

Dynamique d'occupation et d'utilisation des terres dans la Forêt Classée de Tiogo au Burkina Faso : caractérisation, moteurs et impacts sur la diversité et le stock de carbone ligneux

Ibrahim KONATÉ¹
Daniel ILBOUDO²
Sidzabda Djibril DAYAMBA³
Salifou TRAORÉ²
Louis SAWADOGO³
Mipro HIEN¹

¹ Université Nazi BONI
Institut du Développement Rural (IDR)
Laboratoire Bioressources, Agrosystèmes et Santé de l'Environnement (LaBASE)
01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01
Burkina Faso

² Université Joseph KI-ZERBO
Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre (UFR/SVT)
Laboratoire de Biologie et Écologie Végétales
03 BP 7021 Ouagadougou 03
Burkina Faso

³ Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST)
Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA)
03 BP 7047 Ouagadougou 03
Burkina Faso

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Ibrahim KONATÉ –
ikonate06@gmail.com

 **ORCID** : <https://orcid.org/0009-0005-1417-5658>



Photo 1.

Aperçu de la savane arborée dans la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.
Overview of the tree savannah in the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.
Photo I. Konaté

Doi : 10.19182/bft2024.360.a37226 – Droit d'auteur © 2024, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 23 septembre 2023 ; date d'acceptation : 31 mai 2024 ; date de publication : 1^{er} juin 2024.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Konaté I., Ilboudo D., Dayamba S. D., Traoré S., Sawadogo L., Hien M., 2024. Dynamique d'occupation et d'utilisation des terres dans la Forêt Classée de Tiogo au Burkina Faso : caractérisation, moteurs et impacts sur la diversité et le stock de carbone ligneux. Bois et Forêts des Tropiques, 360 : 41-64. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2024.360.a37226>

RÉSUMÉ

Dynamique d'occupation et d'utilisation des terres dans la Forêt Classée de Tiogo au Burkina Faso : caractérisation, moteurs et impacts sur la diversité et le stock de carbone ligneux

L'état de dégradation des forêts est une pré-occupation mondiale particulièrement pour l'Afrique. De ce fait, plusieurs forêts classées sont de plus en plus menacées d'extinction dont les causes sont anthropiques et climatiques. L'étude a évalué la dynamique du couvert végétal et ses implications sur le stock de carbone aérien et la diversité ligneuse de la Forêt Classée de Tiogo au Burkina Faso. Une analyse d'images Landsat des années 1990, 1999, 2009 et 2019, et des données socioéconomiques et d'inventaire forestier ont été combinées dans différentes unités d'occupation des terres : savane arborée, savane arbustive, forêt galerie, cultures pluviales et territoires agroforestiers. Entre 1990 et 2019, 47 % de la superficie des savanes arborées ont été perdus au profit des savanes arbustives et des cultures pluviales et territoires agroforestiers. Les feux de brousse, la coupe du bois et l'activité agricole constituent les principaux facteurs de dégradation. Les valeurs de la diversité ligneuse de la savane arborée ($2,14 \pm 0,31$) et de la savane arbustive ($1,92 \pm 0,43$) étaient plus élevées que celles des cultures pluviales et territoires agroforestiers ($1,31 \pm 0,62$) et de la forêt galerie ($0,63 \pm 0,41$). La forêt galerie avait le plus important potentiel de stock de carbone aérien ($35,5 \text{ tC/ha}$), suivi de la savane arborée ($7,1 \text{ tC/ha}$), puis de la savane arbustive ($2,5 \text{ tC/ha}$) et des cultures pluviales et territoires agroforestiers ($1,7 \text{ tC/ha}$). Les changements d'unités d'occupation des terres dans la Forêt Classée de Tiogo ont induit entre 1990 et 2019, une réduction de 41 % du potentiel du stock de carbone aérien. Il en ressort le besoin de promouvoir des alternatives pour les moyens de subsistance et l'énergie pour les ménages, et le renforcement des initiatives de sensibilisation.

Mots-clés : domaine classé, séquestration de carbone, activités humaines, savane soudanienne, changement d'utilisation de terres, moteurs de changement, Burkina Faso.

ABSTRACT

Dynamics of land occupation and use in the Tiogo Forest Reserve in Burkina Faso: characterisation, drivers and impacts on diversity and wood stock

Forest degradation is an issue of global concern, particularly for Africa, where protected forests are under increasing threat of extinction, due to anthropogenic and climatic causes. The aim of this study is to assess the dynamics of plant cover and its implications for above-ground carbon stocks and woody species diversity in the Tiogo Forest Reserve in Burkina Faso. Analysis of Landsat images from 1990, 1999, 2009, and 2019, socio-economic data and forest inventories were combined in different land-use units: wooded savannah, shrub savannah, gallery forest, rainfed crops and agroforestry areas. Between 1990 and 2019, 47% of the tree savannah area was lost to shrub savannah, rainfed crops and agroforestry. Bush fires, wood cutting and agricultural activities are the main factors contributing to this degradation. The wood diversity values for tree savannah (2.14 ± 0.31) and shrub savannah (1.92 ± 0.43) were higher than for rainfed crops, agroforestry areas (1.31 ± 0.62) and gallery forest (0.63 ± 0.41). Gallery forest had the greatest potential for aboveground carbon storage (35.5 tC/ha), followed by tree savannah (7.1 tC/ha), then shrub savannah (2.5 tC/ha) and rainfed crops and agroforestry areas (1.7 tC/ha). Between 1990 and 2019, changes in land use units in the Tiogo Forest Reserve resulted in a 41% reduction in the potential for aboveground carbon storage. There is a need to promote alternatives for livelihoods and energy for households, and to strengthen awareness-raising initiatives.

Keywords: conservation area, carbon sequestration, human activities, Sudanian savannah, land use change, drivers of change, Burkina Faso.

RESUMEN

Dinámica de ocupación y de utilización de las tierras en el bosque catalogado de Tiogo, en Burkina Faso: caracterización, motores e impacto en la diversidad y el stock de carbono leñoso

El estado de degradación de los bosques es una preocupación mundial, y particularmente para África. Por ello, varios bosques catalogados tienen cada vez más amenazas de extinción por causas antrópicas y climáticas. El estudio evaluó la dinámica de la cubierta vegetal y sus implicaciones en el stock de carbono aéreo y la diversidad leñosa del bosque catalogado de Tiogo, en Burkina Faso. Análisis de imágenes Landsat de los años 1990, 1999, 2009 y 2019, datos socioeconómicos e inventarios forestales se combinaron en diferentes unidades de ocupación de las tierras: sabana arbórea; sabana arbustiva; bosque en galería, y cultivos pluviales y territorios agroforestales. Entre 1990 y 2019, el 47 % de la superficie de las sabanas arbóreas se perdió convirtiéndose en sabanas arbustivas, cultivos pluviales y territorios agroforestales. Los fuegos de matorral, la tala del bosque y la actividad agrícola constituyen los principales factores de degradación. Los valores de la diversidad leñosa de la sabana arbórea ($2,14 \pm 0,31$) y de la sabana arbustiva ($1,92 \pm 0,43$) eran más elevados que los de los cultivos pluviales y territorios agroforestales ($1,31 \pm 0,62$) y del bosque en galería ($0,63 \pm 0,41$). El bosque en galería tenía el potencial de stock de carbono más importante ($35,5 \text{ tC/ha}$), seguido por la sabana arbórea ($7,1 \text{ tC/ha}$), luego por la sabana arbustiva ($2,5 \text{ tC/ha}$) y finalmente por los cultivos pluviales y territorios agroforestales ($1,7 \text{ tC/ha}$). Los cambios de unidades de ocupación de las tierras en el bosque catalogado de Tiogo indujeron entre 1990 y 2019, una reducción del 41 % del potencial de stock de carbono aéreo. Aquí resalta la necesidad de promover alternativas para los medios de subsistencia y la energía para los hogares, y reforzar las iniciativas de sensibilización.

Palabras clave: dominio catalogado, secuestro de carbono, actividades humanas, sabana sudanesa, cambio de uso de las tierras, motores de cambio, Burkina Faso.

Introduction

Les écosystèmes forestiers sont déterminants dans la recherche de solutions aux problèmes majeurs de l'humanité. En effet, les forêts constituent des puits de carbone naturels indispensables à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et contribuent aussi à la lutte contre l'insécurité alimentaire et la pauvreté (Kristensen et Balslev, 2003 ; FAO, 2016). Cependant, la régression des superficies forestières est une contrainte majeure à l'expression de ce potentiel des forêts. En effet, à l'échelle mondiale, le couvert forestier a régressé de 7,8 millions d'hectares entre 1990-2000, 5,2 millions entre 2000 et 2010 et 4,7 millions par an entre 2010 et 2020 (FAO, 2020). Sur les six régions du monde, l'Afrique, notamment la partie occidentale, est celle qui a le plus perdu de superficies forestières avec un taux de régression de 0,45 % par an pour la période de 2000 à 2010 et de 0,59 % entre 2010 et 2020 (FAO, 2020). Il y a donc urgence à mettre en œuvre des stratégies pour faire face à ce phénomène. Cela a donc motivé les décideurs de plus de 140 pays, lors de la 26^{ème} Conférence des Parties (COP) de la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) à Glasgow, à faire une déclaration sur les forêts et l'utilisation des terres (FAO, 2021). Dans cette déclaration, les dirigeants promettent de renforcer leurs efforts communs pour, entre autres, conserver les forêts et les autres écosystèmes terrestres et accélérer leur restauration d'ici 2030.

La perte du couvert végétal est une problématique majeure à traiter pour certains pays comme le Burkina Faso qui, déjà, disposent peu de cette ressource naturelle (le couvert végétal est de 14 % de sa superficie totale). Le pays a perdu 59 900 ha/an (soit 1 %) de sa couverture végétale entre 1990 et 2015 (FAO, 2016). Les statistiques montrent aussi que le couvert forestier national est passé de 6 716 500 ha en 2010 à 6 216 400 ha en 2020, soit une régression de 7,44 % (FAO, 2020). Les actions anthropiques, notamment l'agriculture, les feux incontrôlés, la coupe de bois, le surpâturage et l'exploitation minière, sont les principales causes directes de dégradation des ressources forestières (Savadogo, 2007 ; FAO, 2021 ; Ouattara *et al.*, 2022).

À ces actions anthropiques, il faut ajouter les changements et variabilités du climat, notamment les sécheresses qui contribuent à accentuer la régression du couvert forestier (Gansaonré *et al.*, 2020 ; Ouattara *et al.*, 2022). Jadis à l'époque coloniale, dans le souci de conserver la nature (biodiversité végétale et animale) sous pression des actions anthropiques, l'administration coloniale avait procédé à la création des domaines classés dans de nombreux pays en Afrique sub-Saharienne. Ces actes de classement, censés soustraire ces aires protégées de l'emprise humaine et permettre un meilleur développement de la végétation, ne semblent pas être efficaces même s'il existe peu de données quantitatives (Tankoano *et al.*, 2016). Par ailleurs, les études sur les changements d'unités d'occupation des terres font rarement le lien avec leurs implications sur les stocks de carbone.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser la dynamique du couvert végétal de la Forêt Classée de Tiogo (Burkina Faso). Spécifiquement, il s'est agi : (i) d'analyser les changements des différentes unités d'occupation des terres en 30 ans ; (ii) de déterminer les moteurs de ces changements ; (iii) d'évaluer la diversité et la séquestration du carbone ligneux par type d'unité d'occupation des terres. Nous avons supposé que : (i) le statut classé de cette forêt n'a pas suffi à la protéger des actions anthropiques et qu'elle s'est dégradée ; (ii) les changements d'unités d'occupation des terres ont conduit à des pertes substantielles de stock de carbone aérien.



Photo 2.

Aperçu de la savane arbustive dans la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.
Overview of the shrub savannah in the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.

Photo I. Konaté.

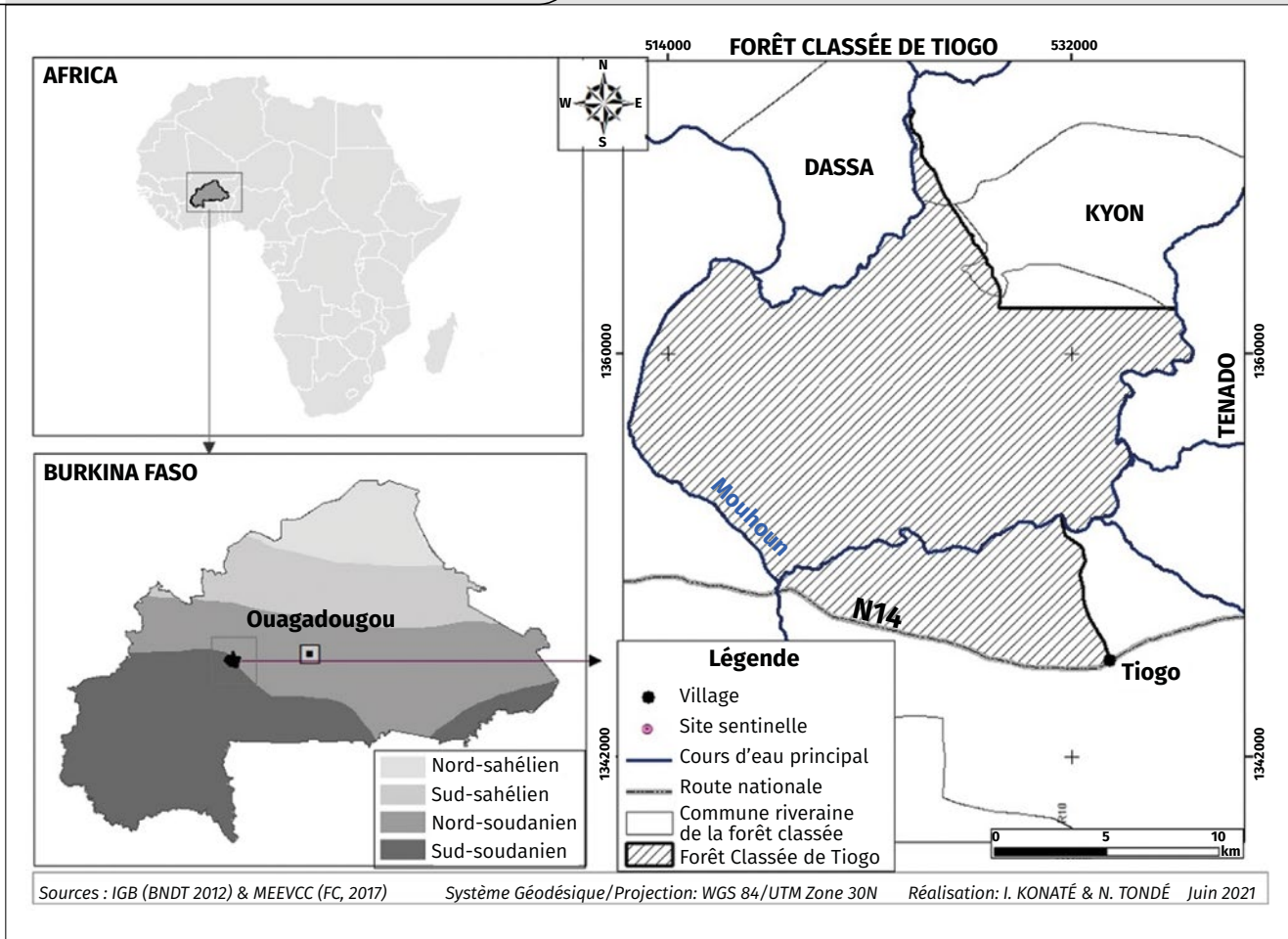


Figure 1.
Localisation du site d'étude (la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso).
Location of the study site (Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso).

