleuve Mouhoun et ses affluents. Elles restent vertes toute l'année. Les principales espèces de ces formations sont: *Mitragyna inermis* (Willd.) Kuntze, *Vitex chrysocarpa* Planch. ex Benth., *Aphania senegalensis* (Juss. ex Poir.) Radlk., *Cola laurifolia* Mast., *Pterocarpus santalinoides* L'Her. ex DC., *Garcinia livingstonei* T. Anders. et *Eugenia nigerina* A. Chev. ex Hutch. et Dalz.

La savane arborée dense (savane 1) est caractérisée par une dominance de la strate arborée avec peu d'arbustes. Il existe un tapis herbacé peu dense. Le recouvrement ligneux est compris entre 50 et 70%. Comme principales espèces, il y a: *Anogeissus leiocarpa* (DC.) Guill. et Perr., *Burkea africana* Hook. f., *Isobertinia doka* Craib et Stapf, *Pterocarpus erinaceus* Poir., *Combretum collinum* Fresen., *Terminalia macroptera* Guill. et Perr. et *Vitellaria paradoxa* Gaertn. f.

La savane arborée claire (savane 2), à la différence de la savane arborée dense, présente une strate arborée clairsemée. Le couvert herbacé est bien développé. Le taux de recouvrement varie de 30 à 45%.

Les espèces fréquentes sont *Terminalia laxiflora* Engl., *Pterocarpus erinaceus*, *Vitellaria paradoxa*, *Combretum collinum*, *Prosopis africana* (Guill. et Perr.) Taub., *Lannea acida* A.h. Ric, *Lannea microcarpa* Engl. et K. Krause.

La savane arbustive dense (savane 3) est une formation végétale qui est dominée par les arbustes, avec une densité élevée. Elle est caractérisée par une strate ligneuse dense avec un tapis herbacé composé essentiellement de graminées vivaces denses. Les arbres y sont rares. Le recouvrement ligneux varie de 30 à 60% dont moins de 10% pour les arbres. Les principales espèces qu'on y rencontre sont *Detarium microcarpum* Guill. et Perr., *Anogeissus leiocarpa*, *Terminalia laxiflora*, *Piliostigma thonningii* (Schumach.) Milne-Redh. *Piliostigma reticulatum* (D.) Hochst., *Ximenia americana* L. et *Ptelopsis suberosa* Engl. et Diels. La savane arbustive claire (savane 4) présente une strate arbustive peu dense avec un tapis herbacé composé de vivaces. Le recouvrement ligneux varie de 15 à 30%. Les espèces fréquentes sont *Acacia macrostachya* Reichenb. ex Benth., *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Acacia dudgeoni* Craib ex Hall., *Ziziphus mauritiana* Lam., *Combretum glutinosum* Perr. ex DC., *Combretum micrantum* G. Don, *Gardenia ternifolia* Schumach. et Thonn., *Grewia lasiodiscus* K. Schum. et *Feretia apodanthera* Del. Sur la base de la description physiologique des types de formation végétale, nous avons fait des relevés de végétation consignés dans le tableau 1. La forêt galerie (forêt) est la plus haute et elle présente une strate arborée avec un fort taux de recouvrement par rapport aux savanes. La structure verticale de ces dernières montre que la savane 1 (savane arborée dense) diffère de la savane 2 (savane arborée claire), de la savane 3 (savane arbustive dense) et de la savane 4 (savane arbustive claire) par la strate ligneuse plus haute avec un taux de recouvrement au sol élevé. La différence observée au niveau de la structure verticale entre la forêt galerie (forêt) et les formations de savanes est confirmée au niveau de la densité des tiges et de l'aire basale (Figure 2). Ainsi, les deux paramètres de la structure horizontale de ces formations indiquent que la forêt galerie (forêt) et les savanes restent statistiquement différentes, tant au niveau de la densité de tiges que de la surface terrière.