Matériel et méthodes

Zone d'étude

La Forêt Classée de Tiogo (FCT), de coordonnées géographiques 2°39' et 2°52' longitude ouest et 12°11' et 12°24' latitude nord, se situe dans les départements de Kyon et Ténado, Province du Sanguié, région du Centre Ouest du Burkina Faso. Classée par arrêté n° 114/SE du 17 janvier 1940, elle couvre une superficie d'environ 30 000 ha (figure 1). Au cinquième recensement général de la population en 2019, la commune de Ténado comptait 60 190 habitants, tandis que celle de Kyon en comptait 24 484 pour un taux d'accroissement de 2,6 % (INSD, 2022).

Les types physiologiques de végétation dominants dans la forêt sont la savane arborée (photo 1), la savane arbustive (photo 2), les forêts galeries (photo 3) et les parcs agroforestiers (photo 4) (Sawadogo, 2009).

La Forêt Classée de Tiogo relève de la zone phytogéographique Nord-soudanienne (Fontès et Guinko, 1995), comprise entre les isohyètes de 600 mm et 900 mm et caractérisée par l'alternance de deux saisons, une saison pluvieuse de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril. Entre 2001 et 2020, la pluviosité annuelle moyenne a été de 867 ± 128 mm avec de fortes variabilités interannuelles (DRAAH, 2020). L'année 2012 a été la plus pluvieuse avec 1 117 mm alors que l'année 2017 a été la moins pluvieuse avec 683 mm.

Le relief de la FCT est plat et monotone dans l'ensemble avec quelques buttes cuirassées. L'altitude moyenne est de 300 m au-dessus du niveau de la mer (DRAAH, 2020). Selon Sawadogo (2009), les principaux types de sols sont :

- les sols peu évolués : sols sablo-argileux ou gravillonnaires en surface, gravillonnaires en profondeur reposant le plus souvent sur une cuirasse et/ou carapace ;
- les sols hydromorphes, profonds constitués d'argile et de sable ;
- les sols à sesquioxydes de fer (ou oxyde ferrique, Fe_2O_3 , couramment nommés sols ferrallitiques) dont la profondeur est variable.

Méthodes d'évaluation de la dynamique spatio-temporelle de la végétation et d'identification des moteurs de cette dynamique

Evaluation de la dynamique spatio-temporelle de la végétation

• Choix et acquisition des images

Dans le but d'évaluer la dynamique spatio-temporelle de la Forêt Classée de Tiogo (FCT) entre 1990 et 2019, des images satellitaires de type Landsat, prises à quatre dates différentes (1990, 1999, 2009 et 2019), ont été utilisées pour effectuer une analyse diachronique de la dynamique de l'occupation et d'utilisation des terres. Le choix de ce type image se justifie par sa disponibilité à titre gratuit et de sa résolution spatiale élevée (Dimobe *et al.*, 2017 ; Soulama *et al.*, 2015 ; Ganamé, 2021). Ces quatre images satellitaires provenant de la scène *Path* (Colonne) 196 ; *Row* (Ligne) 051 (Tankoano *et al.*, 2016) et de résolution spatiale 30 m × 30 m ont été prises au début de la saison sèche entre les mois d'octobre et de novembre. Elles sont issues du capteur de TM (Thematic Mapper) de Landsat 5 d'octobre 1990, du capteur Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) d'octobre 1999, du capteur Landsat 7 ETM+ de novembre 2009 et du capteur 8 OLI-TIRS (Operational Land Imager) de novembre 2019. Le choix de la période (début de saison sèche) d'acquisition des images permet d'avoir une différenciation maximale des unités d'occupation des terres (Dimobe *et al.*, 2017 ; Belem *et al.*, 2018 ; Gansaonré *et al.*, 2020 ; Ganamé, 2021). En effet, à cette période, dans la zone soudanienne, les prises de vue ont l'avantage d'avoir un très faible taux de couverture nuageuse et de réduire les problèmes liés aux différences d'angles solaires, aux changements phénologiques de la végétation et à la différence d'humidité des sols (Tankoano *et al.*, 2016 ; Ganamé, 2021). Ces images utilisées ont été téléchargées sur le site web de *United States Geological Survey*¹. Ensuite, l'extraction de la zone de travail a été découpée sur chaque image des 4 dates. Cela a été opéré avant d'aborder les étapes de prétraitement et de traitement des images réalisées à l'aide du logiciel de télédétection ENVI 5.3.

¹ <https://earthexplorer.usgs.gov>

• Prétraitement des images

C'est une opération préliminaire de traitement qui permet la normalisation des images acquises (Ezzine *et al.*, 2012). Elle comporte les différentes corrections géométriques et radiométriques et permet aussi d'éliminer les effets perturbateurs atmosphériques. Les images satellitaires utilisées dans le cadre de l'étude avaient déjà subi des opérations de géoréférencement (corrections géométriques) par le fournisseur avant leur mise en ligne sur le site de téléchargement. Les corrections dans la présente étude étaient donc liées aux perturbations radiométriques et atmosphériques aussi appelées étalonnages d'images.



Photo 3.

Aperçu d'une galerie forestière dans la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.
Overview of a forest gallery in the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.
Photo I. Konaté.



Photo 4.

Cultures pluviales et territoires agroforestiers dans la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.
Rainfed crops and agroforestry areas in the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.
Photo I. Konaté.

Elles ont été effectuées grâce à la commande « *Landsat calibration* » de l'outil ENVI. Cela a permis de : (i) corriger les effets des différents artefacts qui perturbent la mesure radiométrique, notamment les défauts du capteur et le voile atmosphérique ; (ii) débarrasser le rayonnement de tous les effets atmosphériques ; (iii) convertir les radiances en réflectances ; (iv) harmoniser les luminances au sol et rendre comparables les images acquises malgré des périodes et des conditions climatiques variées (Chekchek et Fennouh, 2019). Le prétraitement a visé aussi à effectuer les compositions colorées sur toutes les images des 4 dates, dont l'objectif est de permettre une bonne discrimination visuelle des différentes unités d'occupation des terres en tenant compte des signatures spectrales en présence. Pour l'image de 2019, une composition dite de fausses couleurs à partir des bandes proche infra-rouge, verte et bleue (5-4-3) a été réalisée. Pour les images de 2009, 1999 et 1990, les compositions dites de fausses couleurs ont été obtenues à partir des bandes rouge, verte et bleue (4-3-2). Ces compositions colorées s'appuient sur les propriétés de la végétation qui lui permettent de réfléchir très fortement le rayonnement proche infrarouge et faiblement le rayonnement vert lors du processus de photosynthèse. Elles mettent en évidence facilement la présence de végétation vivante.

À partir des compositions colorées, des unités homogènes d'occupation des terres ont ensuite été délimitées sur la base d'une interprétation visuelle (photo-interprétation) des signatures spectrales observées sur l'image la plus récente (2019).

• Données de vérification terrain

La détection précise des différentes unités d'occupation des terres demeure difficile à partir des seules images satellitaires et il est donc nécessaire de se pencher sur des données de vérification terrain (Ganamé, 2021). Cette opération consiste à vérifier et identifier sur le terrain la répartition des unités d'occupation des terres délimitées sur la base de la photo-interprétation afin de mieux les discriminer en fonction des différentes signatures spectrales. Ainsi, il a été produit des points de vérification terrain répartis par unité d'occupation des terres sur l'image la plus récente (2019). Les différentes unités d'occupation des terres ont été définies sur la Base de l'Occupation des Terres (BDOT) du Burkina Faso (MEEVCC, 2020). Sur douze unités d'occupation des terres définies dans le cadre de la production de la BDOT de la zone d'étude (tableau I), six classes thématiques ont été retenues sur la base de la photo-interprétation. Cela est dû à des ressemblances d'ordre

Tableau I.

Description des différentes unités d'occupation de terres selon la nomenclature de la Base de Données de l'Occupation des Terres du Burkina Faso de la zone d'étude (MEEVCC, 2020).
Description of the different land use units according to the nomenclature of the Burkina Faso Land Use Database for the study area (MEEVCC, 2020).

Unités d'occupation des terres	Caractéristiques
Forêt claire	Peuplement ouvert d'arbres avec un recouvrement compris entre 50 et 70 %, dont les cimes sont plus ou moins jointives ; l'ensemble du couvert demeure clair.
Forêt galerie	Formation forestière tributaire des cours d'eau. Les cordons ripicoles arborés situés le long des cours d'eau à écoulement temporaire ou permanent sont inclus dans cette classe. Elle est généralement dominée par des grands arbres dont la hauteur dépasse très souvent 12 m.
Savane arborée	Les strates arborée et arbustive sont disséminées parmi le tapis herbacé ; l'ensemble a un recouvrement compris entre 20 et 50 % avec une strate arborée supérieure à 10 % mais inférieure à 50 %.
Savane arbustive et herbeuse	Formation herbeuse comportant une strate graminéenne continue d'au moins 80 cm de hauteur. Cette classe se caractérise par des arbustes disséminés parmi le tapis herbacé avec un taux de recouvrement inférieur à 50 % et par une strate arborée inférieure à 10 %.
Plantations forestières et vergers	Plantations d'arbres pour la production de bois, de produits forestiers non ligneux ou pour la régénération du milieu. Les grandes plantations monospécifiques forestières sont incluses dans cette classe.
Zones de culture pluviales et territoires agroforestiers	Zones dans lesquelles les espèces ligneuses sont sélectionnées et préservées sur les terres agricoles à cause des produits et services qu'elles procurent aux communautés locales. Les jeunes jachères sont comprises dans cette classe.
Cultures irriguées	Superficies aménagées et souvent consacrées à la riziculture et à d'autres cultures lors de la contre saison : haricots, niébé, cultures maraîchères...
Zones humides	Les zones humides naturelles comportent les fleuves, cours d'eau, lacs, rivières, mares, plaines d'inondation et bas-fonds. Les zones humides artificielles sont les retenues d'eau de barrages (grands et petits réservoirs), les boulis (mares artificielles) et les terres agricoles irriguées.
Surface en eau	Formation constituée des surfaces en eau
Sols nus, dénudés, cuirassés	Les arbres, arbustes et la strate herbacée sont généralement absents.
Roche nue	Formation composée avec les éboulis, la falaise, les rochers, les affleurements rocheux et les laves.
Habitat	Formation correspondant à l'habitat humain et aux autres établissements humains.

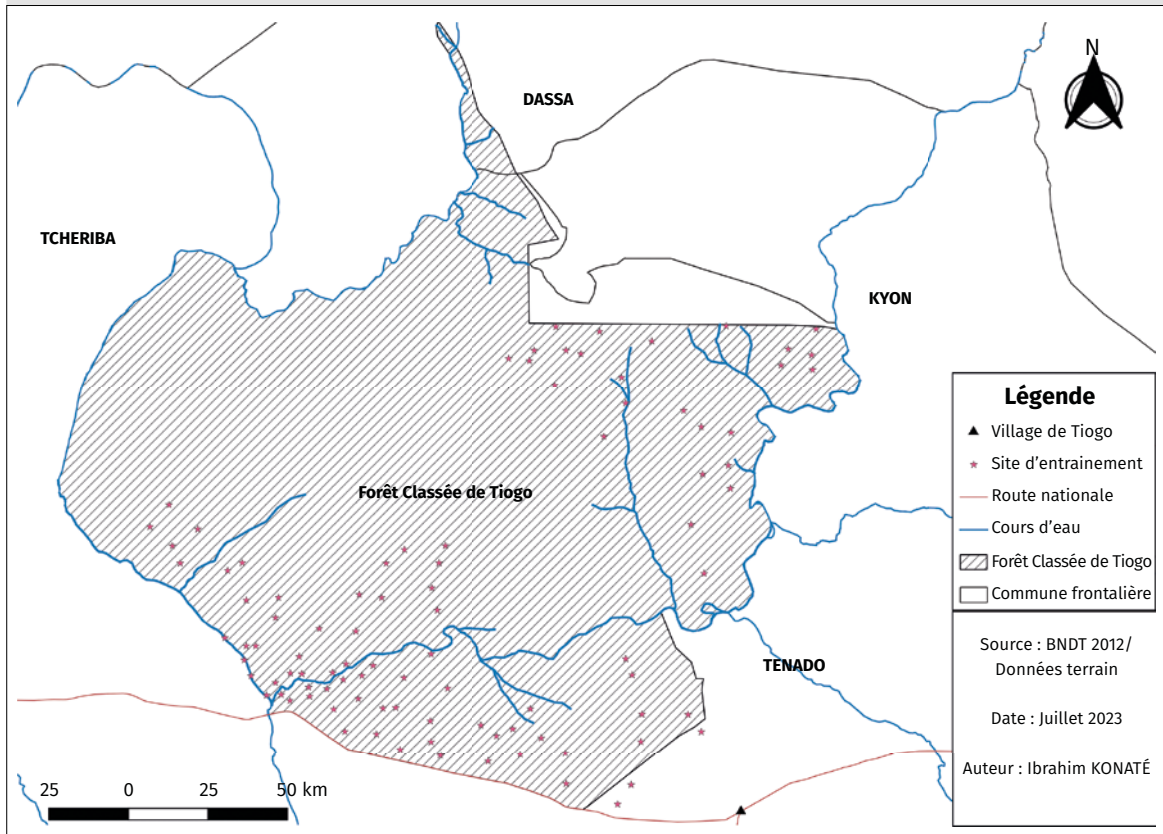


Figure 2.
Répartition des points de vérification terrain à l'échelle de la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.
Distribution of field verification points throughout the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.

physionomique liées à la confusion des signatures spectrales entre certains types d'occupation des terres dans la savane soudanienne (Dimobe, 2017 ; Ganamé, 2021). La forêt galerie, la savane arborée, la savane arbustive, les cultures pluviales et territoires agroforestiers, les sols nus et les cours d'eau ont donc été retenus. Au total, les coordonnées géographiques de 96 points ont été générées (figure 2). Le nombre de points de vérification terrain de la forêt galerie, de la savane arborée, de la savane arbustive, des cultures pluviales et territoires agroforestiers, des sols nus et des cours d'eau s'établit respectivement à : 7 ; 25 ; 32 ; 13 ; 7 ; 5. En outre, sept sites ont été accordés aux unités d'occupation des terres pour lesquelles la composition colorée n'avait pas permis de bien les caractériser. Les coordonnées de ces points ont ensuite été enregistrées dans l'appareil de géo-positionnement GPS (*Global Positioning System*) et permettant d'accéder aux sites sur le terrain où des vérifications ont été effectuées pendant la période du 5 au 8 mars 2021, en vue de s'assurer de l'exactitude des unités d'occupation des terres observées. Il a été supposé qu'entre 2019, date de l'image la plus récente, et 2021, date de la vérification terrain, il n'y a pas eu de changement majeur d'occupation des terres, à cause de conditions environnementales difficiles dans la zone d'étude (climat, sol, etc.).