Une comparaison de la structure horizontale des formations savanicoles, indique qu'il y a une différence significative entre les quatre types de savanes. Ainsi, on note une densité de tiges plus élevée dans la savane 1 (savane arborée dense). La savane 4 (savane arbustive claire) a la plus faible densité. Tout comme au niveau de la densité des tiges/ha, l'aire basale de la savane 1 (savane arborée dense) est supérieure à celle des autres savanes. On note aussi que la densité de tiges de la savane 3 (savane arbustive dense) est supérieure à celle de la savane 2 (savane arborée claire). Cependant, la savane 2 (savane arborée claire) a une aire basale supérieure à celle de la savane 3 (savane arbustive dense). Ceci confirme une forte densité d'arbustes à faibles diamètres dans la savane 3 (savane arbustive dense). Par contre au sein de la savane 2 (savane arborée claire) on note une présence de gros diamètres. Ainsi, nous constatons que les aires basales ou surfaces terrières permettent une discrimination fine de ces formations savanicoles.

Répartition des individus par classes de diamètre

Pour mieux cerner la structure de la forêt, nous avons fait une distribution des individus par classe de diamètre (Figure 2C). La répartition des individus dans les différentes classes de diamètre révèle que l'essentiel des effectifs est entre 10-15 cm. Au-delà de 15 cm, le nombre d'individus diminue considérablement. Cette distribution des individus en classe de diamètre présente une allure en forme de «J renversé». Ceci caractérise les forêts à forte dominance d'individus jeunes et une faible présence d'individus de gros diamètres.

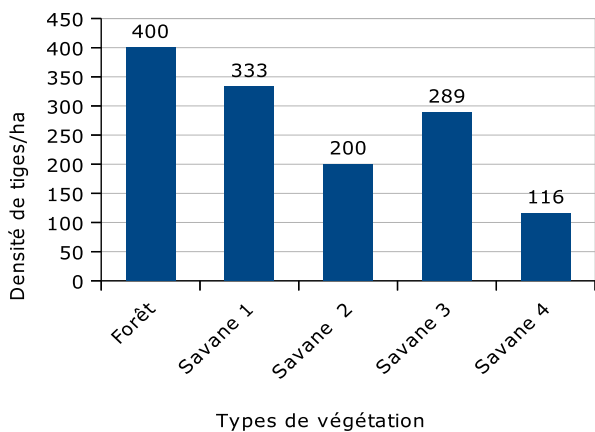
Cartographie de la végétation et vérification de la classification

Le tableau 2 donne les matrices de confusions des traitements qui indiquent que les précisions globales de classification sont de 91,14% et 92,43%, respectivement pour les images de 1986 et 2014. Les valeurs en diagonale indiquent le pourcentage de pixels bien classés et hors diagonale le pourcentage de pixels mal classés pour chaque unité d'occupation du sol.

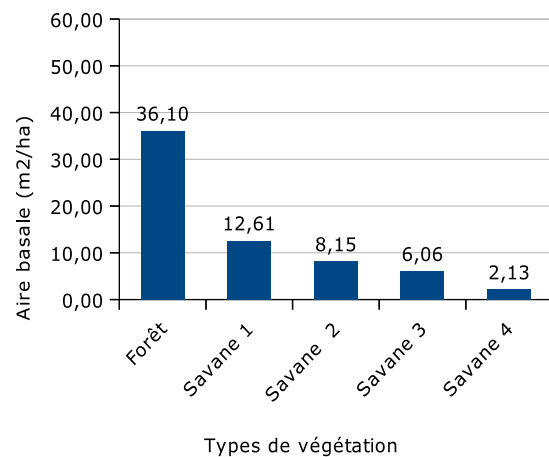
Tableau 1

Distribution des parcelles et placettes sélectionnées pour l'analyse de la végétation de la Forêt Classée de Tiogo.

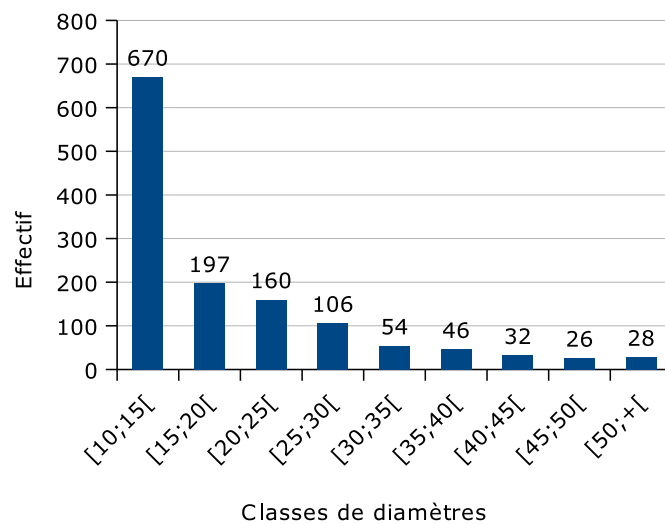
Types d'occupation du sol	Sites visités	Placettes par type de végétation	Analyse de la structure ligneuse	Parcelles d'entraînement sélectionnées	Parcelles de contrôle sélectionnées
Forêt galerie ou ripicole	18	8	5	9	9
Savane arborée dense	30	11	5	15	15
Savane arborée claire	42	14	5	21	21
Savane arbustive dense	18	8	5	9	9
Savane arbustive claire	18	6	5	9	9
Champs/sols nus	24	0	0	12	12
Total	150	47	25	75	75