• Classification des images

Les vérifications menées sur le terrain ont conduit à une meilleure connaissance des unités d'occupation générées par la photo-interprétation. Cela a permis de faire les différentes classifications par la méthode supervisée en utilisant l'algorithme « Maximum de vraisemblance » (*Maximum Likelihood*, en anglais). Selon plusieurs auteurs, cet algorithme est performant dans la classification des images, notamment dans les savanes soudanaises (Dimobe, 2017 ; Belem *et al.*, 2018 ; Ganamé, 2021). En pré-lude à cette classification, nous avons créé des zones d'entraînements (témoins) communément appelées « Régions d'intérêt » (*Region Of Interest*, en anglais) et abrégées « ROIs » (Dimobe *et al.*, 2017 ; Ganamé, 2021). Ces ROIs au nombre de 24, soit quatre zones par unité d'occupation des terres, ont permis d'identifier des classes d'information qui ont ensuite été utilisées pour définir des classes spectrales représentatives de chaque unité d'occupation des terres (Ganamé, 2021). Cependant, par la connaissance du terrain et de la signature spectrale assignée aux unités d'occupation des terres, et pour réduire les confusions d'appartenance des pixels entre les classes, nous nous sommes limités à quatre ROIs par unité d'occupation des terres. La délimitation de ces ROIs a consisté à dessiner des polygones de pixels homogènes par unité d'oc-

cupation des terres, en tenant compte des résultats de la vérification terrain réalisée à partir des images de 2019. Ensuite, ces polygones ont été sauvegardés comme des couches d'information vectorielle, utilisées comme paramètre pour la classification (Dimobe, 2017). L'outil *Google Earth* et les mosaïques d'images des unités d'occupation des terres de l'année 2019 ont servi à mieux définir les ROIs. Pour les années antérieures (1990, 1999 et 2009), pendant la production des ROIs, une observation particulière a été faite sur les changements liés aux différences spatio-temporelles de ces années. Ainsi, les ROIs avec les groupes de pixels inchangés ont été principalement sélectionnés afin de confirmer une équivalence des unités d'occupation des terres entre les années antérieures et l'année récente (2019).

• Vérification de la précision de la classification

Pour définir le niveau de précision de la classification, la moitié des ROIs représentant l'ensemble des classes thématiques a été utilisée pour effectuer un test de validation. L'utilisation de la moitié des ROIs pour le test de validation est due aux types d'images utilisées (images Landsat) qui ont des résolutions de 30 m (pas très précises), ce qui ne facilite pas l'identification à 100 % des unités d'occupation des terres. Cela nous a permis de minimiser les erreurs de confusion sur les unités, tout en ayant une précision acceptable. Le résultat du test a donné la matrice de confusion pour chacune des quatre images (1990, 1999, 2009 et 2019) (annexes 6 à 9). La matrice de confusion est un outil restitué sous forme de tableau permettant d'évaluer la fiabilité de la classification (Belem *et al.*, 2018). Elle a permis de déterminer l'erreur de commission et l'erreur d'omission afin d'évaluer la précision globale, et l'indice Kappa (K) évaluant la différence entre modèle prédit et réalité. L'erreur de commission est l'affectation d'un pixel à une classe autre que celle à laquelle il devrait appartenir. L'erreur d'omission, quant à elle, représente la non-affectation d'un pixel à la classe à laquelle elle devrait appartenir (Akoguh *et al.*, 2022). L'indice Kappa est le rapport entre le nombre de pixels bien classés et le nombre total de pixels sondés. Il évalue la concordance entre les modèles prédits et la réalité (Tilahun et Islam., 2015). Ainsi, le niveau de précision de la classification a été apprécié à partir de la précision globale et de l'indice Kappa (Foody, 2002). Pour ces indicateurs de performance, des valeurs minimales acceptables de 60 % pour la précision (Belem *et al.*, 2018) et de 0,80 à 0,61 pour K (Congalton, 1991) sont requises et ont été retenues.

• Post classification

Les images classifiées ont subi une série d'opérations. Il s'agit de la combinaison des classes (*Combine Classes*), du tamisage des classes (*Sieve Classes*), du lissage des classes (*Clump Classes*). À l'issue du processus de lissage, les images classifiées ont été soumises à un filtre majoritaire d'une dimension de 3 × 3 pixels en vue de les rendre plus nettes par élimination des pixels isolés (Tankoano *et al.*, 2016). Les images classifiées et filtrées ont été vectorisées pour passer d'un fichier EVF (fichier image

du logiciel ENVI) à Shapefile (fichier d'information vectoriel utilisable dans un logiciel de système d'information géographique, SIG). Cette opération a rendu possible leur exportation dans un logiciel de cartographie Arc GIS 10.5 à partir duquel les cartes d'occupation des terres de 1990, 1999, 2009 et 2019 ont été élaborées. De même, les informations relatives à la variation des superficies des unités d'occupation des terres y ont été déterminées.

La méthodologie adoptée pour la réalisation de ce travail, allant de l'acquisition des images satellitaires jusqu'à la production finale des cartes, est résumée dans la figure 3.

• Analyse des évolutions du couvert végétal

- Évolution temporelle de l'occupation des terres : Le taux moyen, entre deux périodes, a été déterminé à partir de la formule donnée par Long *et al.* (2007). Elle s'écrit :

$$T_a = \frac{(A_2 - A_1) \times 100}{A_1 \times (T_2 - T_1)} \quad (\text{équation 1})$$

avec T_a = taux annuel de changement (%), A_1 = superficie de la classe au temps T_1 , A_2 = superficie de la classe au temps T_2 .

Le taux de changement global des superficies des unités d'occupation des terres entre les années 1990 et 2019 a été déterminé à travers l'équation proposée par Bernier (1992). Elle s'écrit :

$$T_g = \frac{\ln S_2 - \ln S_1}{(T_2 - T_1) \times \ln e} \times 100 \quad (\text{équation 2})$$

avec T_g = taux de changement global ; S_1 = surface d'une classe d'unité de surface au temps T_1 ; S_2 = superficie de la même classe d'unité de surface au temps T_2 ; \ln = logarithme népérien et e = base des logarithmes népériens ($e = 2,71828$).

Les valeurs positives représentent une progression de la superficie de la classe pendant la période analysée, tandis que les valeurs négatives indiquent la perte de surface d'une classe entre les deux dates. Quant aux valeurs proches de zéro, elles expriment une relative stabilité de la classe sur les deux périodes.

- Évolution spatiale de l'occupation du sol : L'analyse de l'évolution spatiale de l'occupation des terres a été réalisée à l'aide de la matrice de transition ou de conversion des types d'occupation du sol tous les dix ans (1990 à 1999, 1999 à 2009 et 2009 à 2019). Cette technique permet de mettre en évidence les différentes formes de conversion qu'ont subies les formations végétales (Zakari *et al.*, 2018) entre deux dates t_1 et t_2 . Elle est obtenue par le croisement des cartes d'occupation du sol de 1990 et 1999, 1999 et 2009, 2009 et 2019. Cela est rendu possible par l'algorithme « *Intersect polygons* » de l'extension *Geoprocessing* du logiciel ArcGIS. La table d'attribut est ensuite exportée vers le tableur Excel (*Table to Excel*) à partir duquel la matrice de transition a été élaborée.

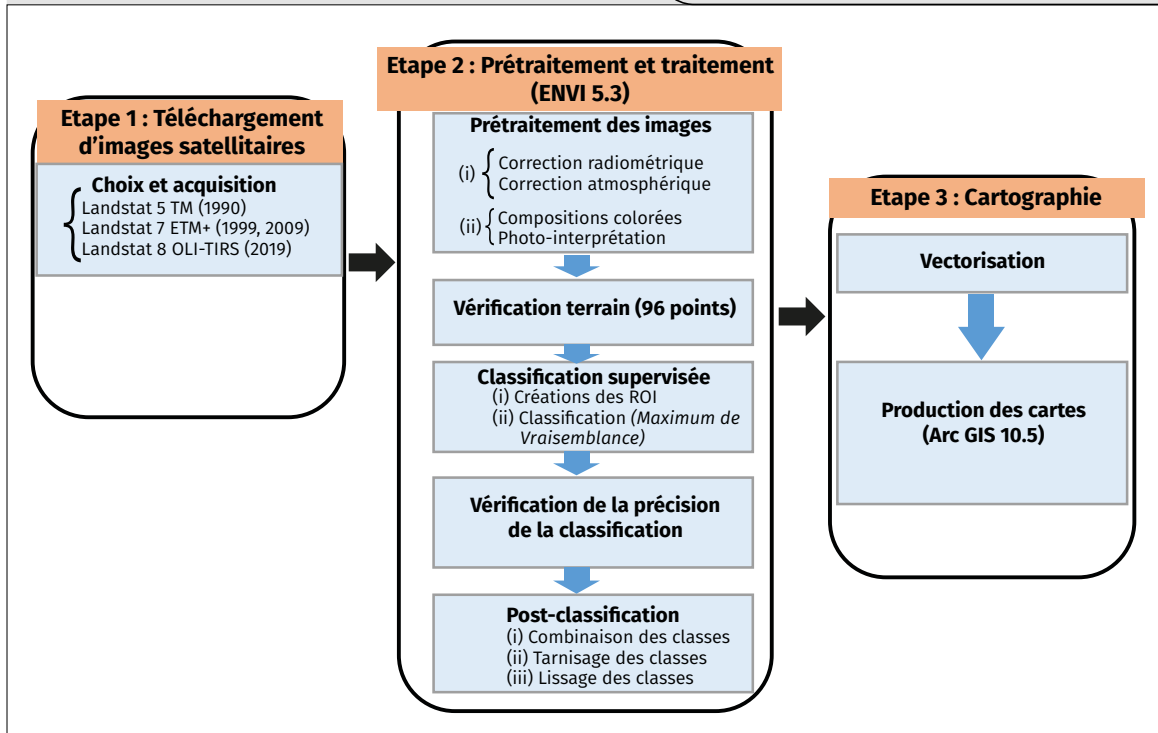


Figure 3. Schéma méthodologique de l'analyse spatio-temporelle (acquisition, traitements d'images et production des cartes) de la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso. *Methodology for spatio-temporal analysis (acquisition, image processing and map production) of the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.*

Identification des moteurs de la dynamique spatio-temporelle du couvert végétal

Pour déterminer des facteurs explicatifs des changements observés sur les images traitées, des enquêtes ont été conduites auprès de la population riveraine de la FCT. Elles ont consisté en des entretiens semi-structurés dans 12 villages riverains de la forêt que sont : Esapoun, Tiogo, Tiogo-Mouhoun, Tio, Kyon, Bwo, Négarpoulo, Tialgo, Ziliwélé, Poa, Po et Ténado-Centre. Quatre critères utilisés par Zakari *et al.* (2018) ont guidé le choix de ces villages : la proximité, l'accessibilité, la diversité des groupes socio-professionnels et la diversité des groupes socioculturels. De même, Yelkouni (2004) les a identifiés et considérés dans le cadre de ses enquêtes socio-économiques dans la même zone d'étude. Au total 303 individus ont été enquêtés.

La taille de l'échantillon (N) a été déterminée à partir de la formule de Schwartz (1995) :

$$N = \frac{Z\alpha^2(P \times Q)}{i^2} \quad (\text{équation 3})$$

avec N = taille de l'échantillon ; Zα = 1,96 écart réduit correspondant à un risque α de 5 % ; i = précision désirée (égale à 5 % pour cette étude) ; P = proportion de personnes âgées de plus de 30 ans rapportée à la population totale des trois communes avec Q = 1 - P.

La proportion (P) a été déterminée à partir des données démographiques de 2020 en projection de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD, 2017).

Le nombre de personnes à enquêter par village ($n_{\text{village } i}$) a été calculé en divisant l'effectif de la population du village par l'effectif total des 12 villages et en multipliant ce nombre par la taille de l'échantillon qui est de 303, soit :

$$n_{\text{village } i} = \left(\frac{\text{Effectif village } i}{\text{Effectif total des 12 villages}} \right) \times N \quad (\text{équation 4})$$

avec N = taille de l'échantillon total.

Les données du cinquième recensement général de la population (RGPH) de 2006 ont servi à évaluer le nombre d'enquêtés par village compte tenu de la non-disponibilité de données projetées en 2020 et désagrégées par village (annexe 1). De même, les résultats obtenus avec le sixième recensement général de la population (RGPH) relatifs aux villages n'étaient pas disponibles en mai 2021 lorsque nous conduisions l'enquête.