A



B



C

Figure 2: Densités de tiges (A) et aires basales (B) de chaque type de végétation à l'hectare et la distribution des individus par classes de diamètres (C) de la Forêt Classée de Tiogo.

Forêt: Forêt galerie ou ripicole; Savane 1: Savane arborée dense; Savane 2: Savane arborée claire; Savane 3: Savane arbustive dense; Savane 4: Savane arbustive claire

Tableau 2

Matrices de confusion de la classification de l'image de 2014 et de celle de 1986.

2014						
Classes d'occupation du sol	FG	SAD	SAC	Sad	Sac	Csn
Forêt galerie (FG)	95,96	12,86	0	2,7	0	0
Savane arborée dense (SAD)	3,38	86,02	0	0	0	0
Savane arborée claire (SAC)	0	0	91,67	0	1,74	1,08
Savane arbustive dense (Sad)	0,66	1,12	0	97,3	0	0
Savane arbustive claire (Sac)	0	0	0	0	90,12	5,44
Champs/sols nus (Csn)	0	0	8,33	0	8,14	93,48
Total	100	100	100	100	100	100
Précision globale= 92,43%						
1986						
Classes d'occupation du sol	FG	SAD	SAC	Sad	Sac	Csn
Forêt galerie (FG)	89,54	5,68	0	9,11	0	0
Savane arborée dense (SAD)	5,83	93,4	0	0	0	0
Savane arborée claire (SAC)	0	0	81,48	0	4,83	0,61
Savane arbustive dense (Sad)	4,63	0,92	0	90,89	0	0
Savane arbustive claire (Sac)	0	0	0	0	94,07	1,91
Champs/sols nus (Csn)	0	0	18,52	0	1,1	97,48
Total	100	100	100	100	100	100

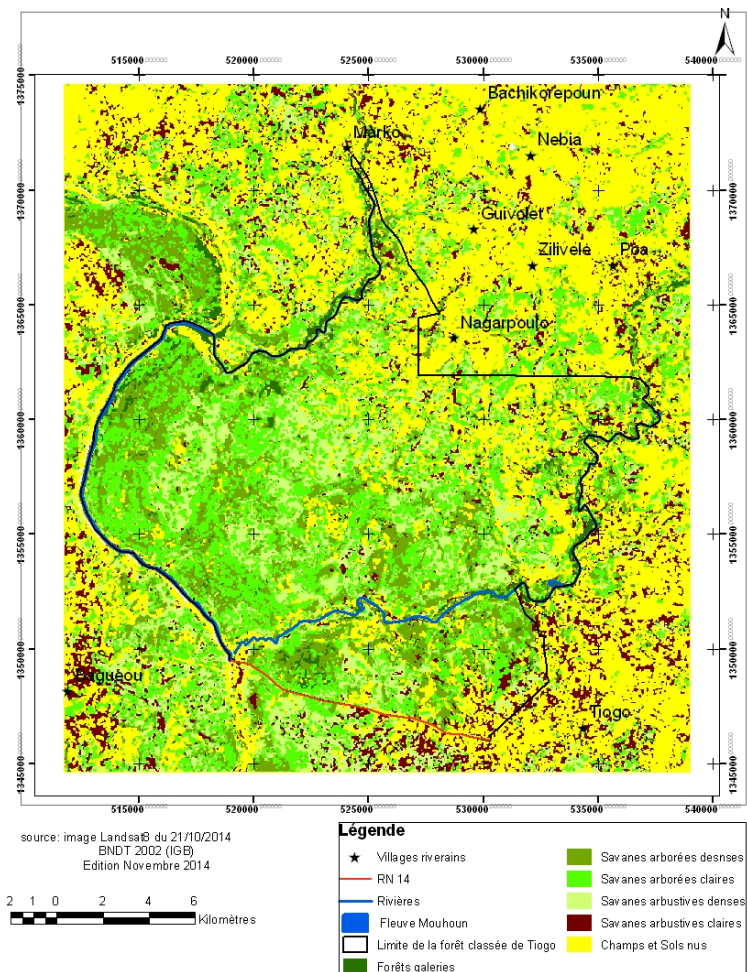
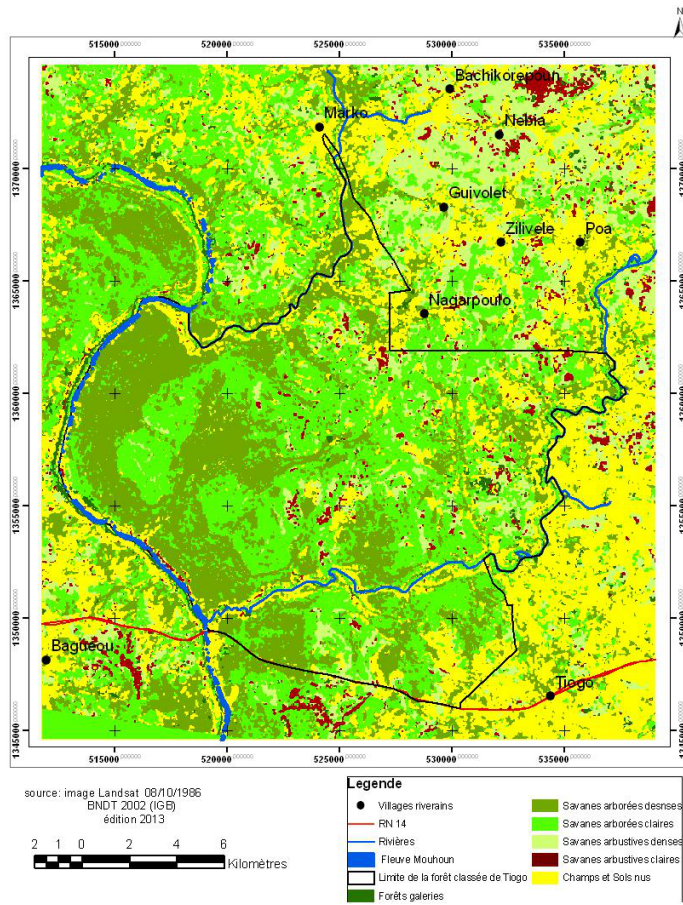


Figure 3: Cartes d'occupation du sol de la Forêt Classée de Tiogo en 1986 (A) et en 2014 (B).

Tableau 3

Evolution des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2014.

Classes d'occupation du sol	Superficie (ha) et pourcentage				Evolution de 1986-2014	
	1986	%	2014	%	Taille (ha)	Taux (%)
Forêt galerie	481,68	1,57	587,69	1,91	106,01	0,79
Savane arborée dense	11372,7	37,08	5870,75	19,14	-5501,92	-1,73
Savane arborée claire	12278,1	40,04	10525,84	34,32	-1752,23	-0,51
Savane arbustive dense	2745,63	8,95	5464,33	17,82	2718,7	3,54
Savane arbustive claire	607,95	1,98	1238,33	4,04	630,38	3,7
Champs/sols nus	3183,21	10,38	6982,27	22,77	3799,06	4,26
Total	30669,2	100	30669,21	100		

FG: Forêt galerie ou ripicole; SAD: Savane arborée dense; SAC: Savane arborée claire; Sad: Savane arbustive dense;

Sac: Savane arbustive claire, Csn: Champs/sols nus

Une analyse approfondie de ces tableaux montre que la classe savane 1 (savane arborée dense) présente des confusions avec la classe forêt (forêt galerie). Ainsi; 5,84 à 12,86% des pixels de savane 1 (savane arborée dense) se retrouvent classés dans la classe forêt galerie, ce qui entraîne des pourcentages relativement faibles de pixels bien classés (93,4 à 86,02%). Nous notons des confusions non négligeables entre la savane 2 (savane arborée claire) et les champs/ sols nus où elles sont de l'ordre de 18,52% et 8,33% respectivement pour les images de 1986 et 2014. De manière globale, les autres classes d'occupation sont bien classifiées avec des confusions relativement faibles.