Les personnes âgées d'au moins trente (30) ans ont été choisies en supposant leur aptitude à expliquer les changements intervenus au niveau de la FCT (annexe 2). Les investigations ont porté sur :

- les informations générales sur l'enquête : statut, activités principale et secondaire, tenure foncière (relation à la terre que l'enquête utilise) ;
- la perception de l'enquêté sur les causes et les facteurs de changement d'utilisation des terres dans la Forêt Classée de Tiogo et sa zone périphérique ;
- les suggestions d'amélioration sur les méthodes de la gestion de la FCT ainsi que le mode de gouvernance.

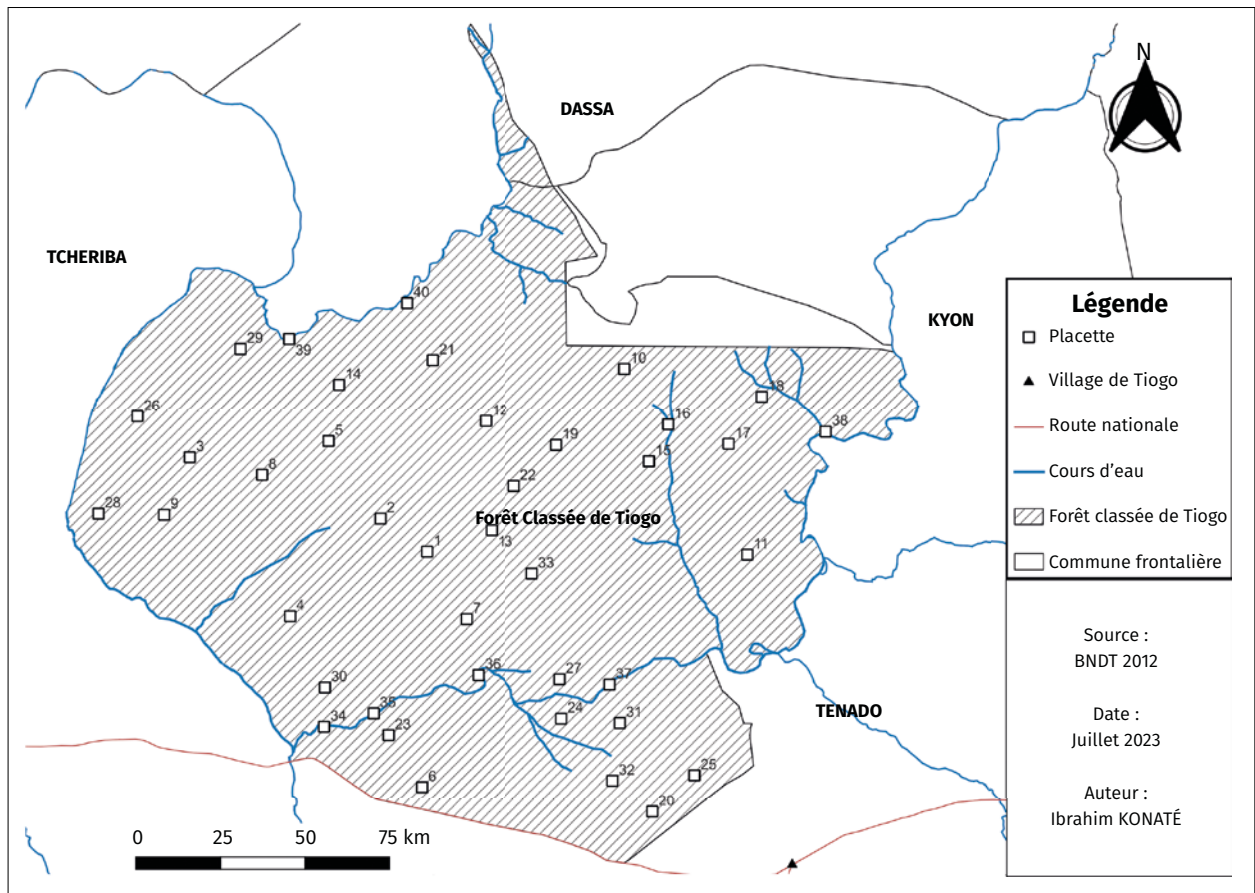


Figure 4. Répartition des placettes d’inventaire forestier à l’échelle de la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.
 Distribution of forest inventory plots throughout the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.

Tableau II.

Répartition des placettes d’inventaire forestier dans chacune des unités d’occupation de terre dans la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.
 Distribution of forest inventory plots in each of the land-use units in the Tiogo forest reserve, Burkina Faso.

Unité d’occupation des terres	Superficie (ha)	Nombre de placettes
Savane arbustive	8 158	11
Cultures pluviales et territoires agroforestiers	7 635	7
Savane arborée	11 448	15
Forêt galerie	472	7
Total	27 713	40

Source : données terrain, 2021.

Calcul du taux de réponse

Le taux de réponses fournies par les enquêtés suivant le type de facteurs (cause de dégradation, rapport avec la forêt, besoins énergétiques) a été calculé en utilisant la formule :

$$F = \frac{S}{N} \times 100, \tag{équation 5}$$

avec F : taux de réponse pour le type d’utilisation (%) ; S : nombre de personnes ayant fourni une même réponse par rapport à un facteur donné ; N : nombre total de personnes interviewées.

Consentement des enquêtés

Avant le début de chaque entrevue, les agents de terrain qui conduisaient les enquêtes ont explicitement souligné la nature académique de l’enquête et la manière anonyme dont les réponses seraient traitées. Avec ces informations, tous les participants aux enquêtes ont librement donné leur consentement pour répondre aux questions.

Évaluation de la diversité floristique et quantification du carbone aérien

Cette étape à travers un inventaire forestier évalue l'implication des changements d'unités d'occupation des terres, en termes de diversité ligneuse et de stock de carbone aérien.

Plan de sondage

Un échantillonnage aléatoire stratifié disproportionné a été appliqué. Quarante placettes de 50 × 50 m (2 500 m²) ont été inventoriées et réparties (figure 4) dans les différentes unités d'occupation de terres (tableau II). La taille de placette dans cette étude (2 500 m²) s'inspire de la taille des placettes des dispositifs expérimentaux installés depuis 1992 dans les Forêts Classées de Tiogo et de Laba au Burkina Faso (Sawadogo, 2009) et aussi des tailles de placettes utilisées par certains auteurs dans des formations similaires (Dayamba *et al.*, 2016 ; Ky-Dembele *et al.*, 2019). Le nombre de placettes par unité d'occupation des terres a tenu compte de leur hétérogénéité.

Inventaire floristique

Dans chaque placette, le nom scientifique des espèces rencontrées ainsi que les données dendrométriques sont relevés. Il s'agit de :

- la circonférence à hauteur de poitrine à 1,30 m au-dessus du sol ($C_{1,30\text{ m}}$), mesurée à l'aide d'un ruban de couturier. Elle a été ensuite convertie en diamètre à hauteur de poitrine (*Diameter at breast height*, DBH) par la relation :

$$DBH = \frac{C_{1,30\text{ m}}}{\pi} \quad (\text{équation 6})$$

avec $C_{1,30\text{ m}}$ le diamètre à 1,30 m seulement pour les individus de hauteur supérieure à 10 cm au-dessus du sol (Sawadogo, 2009 ; Dayamba *et al.*, 2016).

- la hauteur totale a été mesurée à l'aide d'une perche graduée de 7 m ou d'un clinomètre (SUUNTO) pour les sujets dont la hauteur est supérieure à 7 m. Pour les individus multicaulés, la hauteur et la circonférence de la tige la plus haute ont été mesurées.

Calcul de la richesse et de la diversité floristique ligneuse

La richesse spécifique représente le nombre total d'espèces présentes par unité d'occupation des terres.

La diversité a été déterminée par l'indice de diversité de Shannon (H') dont la formule est :

$$H' = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (\text{équation 7})$$

avec S = richesse spécifique ; p_i = abondance relative ($p_i = n_i / N$ avec n_i = nombre d'individus d'une espèce i et N = nombre total d'individus dans la parcelle) ; ln = logarithme népérien.

Il est généralement utilisé par des auteurs et est exprimé en bits dont les valeurs extrêmes sont comprises entre 0,5 (faible) et 4,5 bits environ (grande) (Tindano *et al.*, 2021 ; Kumar *et al.*, 2022).

Quantification de la biomasse et du stock de carbone aérien

Les données d'inventaire ont servi aussi à estimer la biomasse aérienne ligneuse (AGB) et le stock de carbone correspondant. Nous avons utilisé l'équation généralisée pantropicale de Chave *et al.* (2014) :

$$AGB = 0,0673 \times (\rho D^2 H)^{0,976} \quad (\text{équation 8})$$

avec ρ = densité spécifique du bois ; D (cm) = diamètre à 1,30 m du sol ; H (m) = hauteur totale et AGB = biomasse aérienne ligneuse.

Cette équation est proposée pour les forêts sèches. Elle a été préférée aux équations spécifiques qui n'étaient pas disponibles pour toutes les espèces rencontrées lors des inventaires. Le stock de carbone aérien a été calculé en multipliant AGB par 0,5 qui est la fraction carbone donnée par le GIEC (2003).

Analyse des données

Analyse de la dynamique du couvert végétal

La dynamique du couvert végétal a été appréciée à partir du calcul du taux de changement des unités d'occupation des terres. Ces informations ont permis d'évaluer leur évolution en termes de superficie. De même, la détermination de la matrice de transition donne un aperçu sur l'évolution temporelle du couvert végétal. Ces aspects ont été décrits en détail ci-dessus.

Analyse statistique des données d'enquêtes

Les calculs des taux de réponse ont servi à générer des histogrammes de fréquences de réponse par rapport à la perception des facteurs de dégradations (directs ou secondaires) et aux propositions de gestion. Par ailleurs, un test de Khi2 (χ^2) a été réalisé pour tester l'hypothèse d'indépendance entre les profils des enquêtés (variable indépendante) et les facteurs de dégradation (variable dépendante).

Au préalable, il a été vérifié que toutes les fréquences absolues étaient supérieures à 5, ce qui confirme la condition de validité de ce test (Sambiéni *et al.*, 2015).

Analyse statistique des données sur la végétation ligneuse

Au préalable, le test de Shapiro-Wilk a été réalisé pour tester la normalité des distributions des données. Une analyse de variance à un facteur a été effectuée pour tester s'il y avait un effet significatif des unités d'occupation des terres sur le stock moyen de carbone aérien à l'hectare. Pour la diversité (H), comme le test de Shapiro-Wilk n'a pas validé la normalité de la distribution, nous avons utilisé le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis pour tester s'il y avait un effet significatif des unités d'occupation des terres sur la diversité (H).

Nous avons aussi réalisé des analyses de courbes d'accumulation pour estimer la variation de la richesse des espèces en fonction de l'effort d'échantillonnage.

Ensuite, en supposant que le stock moyen de carbone aérien à l'hectare ne varie pas au cours du temps dans chaque unité d'occupation des terres, nous avons utilisé le stock de carbone aérien (à l'hectare) pour chaque unité

d'occupation des terres et la superficie du type d'unité d'occupation des terres à différentes dates (correspondant aux dates des images analysées ; 1990, 1999, 2009 et 2019) pour tracer des courbes qui montrent la fluctuation de ce stock carbone aérien dans chaque unité d'occupation des terres ainsi que dans toute la FCT sur les 30 ans.

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel libre R version 4.3.3.

Résultats

Changements d'occupation des terres

Dynamique spatio-temporelle de la végétation

Les cartes d'occupation des terres de la FCT en 1990, 1999, 2009 et 2019 sont présentées dans les figures 5A et 5B. Elles montrent que la superficie des cultures pluviales et territoires agroforestiers et de la savane arbustive a augmenté entre 1990 et 2019 au détriment de la savane arborée.

Les précisions globales des classifications varient entre 72 % et 93 % et les indices de Kappa entre 0,69 et 0,92 (tableau III).

Évolution temporelle de l'occupation des terres

La matrice de transition ou de conversion par unité d'occupation des terres entre 1990 et 2019 est présentée dans le tableau IV.

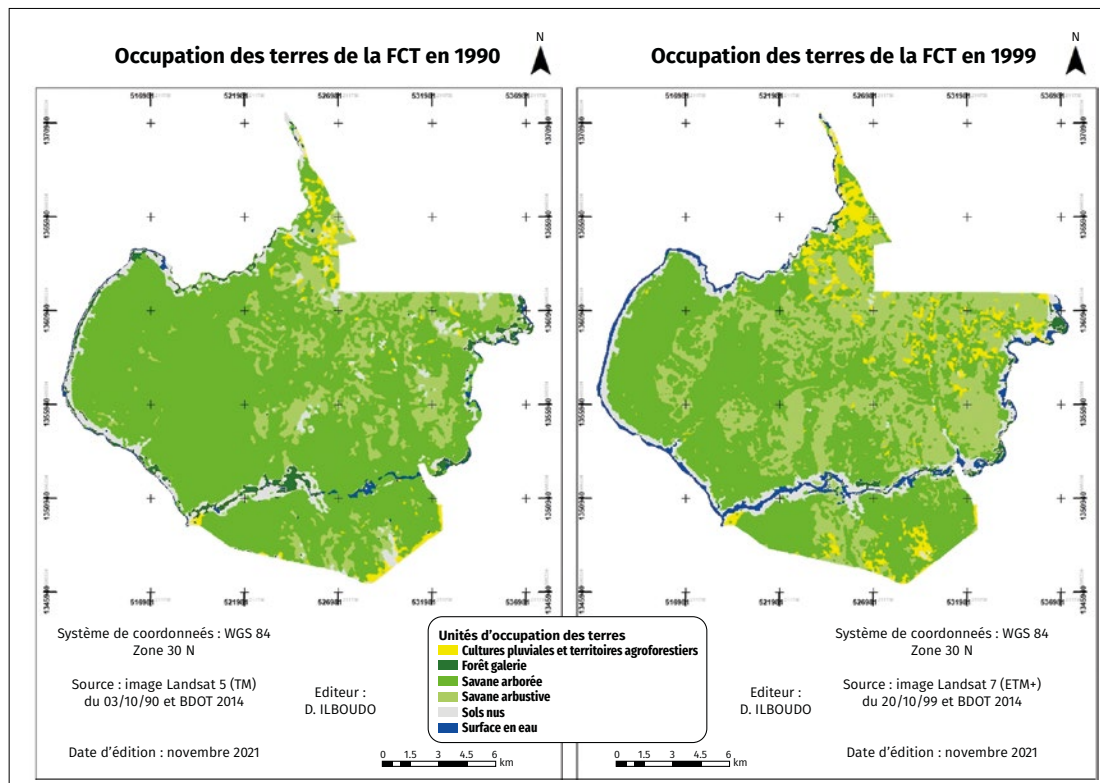
Sur les trois décennies, le tableau IV montre que sur une superficie de savane arborée de 21 593 ha en 1990, 5 089 ha se sont transformés en cultures pluviales et territoires agroforestiers et 5 266 ha en savane arbustive ; soit une perte de 47 % de savane arborée entre 1990 et 2019 au profit des cultures pluviales et territoires agroforestiers et de la savane arbustive.