La cartographie de l'occupation du sol en 1986 montre que la forêt galerie ne représentait que 1,57% (41,68 ha) de la forêt classée; comparativement aux savanes qui représentent, à elles seules; 88,05% (27.004,32 ha). Ceci dénote de la forte dominance de cette aire protégée par les savanes. Avec 3.183,21 ha; les champs et les sols nus représentaient 10,38% de la superficie totale cartographiée (Figure 3b).

Avec 23.686,94 ha en 2014, le couvert végétal représente 77,23% de la superficie totale cartographiée. Il est essentiellement constitué de savane arborée claire (10.525,84 ha), savane arborée dense (5.870,75 ha), savane arbustive dense (5.464,33 ha), savane arbustive claire (1 238,33 ha) et de la forêt galerie (587,69 ha). Les forêts constituées uniquement de galeries forestières ou forêts ripicoles représentent 1,91% de la superficie de la forêt classée contre 75,32%

pour les savanes. Les champs et les sols nus, avec une superficie de 6.982,27 ha occupent 22,77% de l'ensemble de la Forêt classée (Figure 3b). Les cartes de 1986 et 2014 ont permis de quantifier la dynamique de l'occupation du sol de la Forêt classée de Tiogo (Tableau 3).

Les résultats cartographiques et statistiques obtenus permettent de mettre en exergue l'évolution progressive de quelques éléments de l'occupation du sol entre 1986 et 2014. La savane arbustive claire est le type de végétation qui a connu la plus forte augmentation de sa surface. Elle est passée de 607,95 ha en 1986 à 1.238,33 ha en 2014; soit une augmentation de 22,51 ha/an. La savane arbustive dense a connu une évolution positive de l'ordre de 3,54% par an, en passant de 2.745,63 ha en 1986 à 5.464,33 ha en 2014. Nous constatons que les champs et les sols nus ont également augmenté en superficie, passant ainsi de 3.183,21 ha en 1986 à 6.982,27 ha en 2014, soit une augmentation de 3.799,06 ha en 28 ans. Enfin, la forêt galerie ou ripicole a connu une augmentation de 106,01 ha entre 1986 et 2014, passant ainsi de 481,68 ha à 587,69 ha.

Contrairement aux autres classes d'occupation du sol; la savane arborée dense et la savane arborée claire sont en recul entre 1986 et 2014. La savane arborée dense a connu une baisse de 5.501,92 ha en 28 ans, soit un taux de régression annuel de 1,73%. La savane arborée claire quant à elle a perdu 1.752,23 ha entre 1986 et 2014, soit un recul de 0,51% par an.

Discussion

Description de la végétation ligneuse

La distribution des individus par classe de diamètre montre que les individus de petit diamètre dominant, tandis que les gros diamètres sont en minorité. Cette réduction d'individus de gros diamètres peut être liée aux activités humaines, surtout l'exploitation forestière et l'agriculture. Ce même constat a été fait par Kossi *et al.* (14) sur des formations de savanes des forêts classées de Ouli et Wélor au Sénégal. Selon la même source, dans certaines conditions, c'est la composition floristique qui impose cette structure. En plus, la forte densité de tiges enregistrée dans les forêts galeries ou ripicoles (400 tiges/ha), serait liée aux conditions naturelles favorables (sol et humidité). Les sols humides qui bordent les différents cours d'eau, assurent une bonne nutrition hydrique à la végétation existante qui échappe ainsi aux dessèchements pendant la saison sèche (15). Comparativement aux forêts galeries, les savanes ont des densités de tiges faibles. Cette faiblesse des densités de tiges dans les savanes pourrait avoir une origine anthropique.

En effet, chaque année les savanes sont parcourues par des feux de brousse qui ont un caractère plus ou moins dommageable sur ces dernières, en fonction de la période (15). L'exploitation du bois-énergie dans la Forêt classée a aussi contribué à réduire le nombre de tiges à l'hectare. En outre, le facteur climatique aurait également eu un impact négatif sur la végétation. Selon certains auteurs Kossi *et al.* (4) et Koné *et al.* (13) les sécheresses des années 1970 et 1980 ont entraîné la mortalité des ligneux au sein des écosystèmes sensibles en Afrique.