Sur la période de 1990 à 1999, la superficie des cultures pluviales et territoires agroforestiers et des savanes arbustives ont augmenté avec un gain moyen annuel respectivement de 20 % et de 11 % (annexe 3). Ces augmentations se sont faites au détriment des savanes arborées qui ont connu une perte annuelle de 3 %. Une tendance régressive de la forêt galerie a également été observée sur la même période avec un taux moyen annuel de 6 %.

Tableau III.

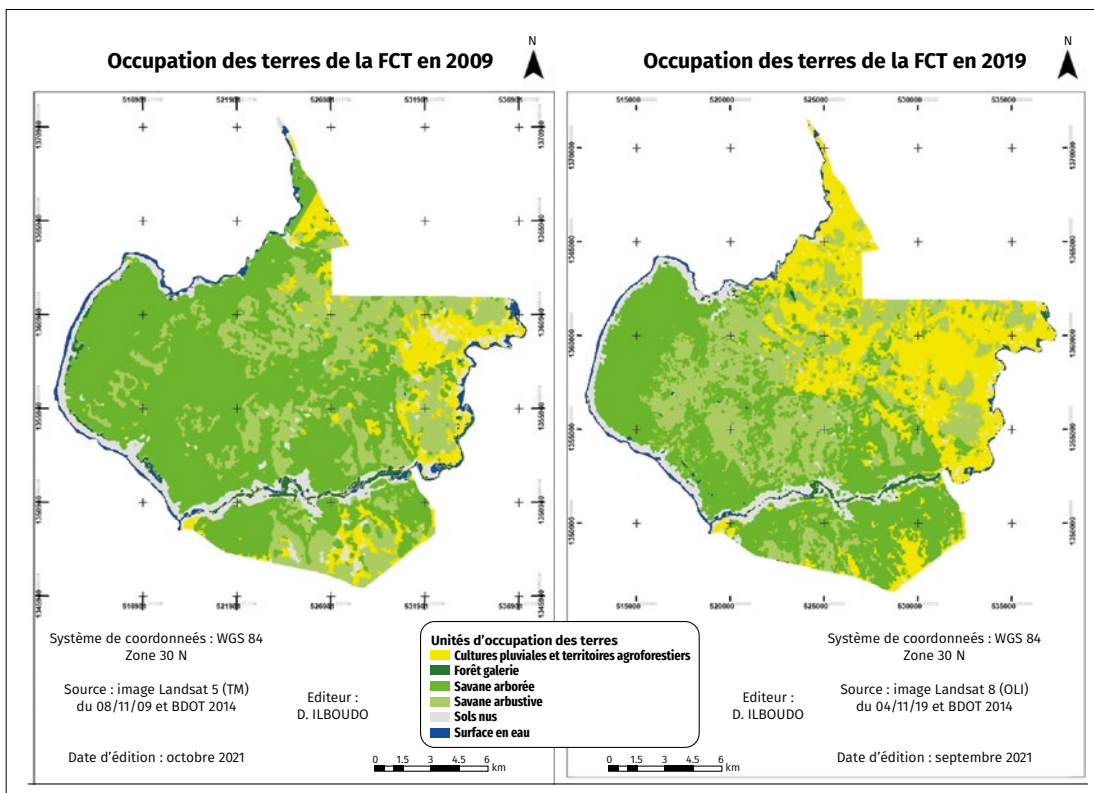
Indices d'évaluation de la qualité des images classifiées.
Indices for assessing the quality of classified images.

Paramètres	Année de production de l'image			
	1990	1999	2009	2019
Précision globale (%)	72	90	93	89
Indice de Kappa	0,69	0,89	0,92	0,89



Figures 5A.

Changements d'occupation des terres dans la Forêt Classée de Tiogo de 1990 et 1999, Burkina Faso.
Changes in land use in the Tiogo Forest Reserve between 1990 and 1999, Burkina Faso.



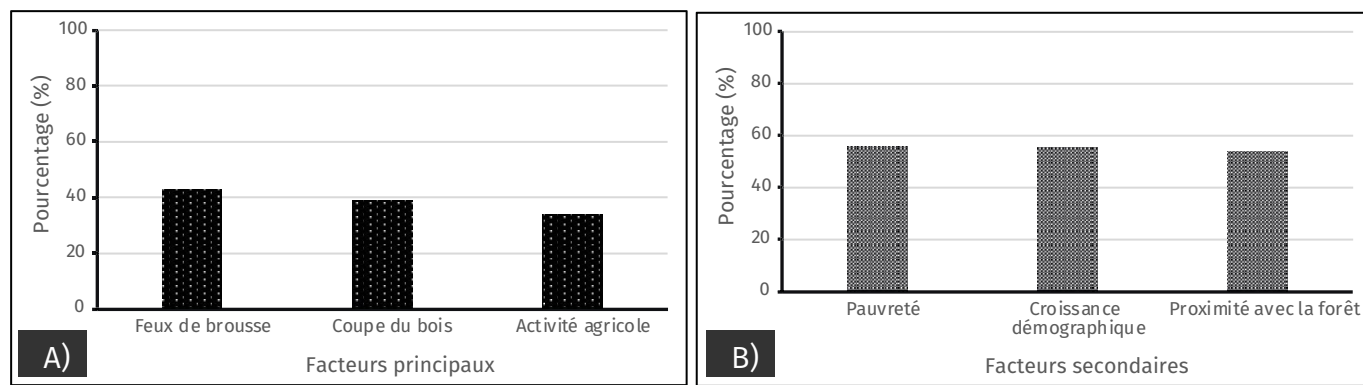
Figures 5B. Changements d'occupation des terres dans la Forêt Classée de Tiogo de 2009 et 2019, Burkina Faso.
Changes in land use in the Tiogo Forest Reserve between 2009 and 2019, Burkina Faso.

Tableau IV.

Matrice de transition des unités d'occupation des terres entre 1990 et 2019. Les valeurs du tableau représentent des superficies (unité : ha). Les valeurs en gras dans les cellules de la diagonale indiquent la stabilité de la superficie des unités entre 1990 et 2019.

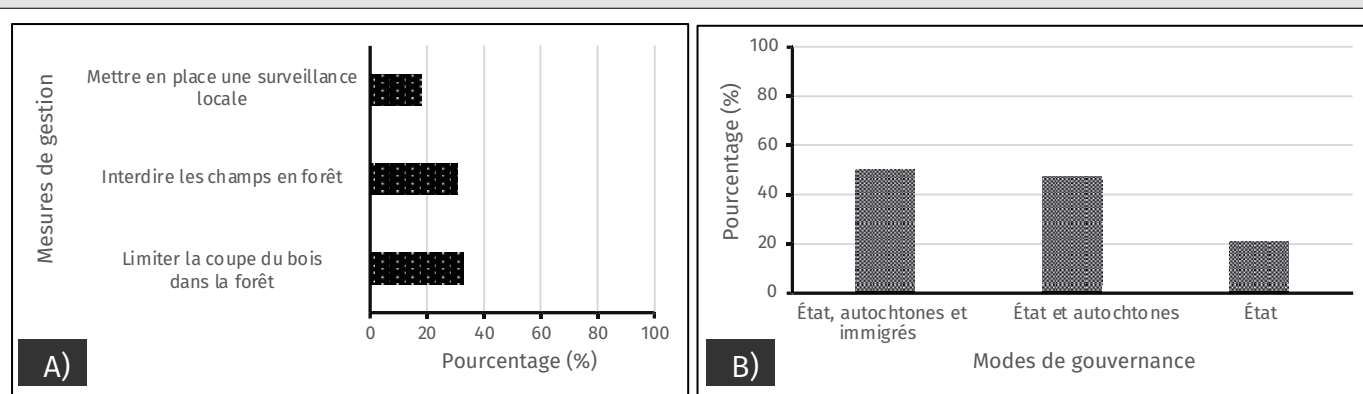
Transition matrix of land use units between 1990 and 2019. The values in the table represent areas (unit: ha). The bold values in the diagonal cells indicate the stability of the area of the units between 1990 and 2019.

Type d'occupation des terres en 1990	Type d'occupation des terres en 2019						Superficie totale (ha) en 1990
	Cultures pluviales et territoires agroforestiers	Forêt galerie	Savane arborée	Savane arbustive	Sols nus	Surface en eau	
Cultures pluviales et territoires agroforestiers	510	1	49	37	19	1	617
Forêt galerie	212	192	53	18	283	168	928
Savane arborée	5 089	215	10 475	5 266	457	91	21 593
Savane arbustive	1 193	0	786	2 647	25	0	4 652
Sols nus	613	23	74	186	812	54	1 761
Surface en eau	17	42	10	3	89	150	311
Superficie totale (ha) en 2019	7 635	472	11 448	8 158	1 685	464	29 862

**Figures 6.**

Perception des enquêtés sur les facteurs principaux (directs) (A) et secondaires (jacents) (B) de la déforestation et de la dégradation de la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.

Respondents' perceptions of the main (direct) factors (A) and secondary (underlying) factors (B) in deforestation and degradation of the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.

**Figures 7.**

Perceptions des enquêtés sur les règles de gestion (A) et le mode de gouvernance (B) qui seraient adéquat pour la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.

Respondents' perceptions of the management rules (A) and mode of governance (B) that would be appropriate for the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.

La hausse de la superficie des cultures pluviales et territoires agroforestiers a été également enregistrée sur la période de 1999 à 2009 (annexe 4). En effet, le taux moyen annuel de cette hausse s'établit à 7 % et traduit la conversion de la superficie forestière (savane arborée 0,82 % et forêt galerie 3 %) en surface agricole. De même, on a observé un accroissement de la superficie des savanes arbustives dont la moyenne annuelle de changement est de 2 %. Par contre, une régression de la savane arborée dont la perte moyenne annuelle est de 0,25 % a été enregistrée.

Sur la période de 2009 à 2019, l'activité agricole s'est intensifiée dans la FCT, entraînant une augmentation de la superficie des cultures pluviales et des territoires agroforestiers (annexe 5). Cela se traduit par un accroissement moyen de ces superficies de l'ordre de 17 %. De même, l'expansion des terres agricoles a provoqué une régression des superficies des savanes arborées et des forêts galeries, tandis que les savanes arbustives ont connu un gain. Les taux de changement de ces terres sur l'ensemble des unités d'occupation sont respectivement de 3 %, 1 % et 3 % pour la savane arborée, la savane arbustive et la forêt galerie.

Moteurs des changements du couvert végétal et modes de gestion

Changements observés et facteurs de conversion

• Profil des personnes enquêtées

Les personnes enquêtées étaient composées de 81 % d'hommes et 19 % de femmes et 96 % d'entre eux étaient mariés. Environ 66 % des enquêtés n'ont eu accès à aucun système éducatif, 7 % ont suivi des cours d'alphabétisation en langues locales contre 6 % pour ceux qui ont fréquenté l'école rurale. Par ailleurs, 13 % ont déclaré avoir le niveau primaire. Quant au niveau secondaire, la proportion est de l'ordre de 7 %.

Les populations enquêtées tirent leurs revenus principalement de l'agriculture (94 %) et de l'élevage (3 %). Les autres secteurs d'activités comme les exploitants forestiers, les commerçants et d'autres activités telles que la pêche, l'orpillage et l'artisanat sont faiblement représentés avec des proportions respectives de 0,33 %, 2 % et 2 %. Concernant les activités secondaires, les données ont montré que les acti-

tivités de maraîchage occupent 44 % de la population enquêtée. Les éleveurs représentent 17 %, les exploitants forestiers (débiteurs) sont évalués à 8 % et les commerçants à 8 %. Les autres activités (agriculture, orpaillage, mécanique moto, etc.) représentent 15 %. Les personnes qui n'exercent aucune activité secondaire représentent 15 % des enquêtés.

• Facteurs de dégradation

Les personnes enquêtées ont observé des changements dans la FCT ces 30 dernières années. Ils ont, en effet, relevé une réduction de la densité et de la diversité de la végétation à travers la réduction des espèces pourvoyeuses de produits forestiers non-ligneux (PFLN). La déforestation a été également citée comme un changement majeur, de même que l'accroissement du nombre et de la superficie de cultures pluviales et territoires agroforestiers. Les raisons principales et secondaires de la dégradation sont données dans les figures 6. La figure 6A montre que les feux de brousse (photo 5), la coupe du bois (photo 6) et l'activité agricole (photo 4) constituent les trois principales raisons de la dégradation de la forêt avec respectivement 43 %, 39 % et 34 %. Au niveau des raisons secondaires, il s'agit de la pauvreté (56 %), suivie de la croissance démographique (55,4 %) et de la proximité avec la forêt (54 %) (figure 6B).

L'analyse des données d'enquête montre que le niveau d'instruction (p -value = 0,007) et la distance avec la forêt (p -value = 0,006) ont une influence significative sur la perception en lien avec les facteurs directs de dégradation. Les plus instruits qui constituent la minorité sont conscients que la dégradation de la forêt est liée essentiellement aux feux de brousse incontrôlés, à la coupe anarchique du bois et à l'extension des cultures pluviales et territoires agroforestiers. Pour les raisons secondaires de dégradation, seule la distance est une variable déterminante (p -value = 0,009). En effet, les populations les plus proches de la FCT sont celles qui exploitent le plus la forêt à travers la coupe du bois et l'installation des cultures pluviales et territoires agroforestiers.

• Propositions de mode de gestion et de gouvernance par les enquêtés

Pour remédier à la dégradation de la forêt et préserver son potentiel pourvoyeur de services écosystémiques, les enquêtés ont proposé des actions à entreprendre et un mode de gouvernance à mettre en place (figures 7).

Les résultats font ressortir comme mesures de gestion proposées par les enquêtés, dans leur majorité, le besoin de limiter la coupe de bois et d'appliquer la mesure d'interdiction des cultures pluviales et territoires agroforestiers en forêt (figure 7A). En outre, comme mode de gouvernance, la majorité propose que l'État, en collaboration



Photo 5.

Feux de brousse dans la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.
Bush fires in the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.
Photo S. D. Dayamba.



Photo 6.

Coupe anarchique du bois dans la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.
Illegal logging in the the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.
Photo I. Konaté.

avec les populations riveraines, s'engage à faire respecter les modes de gestion (figure 7B). Dans l'ensemble, certaines mesures de gestion proposées sont déjà des dispositions du code forestier et cela sous-entend une méconnaissance de la réglementation forestière.

Tableau V.

Richesse spécifique, nombre d'individus et indice de Shannon (H) moyen par type d'occupation des terres. Pour la diversité (H), les unités d'occupation des terres avec des lettres différentes ont des moyennes significativement différentes ; le test de Kruskal-Wallis avec un risque de 5 % a été utilisé pour établir les différences statistiques entre les unités d'occupation des terres.

Average species richness, number of individuals and Shannon index (H) by land cover type. For diversity (H), land-use units with different letters have significantly different means; the Kruskal-Wallis test with a 5% risk was used to establish statistical differences between land-use units.

Type d'occupation	Richesse spécifique	Nombre d'individus	Shannon (H)
Cultures pluviales et territoires agroforestiers	24	82	1,31 ± 0,62a
Forêt galerie	17	475	0,63 ± 0,41a
Savane arborée	51	1 588	2,14 ± 0,31b
Savane arbustive	43	464	1,92 ± 0,43b

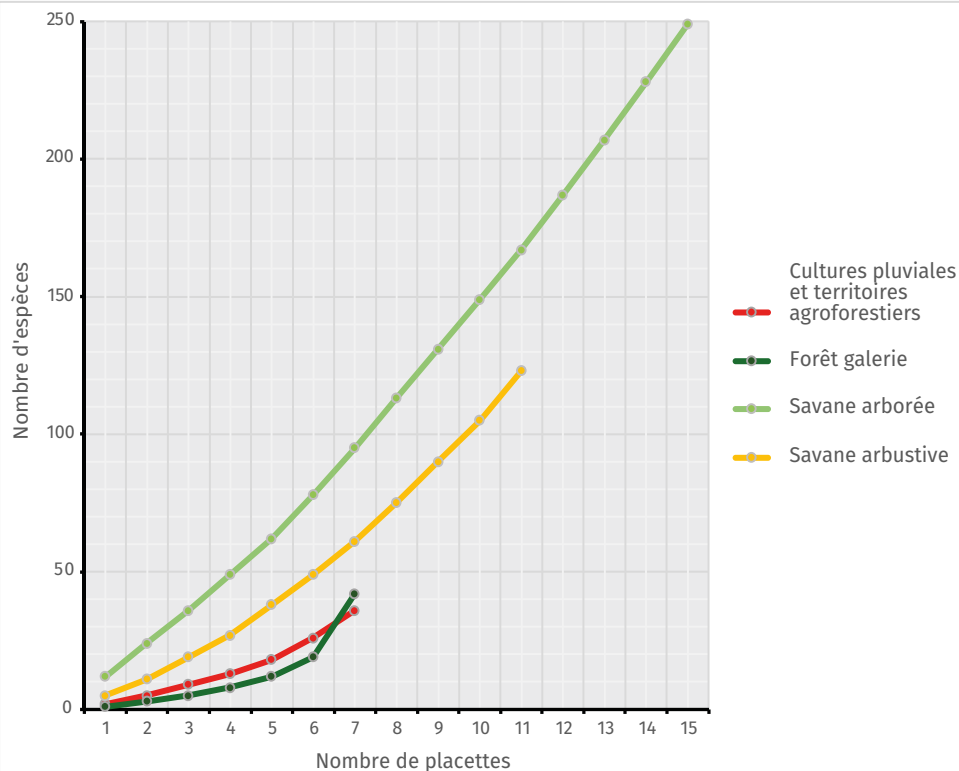


Figure 8.

Accumulation de la richesse spécifique en fonction du nombre de placettes par type d'occupation du sol dans la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso.

Accumulation of species richness as a function of the number of plots per land-use type in the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso.

Diversité floristique et stock de carbone aérien

Richesse et diversité de la végétation ligneuse

Les individus mesurés dans l'ensemble des unités d'occupation des terres comptaient 68 espèces ligneuses. Le plus grand nombre d'espèces a été recensé dans les savanes arborées (51 espèces dont 35 genres et 18 familles) et dans les savanes arbustives (43 espèces dont 30 genres et 13 familles). Les cultures pluviales et territoires agroforestiers et les forêts galeries avaient respectivement 24 espèces - dont 20 genres et 12 familles et 17 espèces - dont 15 genres et 12 familles.

L'analyse de la diversité (H) a montré une différence significative (p-value = 0,0001) entre les deux types de savane et les autres occupations des terres (forêt galerie et cultures pluviales et territoires agroforestiers). En effet, les diversités de la savane arborée ($2,14 \pm 0,31$) et de la savane arbustive ($1,92 \pm 0,43$) étaient plus importantes que celles des cultures pluviales et territoires agroforestiers ($1,31 \pm 0,62$) et de la forêt galerie ($0,63 \pm 0,41$) (tableau V).

Il a été montré que les pentes des courbes d'accumulation des espèces ont tendance à être plus fortes pour les deux types de savane que pour les cultures pluviales et territoires agroforestiers et la forêt galerie (figure 8). Aucune des 4 courbes ne converge vers une asymptote.

Stock de carbone aérien

La forêt galerie stocke $35,47 \pm 21,35$ tC/ha et constitue le plus important réservoir de carbone de la FCT en comparaison aux formations de savane et des zones cultivées. Les cultures pluviales et territoires agroforestiers ont le plus faible stock de carbone aérien (tableau VI). La savane arborée stocke $7,06 \pm 1,70$ tC/ha contre $2,48 \pm 0,6$ tC/ha au niveau de la savane arbustive.

Tenant compte du stock de carbone estimé à l'hectare dans chaque unité d'occupation des terres et du changement d'occupation des terres, la figure 9 montre les évolutions de stock de carbone dans les différentes unités de la forêt ainsi que le total (sur toute la superficie de

la forêt). Dans cette figure, on remarque que la courbe du carbone total a la même tendance que celles du stock de carbone aérien de la savane arborée et de la forêt galerie. En effet, ces courbes montrent une forte régression du stock de carbone aérien de 1990 à 1999, puis une légère augmentation en 2009 et une forte baisse entre 2009 et 2019. Au niveau de la savane arbustive, le stock de carbone aérien a augmenté de 1990 à 1999 puis n'a pratiquement pas évolué jusqu'en 2019. Concernant les cultures pluviales et territoires agroforestiers, le stock de carbone très faible de 1990 à 2009 a remarquablement augmenté entre 2009 et 2019. En 30 ans le stock de carbone aérien a considérablement baissé de façon générale, et particulièrement dans la savane arborée et dans la forêt galerie. Globalement, la FCT a perdu 41 % de carbone aérien entre 1990 et 2019 comme conséquence des changements des unités d'occupation des terres.

cultures, des jachères et des savanes arborées et arbustives entre 1995 et 2013. Cette tendance de dégradation a également été rapportée par Dimobe *et al.* (2017) dans le ranch de gibier de Nazinga entre 1984 et 2013, qui serait due aux actions anthropiques telles que la coupe du bois, les feux de brousse, les cultures pluviales et territoires agroforestiers et le surpâturage. Par ailleurs, au cours de nos enquêtes, 19 % des personnes ont déclaré disposer de champs (assimilés aux cultures pluviales et territoires agroforestiers) dans les limites de la forêt. Ces enquêtes ont également montré que 90 % des personnes interrogées ont recours au bois comme seule source d'énergie, lequel bois proviendrait de la FCT. Toutefois, comparé à la période 1990-1999, le rythme de progression des cultures pluviales et territoires agroforestiers et savane arbustive pour la période 1999-2009 a diminué, passant respectivement de 20 à 7 % et de 11 à 2 %. En outre, entre ces mêmes périodes,

Discussion

Dynamique de la couverture végétale

L'analyse de la dynamique spatiale sur la période de 1990 à 2019 a montré une régression des formations boisées, notamment les savanes arborées et la forêt galerie, et un accroissement des superficies des savanes arbustives et des cultures pluviales et territoires agroforestiers qui sont relativement pauvres en ligneux. Cela témoigne d'une déforestation et d'une dégradation de la FCT. Le même constat a été fait par d'autres auteurs au Burkina Faso (Soulama *et al.*, 2015 à la réserve partielle de faune de Pama et de ses périphéries de 2001 à 2013 ; Gansaonré *et al.*, 2020 à la périphérie du Parc national W, parc transfrontalier partagé entre le Bénin, le Burkina Faso et le Niger, de 1984 à 2015) et au Mali (Daou *et al.*, 2019 en zone soudano-sahélienne dans la commune rurale de Nyamina de 1985 à 2018). En outre, dans la zone soudanienne au Nord-est du Bénin, les travaux de Zakari *et al.* (2018) ont également montré une forte savanisation de la forêt classée des trois rivières qui se traduit par une déforestation et une dégradation des superficies des forêts galeries, des forêts denses sèches et des forêts claires et une extension des mosaïques de

Tableau VI.

Stock de carbone ligneux par unité d'occupation des terres.
Woody carbon stock per unit of land use.

	Unités d'occupation des terres				p-value
	Savane arborée	Savane arbustive	Forêt galerie	Cultures pluviales et territoires agroforestiers	
Carbone aérien ligneux (tC/ha)	7,06 ± 1,70	2,48 ± 0,60	35,47 ± 21,35	1,72 ± 0,68	< 0,001

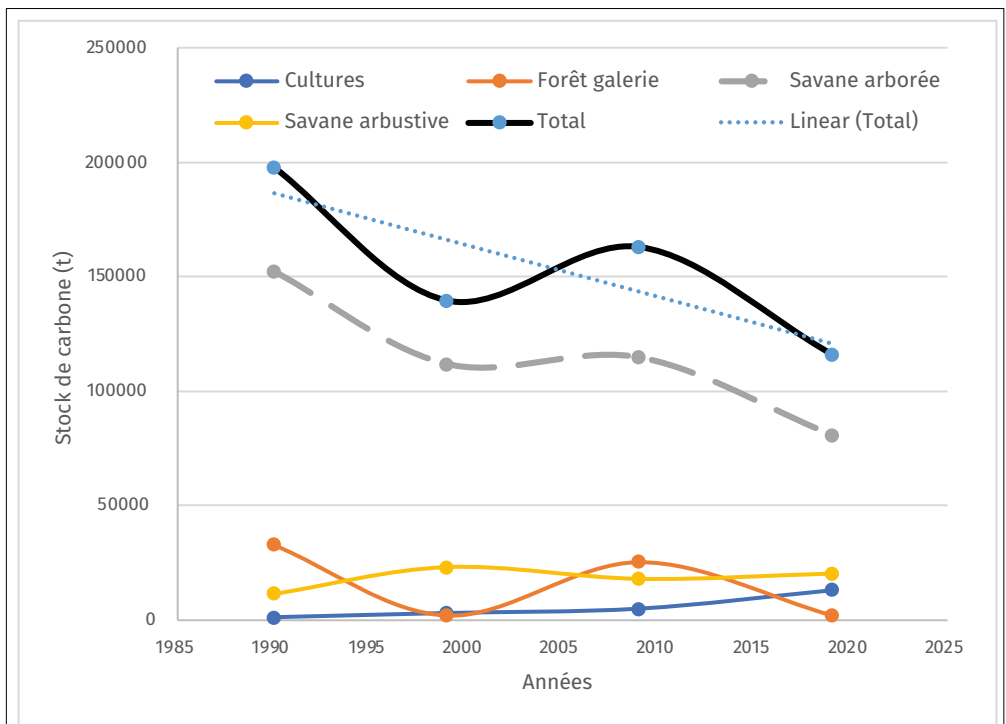


Figure 9.

Évolution du stock de carbone sur les superficies des unités de la Forêt Classée de Tiogo, Burkina Faso. C.P.T. A : cultures pluviales et territoires agroforestiers.

Evolution of carbon stock in the areas of the Tiogo classified forest units, Burkina Faso. C.P.T. A: rainfed crops and agroforestry areas.

la perte annuelle de l'aire de la savane arborée a baissé de 3 à 0,25 %. Ces résultats montrent qu'entre ces périodes, les zones boisées auraient subi moins de pressions anthropiques et cela serait dû aux interventions de structures techniques. En effet, l'INSTITUT de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) du Burkina Faso en collaboration avec l'Université Suédoise des Sciences Agricoles (SLU) et l'Agence Suédoise de Coopération Internationale pour le Développement (ASDI) avait financé plusieurs thèses doctorales (Savadogo, 2007 ; Zida, 2007 ; Traoré, 2008 ; Sawadogo, 2009 ; Dayamba, 2010) sur l'écologie de la végétation dans cette forêt qui était alors fréquentée en permanence pour la mise en place des essais et la collecte des données. Ceci du même coup constituait une surveillance et une protection pour la forêt. Mais après les années 2009, l'intensité des activités a diminué à cause de la fin des projets et la pression par les communautés riveraines s'était encore intensifiée, menant à un accroissement du rythme de progression des cultures pluviales et territoires agroforestiers et savanes arbustive sur la période 2009-2019. Un constat similaire a été fait par Gansaonré *et al.* (2020) dans la zone périphérique du Parc W qui avaient trouvé une augmentation des superficies de la savane boisée et arborée au détriment de la savane arbustive entre 1999 et 2015. Selon ces auteurs, cela pourrait s'expliquer par l'intervention des projets de préservation, des acteurs communaux et des structures techniques de l'État qui avaient mis en œuvre des actions d'aménagement.