Traitement numérique

La méthode des classifications dirigées nous a permis de distinguer six classes d'occupation du sol, qui ne sont pas toujours bien différenciées. Cette confusion est due à des réponses spectrales proches pour ces formations ligneuses (6). Ces mêmes difficultés ont été signalées par d'autres auteurs (12, 15, 16, 27). En plus, la confusion pourrait être liée à la définition des parcelles homogènes lors du

choix des sites d'entraînement (12). Malgré ces difficultés, nous avons obtenu des résultats cartographiques satisfaisants. En effet, nous avons obtenu des précisions globales de 92,43% et de 91,14%; respectivement pour l'image de 2014 et pour celle de 1986. Ces cartes peuvent être validées, car les taux de classification global sont supérieurs à 50% (21). Quant aux confusions observées entre les champs et les classes de savane 2 et savane 4, nous pensons que cela est lié au fait que les arbres utiles épargnés dans les champs donnent à cette classe par endroits l'aspect d'une savane arborée claire ou une savane arbustive claire. Enfin, l'analyse de la structure de la végétation (verticale et horizontale) a permis de faire une meilleure discrimination de ces formations végétales.

Dynamique forestière et pression anthropique

Les résultats obtenus montrent que dans la Forêt Classée de Tiogo, certaines formations boisées (la savane arborée dense et la savane arborée claire) ont connu une régression entre 1986 et 2014. Cette régression pourrait être liée aux activités humaines (bois-énergie, agriculture, feux de brousse, surpâturage). La proximité de la forêt classée avec Ouagadougou et la ville de Koudougou en fait une réserve de bois-énergie. La coupe abusive et anarchique du bois a déjà été relevée comme un facteur important dans la dynamique régressive des ligneux par plusieurs auteurs (9, 20, 25, 27). En plus, le passage régulier des feux ne favorise pas la reconstitution de la végétation naturelle (6). Outre les activités humaines, il y a le facteur climatique qui pourrait expliquer cette dynamique régressive de ces formations arborées. En effet, la contrainte climatique principale est la variabilité dans la distribution et l'imprévisibilité des précipitations, qui s'augmentent du Sud au Nord (19).

Plusieurs études ont montré les impacts négatifs de la sécheresse sur la végétation (5, 6, 10). En Afrique, certaines études ont montré que les sécheresses répétées des années 1980 ont entraîné la mortalité des espèces ligneuses des écosystèmes sensibles (4, 13).

Par ailleurs, nous constatons une extension des superficies des champs et des savanes arbustives. Cette progression des champs est évaluée à 4,26% par an. Ceci pourrait s'expliquer par la forte pression foncière à l'intérieur et à la périphérie de ladite forêt. Cette pression foncière a été mise en évidence par la cartographie qui montre une progression du front agricole entre 1986 et 2014. En Afrique subsaharienne, le manque de nouvelles terres agricoles et fertiles incitent les populations à s'installer dans les réserves forestières (1).

Conclusion

Cette étude avait pour principal objectif d'améliorer les connaissances sur les ressources forestières à partir des données spatiales. La démarche méthodologique adoptée a consisté aux traitements numériques d'images Landsat couplés aux données d'inventaire forestier. Cette approche méthodologique, nous a permis de discriminer les différentes classes d'occupation du sol de la Forêt classée. Ainsi, nous avons pu identifier: les forêts galeries ou ripicoles, les savanes arborées (denses et claires), les savanes arbustives (denses et claires) et les champs et sols nus. La forêt classée est dominée par des individus de petits diamètres (10-15 cm) représentant à eux seuls 50,79%. L'exploitation forestière (bois-énergie) et les défrichements agricoles ont réduit considérablement la présence des gros diamètres au sein de la forêt classée. L'analyse des structures horizontale et verticale ont permis de faire une discrimination fine des différents types de végétation.

La couverture ligneuse a perdu 3.799,06 ha entre 1986 et 2014, soit une régression de 0,49% par an au profit des champs (6.982,27 ha en 2014) essentiellement.

Cette forte déforestation est imputable à la pression anthropique qui s'est matérialisée par les défrichements agricoles, la coupe abusive du bois et le surpâturage.

La faible protection ou surveillance de la forêt classée, avec un accroissement des superficies de champs dans cette aire (3.799 ha) constituent une menace quasi-permanente pour cette forêt.