Les feux de brousse, la pratique de l'activité agricole, la coupe du bois constituent les trois principaux facteurs de la déforestation et de la dégradation de la FCT selon les enquêtes. Ces résultats corroborent ceux d'autres auteurs (Dimobe *et al.*, 2017 ; Zakari *et al.*, 2018 ; Brun *et al.*, 2020) qui ont constaté que l'agriculture et l'exploitation forestière sont les principales causes de régression du couvert végétal dans des écosystèmes similaires au nôtre. Le feu est considéré comme le premier facteur de dégradation par nos enquêtés du fait de son impact très dévastateur sur le couvert végétal. Les enquêtés estiment qu'à l'issue des opérations de défriche et d'installation de cultures pluviales et territoires agroforestiers, l'exploitation agricole peut se faire dans les mêmes limites pendant plusieurs années (sans s'étendre), contrairement aux feux qui se propagent rapidement et chaque année, pouvant brûler sur de nouvelles superficies. Concernant la coupe du bois, les insuffisances dans le fonctionnement du Chantier d'aménagement forestier (CAF) sont responsables de la coupe anarchique de bois (surtout le bois vert) dans la forêt. L'insuffisance dans la surveillance du massif forestier par le personnel forestier a renforcé cet état de fait. Il ressort de nos enquêtes et de nos observations sur le terrain qu'entre 120 et 160 m³ de bois transportés dans des tricycles sortent de la forêt au quotidien. Le phénomène de la coupe du bois s'est accentué de 2009 à nos jours, avec notamment le bitumage de la route avoisinant la FCT (route Koudougou-Dédougou) en 2012 rendant plus facile l'acheminement du bois vers les grands centres urbains.

L'analyse des résultats d'enquêtes montre aussi que la proximité à la forêt est un facteur indirect significatif

pour la dégradation de la forêt. D'autres facteurs comme la pauvreté et la croissance démographique ont aussi été rapportés. Ces résultats sont similaires aux travaux de Kambire *et al.* (2015) au Burkina Faso, d'Ahononga *et al.* (2020) et de Brun *et al.* (2020) au Bénin. Les mêmes observations ont été faites par Jiagho *et al.* (2021) indiquant que les facteurs secondaires de la dégradation du Parc National de Waza et sa périphérie au Cameroun sont liés à la croissance démographique et aux facteurs économiques. La combinaison des facteurs « pauvreté et croissance démographique » conduit à une surexploitation des ressources naturelles forestières par les communautés riveraines pour des besoins de subsistance. Cette situation est beaucoup plus perceptible dans les communautés installées à proximité de la FCT qui y pratiquent la coupe du bois, les activités de production agricole et le pâturage. C'est le cas au niveau des villages de Ziliwélé, Négarpoulou et Essapoun. Les causes secondaires de la dégradation des ressources forestières identifiées dans cette étude permettent de dire qu'en intensifiant la sensibilisation et en créant les conditions pour que les communautés aient accès à des moyens de subsistance alternatifs, on pourrait contribuer substantiellement à la préservation de la forêt.

Diversité floristique de la végétation

Nous avons trouvé que la diversité floristique (H') des deux types de savane était plus importante que celles de la forêt galerie et des cultures pluviales et territoires agroforestiers. Nos valeurs moyennes obtenues (2,14 et 1,92) pour la savane arborée et la savane arbustive sont similaires à celles trouvées par Tiendrébeogo *et al.* (2022) dans la Forêt Classée de Péni au Sud-ouest du Burkina Faso sur ces 2 unités d'occupation des terres (2,06 et 1,94). La faible diversité floristique dans la forêt galerie serait liée aux conditions édaphiques (humides et argileuses) qui la rendent appropriée à seulement quelques espèces comme *Mitragyna inermis* (Willd.) K.Schum. Ces conditions sont, en effet, asphyxiantes et très sélectives pour l'implantation et l'épanouissement de plusieurs espèces (Ouedraogo *et al.*, 2008). Dans les cultures pluviales et territoires agroforestiers, la diversité ligneuse est relativement faible et on observe une dominance des arbres dits utilitaires, notamment les pourvoyeurs de produits forestiers non-ligneux (PFLN) comme *Vitellaria paradoxa* C.F.Gaertn., *Parkia biglobosa* (Jacq.) R.Br. ex G.Don et *Lannea microcarpa* Engl. & K.Krause. Comme l'ont relevé Soulama *et al.* (2015), malgré la préservation des arbres utiles dans les cultures pluviales et territoires agroforestiers, la destruction totale des autres arbres afin de limiter l'effet de l'ombre et la compétition entre les cultures et les ligneux ne favorise pas la reconstitution de la végétation originelle.

Cependant, comme aucune courbe d'accumulation de la richesse des espèces ne converge vers un plateau, cette étude révèle que l'échantillonnage prévu n'a pas été suffisant pour estimer correctement la richesse floristique au sein de chaque unité d'occupation des terres. De plus, comme l'effort d'échantillonnage a été moindre pour la forêt galerie et les cultures pluviales et territoires

agroforestiers, cela suggère que nous avons certainement sous-estimé leur diversité. Par conséquent, des échantillonnages additionnels, voire l'analyse de parcelles de dimensions accrues, seraient nécessaires pour mieux estimer la biodiversité de chaque unité.

Stock de carbone aérien

L'analyse du stock de carbone aérien montre que la forêt galerie enregistre les valeurs les plus élevées par rapport aux autres unités d'occupation des terres. Cela pourrait se justifier par la dominance des sujets de gros diamètres sur cette unité par rapport aux autres unités d'occupation de terres de la forêt classée. En effet, 53 % des ligneux dans cette formation ont un DBH \geq 10 cm contre 12,6 % pour ceux dont le DBH \geq 40 cm, alors que pour la savane arborée par exemple, ces pourcentages sont respectivement de 30 % et de 0,4 %. Ces résultats corroborent les travaux de Qasim *et al.* (2016) et de Monssou *et al.* (2016). Par ailleurs, la densité ligneuse qui est fonction du type d'unité d'occupation des terres détermine aussi le potentiel de stock de carbone aérien, comme indiqué par les travaux conduits dans les provinces du Ziro et des Balé au Burkina Faso par Dayamba *et al.* (2016). En effet, la valeur du stock de carbone aérien plus importante dans la forêt galerie serait aussi liée à sa densité arborée plus élevée (271 tiges/ha) par rapport aux autres unités d'occupation des terres.

L'étude a aussi révélé une perte de stock de carbone de 41 % entre 1990 et 2019 comme conséquence des changements d'unités d'occupation des terres dans la FCT. Ceci traduit toute l'urgence d'actions concrètes qui fourniraient aux communautés riveraines des moyens alternatifs de subsistance pour préserver les ressources forestières.

Conclusion

Cette étude, conduite en zone de savane soudanienne en Afrique de l'Ouest, a évalué la dynamique de la couverture végétale de la forêt classée de Tiogo sur une période de 30 ans, les moteurs des changements et les implications pour la diversité ligneuse et le stock de carbone aérien de la strate ligneuse de la Forêt Classée de Tiogo. Les résultats ont montré que sur une superficie de savane arborée de 21 593 ha en 1990, 5089 ha se sont transformés en cultures pluviales et territoires agroforestiers et 5 266 ha en savane arbustive en 2019 ; soit une perte de 47 % de savane arborée au profit d'unités moins boisées. Les feux de brousse, la coupe du bois et l'activité agricole constituent les facteurs directs de cette dégradation, tandis que la pauvreté, la croissance démographique et la proximité des populations avec la forêt sont les causes secondaires. Concernant le stock de carbone aérien, la forêt galerie et la savane arborée présentent les plus importants réservoirs de carbone comparativement à la savane arbustive et aux cultures pluviales et territoires agroforestiers. Les changements

des unités d'occupation des terres dans la FCT marqués par 47 % de perte du couvert de la savane arborée, couplés au potentiel de séquestration de carbone de chaque unité d'occupation des terres, ont induit pour la FCT une perte de 81 901 tonnes de carbone entre 1990 et 2019, soit une réduction de 41 % du potentiel de la forêt. Ces résultats confirment nos hypothèses qui stipulent que le statut classé de cette forêt n'a pas suffi à la protéger des actions anthropiques et que les mêmes tendances de dégradation de végétation dans les zones non protégées ou classées y avaient cours, avec des implications de perte substantielle de carbone. Pour préserver la FCT, l'étude recommande (1) d'intensifier les sensibilisations à l'endroit des populations, (2) de trouver les voies et moyens pour promouvoir des moyens de subsistance alternatifs pour les riverains, (3) de promouvoir des sources alternatives d'énergie pour les ménages ruraux et urbains et (4) de prendre en compte les propositions faites par les communautés environnantes de la FCT pour permettre de faire assoir un mode de gouvernance qui préserve au mieux la forêt.

Remerciement

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur « la quantification du stock de carbone, le calibrage des modèles de quantification de carbone séquestré et le suivi de la dynamique du stock de carbone en zone de savane au Burkina Faso », financé par le CILSS à travers le projet régional « GCCA+ Afrique de l'Ouest » (<https://www.gcca.eu/>) et mis en œuvre au sein de l'Institut de l'Environnement et de Recherche Agricoles (INERA). Que ces institutions trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Déclaration de divulgation

Les auteurs déclarent qu'il n'y a aucun conflit d'intérêt.

Source de financement

Cette étude se déroule dans le cadre d'un projet intitulé « Quantification du stock de carbone, calibrage des modèles de quantification de carbone séquestré et suivi de la dynamique du stock de carbone en zone de savane au Burkina Faso », financé par le CILSS à travers le projet régional «GCCA+ Afrique de l'Ouest» (<https://www.gcca.eu/>), et mis en œuvre au sein de l'Institut de l'Environnement et de Recherche Agricoles (INERA).

Accès aux données de cette étude

Les données ayant servi à la rédaction de ce manuscrit peuvent être accédées sur requête auprès de l'auteur principal (Ibrahim KONATÉ, email : ikonate06@gmail.com) à condition de fournir des détails sur la façon dont elles seront utilisées et en citant la source telle que : Konaté I., 2024. Dynamics of land occupation and use in the Tiogo Classified Forest in Burkina Faso: characterisation, drivers and impacts on diversity and wood stock [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1374987>

Annexe 1.

Effectif de la population par village et échantillonnage. Source : RGPH, 2006 et données terrain.
Population by village and sample. Source: RGPH, 2006 and field data.

Commune	Village	Effectif de la population en 2006 (RGPH)	Taille de l'échantillon (n)
TENADO	Tialgo	6 890	34
	Tiogo	3 083	30
	Tiogo-Mouhoun	338	15
	Tio	2 752	27
	Ténado-Centre	3 432	30
KYON	Essapoum	2 436	26
	Kyon	9 806	36
	Négarpoulo	2 094	25
	Po	1 984	20
	Poa	2 190	25
	Ziliwélé	1 880	18
ZAMO	Bwo	835	17
Total	12	37 720	303

Annexe 2.

Groupe d'âge des enquêtés. Source : données d'enquête, 2021.
Age group of respondents. Source: survey data, 2021.

Groupe d'âge (ans)		
Âge (ans)	Effectif	Proportion (%)
[30-34[	37	12,2
[34-39[	48	15,8
[39-44[	43	14,2
[44-49[	50	16,5
[49-54[	44	14,5
[54-59[	38	12,5
[60 et plus	43	14,2
Total	303	100

Annexe 3.

Matrice de transition des unités d'occupation des terres entre 1990 et 1999. Les valeurs du tableau représentent des superficies (unité : ha). Les valeurs en gras dans les cellules de la diagonale indiquent la stabilité de superficie des unités entre 1990 et 1999.
Transition matrix of land use units between 1990 and 1999. The values in the table represent areas (unit: ha). The bold values in the diagonal cells indicate the stability of the area of the units between 1990 and 1999.

Type d'occupation des terres en 1990	Type d'occupation des terres en 1999						Superficie totale (ha) en 1990
	Cultures pluviales et territoires agroforestiers	Forêt galerie	Savane arborée	Savane arbustive	Sols nus	Surface en eau	
Cultures pluviales et territoires agroforestiers	283	7	225	97	3	1	617
Forêt galerie	36	139	86	43	230	393	928
Savane arborée	913	257	14 634	5 170	426	194	21 593
Savane arbustive	235	11	602	3 767	33	3	4 652
Sols nus	247	29	279	182	921	102	1 761
Surface en eau	1	7	10	10	83	201	311
Superficie totale (ha) en 1999	1 715	450	15 837	9 268	1 696	894	29 862

Annexe 4.

Matrice de transition des unités d'occupation des terres entre 1999 et 2009. Les valeurs du tableau représentent des superficies (unité : ha). Les valeurs en gras dans les cellules de la diagonale indiquent la stabilité de la superficie des unités entre 1999 et 2009.

Transition matrix of land use units between 1999 and 2009. The values in the table represent areas (unit: ha). The bold values in the diagonal cells indicate the stability of the area of the units between 1999 and 2009.

Type d'occupation des terres en 1999	Type d'occupation des terres en 2009						
	Cultures pluviales et territoires agroforestiers	Forêt galerie	Savane arborée	Savane arbustive	Sols nus	Surface en eau	Superficie totale (ha) en 1999
Cultures pluviales et territoires agroforestiers	658	7	607	309	123	12	1 715
Forêt galerie	118	176	81	0	41	34	450
Savane arborée	1 173	199	12 577	1 425	431	31	15 837
Savane arbustive	757	42	2 792	5 476	200	2	9 268
Sols nus	141	128	182	32	1 157	57	1 696
Surface en eau	11	162	11	7	119	584	894
Superficie totale (ha) en 2009	2 858	714	16 250	7 250	2 070	720	29 862

Annexe 5.

Matrice de transition des unités d'occupation des terres entre 2009 et 2019. Les valeurs du tableau représentent des superficies (unité : ha). Les valeurs en gras dans les cellules de la diagonale indiquent la stabilité de superficie des unités entre 2009 et 2019.

Transition matrix of land use units between 2009 and 2019. The values in the table represent areas (unit: ha). The bold values in the diagonal cells indicate the stability of the area of the units between 2009 and 2019.