Cette étude ouvre les perspectives suivantes:

- le suivi à moyen et long termes de l'évolution de chaque type de végétation via la mise en place d'un dispositif de parcelles permanentes couplé aux images satellitaires à haute résolution;
- l'analyse approfondie de la diversité floristique de la Forêt Classée de Tiogo;
- l'analyse de la dynamique de la structure spatio-temporelle des îlots de savanes arborées denses;
- l'étude de la dynamique de séquestration du carbone des différents types de végétation de la Forêt Classée de Tiogo sous diverses pressions anthropiques.

Pour contribuer à l'aménagement et à la gestion durable de la forêt classée, une sensibilisation et une implication effective des populations de tous les villages riverains s'imposent. Ceci permettrait de freiner la colonisation de la forêt et de faciliter les opérations de déguerpissement afin de redonner à l'espace son statut de forêt classée. En plus, il faut un renforcement de la surveillance à l'intérieur comme aux périphéries de l'espace protégé en collaboration avec les populations riveraines pour lesquelles une formation aux techniques de maintien de la fertilité des sols s'avère opportune. Cette formation au profit des populations riveraines, pourrait limiter cette quête permanente de nouvelles terres.

Remerciements

Nos remerciements à l'Etat et surtout le contribuable Burkinabé pour nous avoir octroyé la bourse nécessaire à notre formation et les responsables du Laboratoire des Systèmes Naturels Agrosystèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E) pour leur soutien financier pour les travaux de terrain. Nos remerciements vont également au Service forestier chargé de la gestion de la Forêt Classée de Tiogo pour nous avoir facilités l'accès au site d'étude.

Références bibliographiques

1. Ba M., Toure A. & Reenberg A., 2004, Mapping land use dynamics in Senegal. Case studies from Kaffrine Departments, *Sahel-Sudan Environ. Res. Initiative (SEREIN) Working Paper*, **45**, 1-33.
2. Bombiri P., 2008, *Comptabilité environnementale et biodiversité. Etude de cas/ Burkina Faso*. Communication orale. MECV/ SP-CONEDD, Burkina Faso, 20.
3. Bonn F. & Rochon G., 1992, *Précis de télédétection. Principes et méthodes*. Sainte-Foy (Quebec) : Presses de l'Université du Quebec. 513.
4. Boudet G., 1972, Désertification de l'Afrique tropicale, *Adansonia*, **12**, 505-524.
5. Darkoh M.B.K., 2003, Regional perspectives on agriculture and biodiversity in drylands of Africa. *J. Arid Environ.*, **54**, 261-279.
6. Diallo H., Bamba I., Barima Y.S.S., Visser M., Ballo A., Mama A., Vranken I., Maïga M. & Bogaert J., 2011, 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), *Sécheresse*, **22**, 97-107.
7. Diawara S., 2012, *Perturbations écologiques et fonctionnement des écosystèmes savanicoles: banques de semences du sol et propriétés physico-chimiques du sol*. Mémoire d'Ingénieur. Institut du Développement Rural, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso. Burkina Faso. 108.
8. FAO, 2010, *Évaluation des ressources forestières mondiales. Département des forêts. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*. Viale delle Terme di Caracalla 00153 Rome, Italie.
9. Faye E., Diatta M., Samba A.N.S. & Lejoly J., 2008, Usages et dynamique de la flore ligneuse dans le terroir villageois de Latmingué (Sénégal), *J. Sci. Technol.*, **7**, 43-58.
10. Goel N.S. & Quin W., 1994, Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indexes and LAI and FPAR: a computer simulation, *Remote Sensing Environ.*, **10**, 309-347.
11. Hulme M., Doherty R., Ngara T., New M. & Lister D., 2001, *African climate change. 1900-2100*. *Clim. Res.*, **17**, 145-168.
12. INSD, 2007, *Résultats préliminaires du recensement général de la population et de l'habitat de 2006*. Institut National des Statistiques et de la Démographie (INSD). Direction de la démographie, Ouagadougou. Burkina Faso. 394.
13. Koné M., Aman A., Yao A.C.Y., Coulibaly L. & N'Guessan K.E., 2007, Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane Soudanienne en Côte d'Ivoire, *Télédétection*, **7**, 433-446.
14. Kossi M., Bellefontaine R. & Kokou K., 2009, Les forêts claires du Parc national Oti-kéran au Nord-Togo : Structure, dynamique et impacts des modifications climatiques récentes, *Sécheresse*, **20**, 394-396.
15. Mbow C., 2009, *Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudanaises et soudano-guinéennes du Sénégal*. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Sénégal. 319.
16. N'Da D.H., N'Guessan E.K., Wadja M.E. & Affian K., 2008, Apport de la télédétection au suivi de la déforestation dans le parc national de la Marahoué (Côte d'Ivoire), *Télédétection*, **8**, 17-34.
17. N'Guessan E., Dibi N'da H., Bellan M. & Blasco F., 2006, Pression anthropique sur une réserve forestière en Côte d'Ivoire, *Télédétection*, **5**, 307-323.
18. Nouvellet Y. & Sawadogo L., 1995, *Recherches sur l'aménagement des formations naturelles dans la région du centre ouest du Burkina Faso*. SUAS/CNRST-IRBET/CIRAD-Forêt. Burkina Faso. 88.
19. Ouoba P., 2006, *Flore et végétation de la forêt classée de Niangoloko, sud-ouest du Burkina Faso*. Thèse de Doctorat. Université de Ouagadougou. Burkina Faso. 140.
20. Ozer P., Hountondji Y.C., Niang A.J., Karimoune S., Manzo O.L. & Salmon M., 2010, *Désertification au Sahel: historique et perspectives*. BSGLG, **54**, 69-84.
21. Ozer P., 2004, Bois de feu et déboisement au Sahel: Mise au point, *Sécheresse*, **15**, 243-251.
22. Pointius R.G.Jr., 2000, Quantification error versus location in comparison of categorical maps, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **66**, 1011-1016.
23. Savadogo P., 2002, *Pâturage de la forêt classée de Tiogo: diversité floristique, productivité, valeur nutritive et utilisation pastorale*. Mémoire d'Ingénieur. Institut du Développement Rural, Université

- Polytechnique de Bobo-Dioulasso. Burkina Faso. 105 p.
24. Sawadogo L., 1996, *Évaluation des potentialités pastorales d'une forêt nord soudanienne du Burkina Faso (cas de la forêt classée de Tiogo)*. Thèse de doctorat. Université de Ouagadougou. Burkina Faso. 125.
25. Sawadogo L., 2009, *Influence de facteurs anthropiques sur la dynamique de la végétation des forêts naturelles de la zone soudanienne du Burkina Faso*. Thèse d'Etat. Université de Ouagadougou. Burkina Faso. 142.
26. Tabopda W.G., 2008, *Les aires protégées de l'extrême -Nord Cameroun entre politiques de conservation et pratiques locales*. Thèse de doctorat en Géographie- Aménagement-Environnement, Université d'Orléans. France, 322.
27. Tabopda W.G. & Huynh F., 2009, *Caractérisation et suivi du recul des ligneux dans les aires protégées au Nord du Cameroun: analyse par télédétection spatiale dans la réserve forestière de Kalfou*. Journées d'animation scientifique (JAS09) de l'Agence Universitaire de la Francophonie, Alger. Algerie. 11.
28. Tankoano B., 2012, *Analyse de la couverture ligneuse de la forêt classée de Koulbi à l'aide de la télédétection et des SIG*. Mémoire d'ingénieur du Développement Rural, option (Eaux et forêts), Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso. Burkina Faso. 93.

B. Tankoano, Burkinabé, Etudiant Doctorant, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut du Développement Rural, Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement, Laboratoire des Systèmes Naturels, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

M. Hien, Burkinabé, PhD, Enseignant Chercheur, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut du Développement Rural, Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement, Laboratoire des Systèmes Naturels, Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E), Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

N.H. Dibi, Ivoirien, PhD, Enseignant Chercheur, Université Félix Houphouët Boigny, Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), UFR Biosciences, Abidjan, Côte d'Ivoire.

Z. Sanon, Burkinabé, Etudiant Doctorant, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut du Développement Rural, Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement, Laboratoire des Systèmes Naturels, Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E) Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

J.T. Yameogo, Burkinabé, PhD, Enseignant Chercheur, Burkinabé, Doctorant, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut du Développement Rural, Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement, Laboratoire des Systèmes Naturels, Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E), Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

I. Somda, Burkinabé, PhD, Enseignant Chercheur, Burkinabé, Doctorant, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut du Développement Rural, Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement, Laboratoire des Systèmes Naturels, Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E) Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.