Type d'occupation des terres en 2009	Type d'occupation des terres en 2019						
	Cultures pluviales et territoires agroforestiers	Forêt galerie	Savane arborée	Savane arbustive	Sols nus	Surface en eau	Superficie totale (ha) en 2009
Cultures pluviales et territoires agroforestiers	2 121	3	459	218	55	1	2 858
Forêt galerie	125	244	211	9	108	18	714
Savane arborée	3 083	38	8 995	3 876	214	44	16 250
Savane arbustive	1 822	1	1 519	3 849	57	1	7 250
Sols nus	421	18	245	204	1 160	23	2 070
Surface en eau	62	168	19	2	91	378	720
Superficie totale (ha) en 2019	7 635	472	11 448	8 158	1 685	464	29 862

Annexe 6.

Matrice de confusion des images classifiées de la Forêt classée de Tiogo en 1990.

Confusion matrix for classified images of the Tiogo Forest Reserve in 1990.

	Se	CPTA	FG	Sn	Sa	SA	Total	EC
Se	41	1	0	0	40	41	123	0,67
CPTA	0	330	0	6	3	0	339	0,03
FG	0	0	108	0	100	124	332	0,67
Sn	0	0	0	102	7	0	109	0,06
Sa	0	30	0	0	461	97	588	0,22
SA	0	0	12	0	0	910	922	0,01
Total	41	361	120	108	611	1 172	2 413	
EO	0	0,09	0,1	0,06	0,25	0,22		

Se : surface en eau ; CPTA : cultures pluviales et territoires agroforestiers ; FG : forêt galerie ; Sn : sols nus ; Sa : savane arbustive ; SA : savane arborée ; EC : erreur de commission ; EO : erreur d'omission.

Annexe 7.

Matrice de confusion des images classifiées de la Forêt classée de Tiogo en 1999.

Confusion matrix for classified images of the Tiogo Forest Reserve in 1999.

	Se	CPTA	FG	Sn	Sa	SA	Total	EC
Se	347	0	0	0	0	0	347	0
CPTA	0	377	2	0	0	0	379	0,005
FG	0	1	63	0	0	58	122	0,484
Sn	0	0	0	207	0	0	207	0
Sa	0	0	0	0	611	0	611	0
SA	0	0	13	0	0	1 005	1 018	0,013
Total	347	378	78	207	611	1 063	2 684	
EO	0	0,002	0,192	0	0	0,054		

Se : surface en eau ; CPTA : cultures pluviales et territoires agroforestiers ; FG : forêt galerie ; Sn : sols nus ; Sa : savane arbustive ; SA : savane arborée ; EC : erreur de commission ; EO : erreur d'omission.

Annexe 8.

Matrice de confusion des images classifiées de la Forêt classée de Tiogo en 2009.

Confusion matrix for classified images of the Tiogo Forest Reserve in 2009.

	Se	CPTA	FG	Sn	Sa	SA	Total	EC
Se	245	0	0	0	0	0	245	0
CPTA	0	346	0	0	0	0	346	0
FG	0	0	197	0	0	1	198	0,005
Sn	0	0	0	159	0	0	159	0
Sa	0	0	0	0	259	0	259	0
SA	0	0	4	0	0	138	142	0,028
Total	245	346	201	159	259	139	1 349	
EO	0	0	0,02	0	0	0,01		

Se : surface en eau ; CPTA : cultures pluviales et territoires agroforestiers ; FG : forêt galerie ; Sn : sols nus ; Sa : savane arbustive ; SA : savane arborée ; EC : erreur de commission ; EO : erreur d'omission.

Annexe 9.

Matrice de confusion des images classifiées de la Forêt classée de Tiogo, Burkina Faso, en 2019.

Confusion matrix for classified images of the Tiogo Forest Reserve, Burkina Faso, in 2019.

	Se	CPTA	FG	Sn	Sa	SA	Total	EC
Se	292	0	0	0	0	0	292	0
CPTA	0	260	0	0	12	0	272	0,044
FG	0	0	247	0	0	13	260	0,050
Sn	0	0	0	132	0	0	132	0
Sa	0	0	0	0	725	0	725	0
SA	0	0	14	0	3	436	453	0,038
Total	292	260	261	132	740	449	2 134	
EO	0	0	0,054	0	0,02	0,03		

Se : surface en eau ; CPTA : cultures pluviales et territoires agroforestiers ; FG : forêt galerie ; Sn : sols nus ; Sa : savane arbustive ; SA : savane arborée ; EC : erreur de commission ; EO : erreur d'omission.

Références

Ahononga F. C., Gouwakinou N. G., Sorotori H. S. S., Biau H., Biau S., 2020. Facteurs socio-économiques expliquant la déforestation et la dégradation des écosystèmes dans les domaines soudanien et soudano-guinéen du Bénin. *Annales de l'Université de Parakou, Série Sciences Naturelles Agronomiques*, 10 (No.2) : 43-60. <https://doi.org/10.56109/au-p-sna.v10i2.36>

Akoguhi P.N., Dibi H. N., Godo M. H., Adja G. M., Kouamé F. K., 2022. Évaluation des méthodes de classifications dirigées (spectrale et orientée objet) sur les images satellitaires à THRS. Cas de

la cartographie du tissu urbain de la commune de Cocody et d'Attécoubé (Abidjan, Côte d'Ivoire). *Vertigo*, 22 (3). <https://doi.org/10.4000/vertigo.36548>

Belem M., Zoungrana M., Nabaloum M., 2018. Les effets combinés du climat et des pressions anthropiques sur la forêt classée de Toéssin, Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12 (5): 2186-2201. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i5.20>

Bernier B., 1992. Introduction à la Macroéconomie. Dunod, 217 p.
Brun E. L., Sinasson G., Azihou A. F., Gibigaye M., Tente H. A. B., 2020. Perceptions des facteurs déterminants de dégradation de la flore des zones humides dans la commune d'Allada, Sud-Bénin. *Afrique Science*, 16 (4) : 5267.

- Chave J., Réjou-Mêchain M., Búrquez A., Chidumayo E., Colgan M. S., Delitti W. B. C., et al., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20 (10): 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chekchek A., Fennouh Z., 2019. Détection et extraction des surfaces d'eau à partir des données spatiales. Cas du Bassin Versant Côtier, Constantinois Ouest. Mémoire de Master en Géologie, Université de Jijel, Algérie, 91 p. <https://theses-algerie.com/8819082137331296/memoire-de-master/universite-mohammed-seddik-ben-yahia---jijel/d%C3%A9tection-et-extraction-des-surfaces-d-eau-a-partir-des-donn%C3%A9es-spatiales-cas-du-bassin-versant-c%C3%B4tier-constantinois-ouest>
- Congalton R. G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37 (1): 35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Daou I., Coulibaly A., Sidibé A., Sangaré H., Keita I., Bolozogola Y., et al., 2019. Suivi de la dynamique environnementale de 1985 à 2018 en zone soudano-sahélienne par télédétection : cas de la commune rurale de NYAMINA. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 34 : 13-24. <https://www.researchgate.net/publication/338549306>
- Dayamba S. D., 2010. Fire, Plant-derived Smoke and Grazing Effects on Regeneration, Productivity and Diversity of the Sudanian Savanna-woodland Ecosystem. Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, 73 p. https://pub.epsilon.slu.se/2365/1/Dayamba_S_D_101011.pdf
- Dayamba S. D., Djoudi H., Zida M., Sawadogo L., Verchot L., 2016. Biodiversity and carbon stocks in different land use types in the Sudanian Zone of Burkina Faso, West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216: 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.023>
- Dimobe K., Goetz D., Ouédraogo A., Forkuor G., Wala K., Porembski S., et al., 2017. Spatio-temporal dynamics in land use and habitat fragmentation within a protected area dedicated to tourism in a Sudanian savanna of West Africa. *Journal of Landscape Ecology*, 10: 75-95. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0011>
- DRAAH (Direction Régionale de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles)/Centre-ouest du Burkina Faso, FAO, 2020. Global Forest Resources Assessment 2020 : Main report. FAO, 164 p.
- Ezzine I., Zargouni F., Ghanmi M., 2012. Analyse linéaire des images Landsat-TM et Spot de l'Atlas Centro-septentrional : cartographie du prolongement SW de la cicatrice de Zaghwan. *Télédétection*, 10 (4) : 199-211. <https://hal.science/hal-01948894/document>
- FAO, 2021. COP26 – L'expansion agricole est responsable de près de 90 pour cent de la déforestation dans le monde. FAO. <https://www.fao.org/newsroom/detail/cop26-agricultural-expansion-drives-almost-90-percent-of-global-deforestation/fr>
- FAO, 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. FAO, 164 p. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- FAO, 2016. Directives mondiales pour la restauration des forêts et des paysages dégradés dans les terres arides : renforcer la résilience et améliorer les moyens d'existence. FAO, 190 p. <https://openknowledge.fao.org/items/2dee697f-31ff-4706-ae1f-62433855422e>
- Fontès J., Guinko S., 1995. Carte de végétation et de l'occupation d'un sol du Burkina Faso : notice explicative. Université de Ouagadougou. Ministère de la coopération française, Projet Campus, 67 : 881-3101.
- Foody G. M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80 (1): 185-201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
- Ganamé M., 2021. Dynamique spatio-temporelle et potentiel du stock de carbone aérien des écosystèmes forestiers du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso, 167 p. <https://123dok.net/document/zx54nplw-dynamique-temporelle-potentiel-carbone-a%C3%A9rien-%C3%A9cosyst%C3%A8mes-forestiers-burkina.html>
- Gansaonré R. N., Benewindé. Zoungrana J.-B., Yanogo P. I., 2020. Dynamique du couvert végétal et implications socio-environnementales à la périphérie du parc W au Burkina Faso. *Vertigo*, 18 (1). <https://doi.org/10.4000/vertigo.20249>
- GIEC, 2003. Recommandations du GIEC en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie. IGES, Kanagawa, Japon, 25 p.
- INSD, 2017. Projections démographiques des communes du Burkina Faso de 2007 à 2020. Ouagadougou, Burkina Faso, INSD, 11-13. <http://www.insd.bf>
- Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD), 2022. 5^e RGPH, Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation du Burkina Faso. Synthèse des résultats définitifs. INSD, 186 p. <http://www.insd.bf>
- Jiagho E. R., Kabelong Banoho L.-P.-R., Feumba R. A., 2021. Diversité de la flore ligneuse à l'intérieur du Parc National de Waza (Cameroun). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15 (3): 1158-1175. <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v15i3.23>
- Kambire H. W., Djenontin I. N. S., Kaboré A., Djoudi H., Balinga M. P. B., Zida M., et al., 2015. La REDD+ et l'adaptation aux changements climatiques au Burkina Faso : causes, agents et institutions. Document Occasionnel 123. CIFOR, 112 p. https://www.cifor.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-123.pdf
- Kpedenou K. D., Boukpessi T., Tchamie K. T. T., 2016. Quantification des changements de l'occupation du sol dans la préfecture de Yoto (Sud-Est Togo) à l'aide de l'imagerie satellitaire Landsat. *Revue des Sciences de l'Environnement, Université de Lomé, Togo*, 13: 137-156. <https://hal.science/hal-01409418/document>
- Kristensen M., Balslev H., 2003. Perceptions, use and availability of woody plants among the Gourounsi in Burkina Faso. *Biodiversity and Conservation*, 12 (8): 1715-1739. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1023614816878>
- Kumar P., Dobriyal M., Kale A., Pandey A. K., Tomar R. S., Thounaojam E., 2022. Calculating forest species diversity with information-theory based indices using sentinel-2A sensor's of Mahavir Swami Wildlife Sanctuary. *PLoS ONE* 17 (5): 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268018>
- Ky-Dembele C., Dayamba S. D., Savadogo P., Kalinganire A., Bayala J., Muchugi A., et al., 2019. Land use dictates diversity, density and regeneration of woody species in southwestern Mali, West Africa. *Tropical Ecology*, 60 (2): 114-122. <https://doi.org/10.1007/s42965-019-00015-2>
- Long H., Tang G., Li X., Heilig G. K., 2007. Socio-economic driving forces of land-use change in Kunshan, the Yangtze River Delta economic area of China. *Journal of Environmental Management*, 83 (3) : 351-364. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.003>
- MEEVCC (Ministère de l'Environnement, de l'Économie Verte et du Changement Climatique), 2020. Contrôle de qualité et validation des cartes de couvert végétal produites par l'Institut Géographique du Burkina Faso (IGB). MEEVCC, 24 p.

Monssou E. O., Vroh B. T. A., Goné B. Z. B., Adou Y. C. Y., N'Guessan K. E., 2016. Évaluation de la diversité et estimation de la biomasse aérienne des arbres du Jardin Botanique de Bingerville (District d'Abidjan, Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 12 (6) : 168-184. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n6p168>

Ouattara B., Sanou L., Koala J., Hien M., 2022. Perceptions locales de la dégradation des ressources naturelles du corridor forestier de la Boucle du Mouhoun au Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques*, 352 : 43-60. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/36935>

Ouédraogo O., Thiombiano A., Hahn-Hadjali K., Guinko S., 2008. Diversité et structure des groupements ligneux du parc national d'Arly (Est du Burkina Faso). *Flora et Vegetatio Sudano-Sambesica*, 11 : 5-15. <https://d-nb.info/1097210448/34>

Qasim M., Poremski S., Sattler D., Stein K., Thiombiano A., Lindner A., 2016. Vegetation Structure and Carbon Stocks of Two Protected Areas Within the South-Sudanian Savannas of Burkina Faso, West Africa. *Environments*, 3 (25) : 1-30. <https://www.mdpi.com/2076-3298/3/4/25>

Sambiéni K. R., Toyie M. S., Mama A., 2015. Perception paysanne sur la fragmentation du paysage de la Forêt classée de l'Ouémé Supérieur au nord du Bénin. <https://doi.org/10.4000/vertigo.16477>

Savadogo P., 2007. Dynamics of Sudanian Savanna-Woodland Ecosystem in Response to Disturbances. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, 152 p. <https://beep.ird.fr/collect/upb/index/assoc/SLU-2007-SAW-DYN/SLU-2007-SAW-DYN.pdf>

Sawadogo L., 2009. Influence de facteurs anthropiques sur la dynamique de la végétation des forêts classées de Laba et Tiogo en zone soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 142 p.

Schwartz D., 1995. Méthode statistique théorique et appliquée, Tome 2 D., 659 p.

Soulama S., Kadeba A., Nacoulma B., Traore S., Bachmann Y., Thiombiano A., 2015. Impact des activités anthropiques sur la dynamique de la végétation de la réserve partielle de faune de Pama et de ses périphéries (sud-est du Burkina Faso) dans un contexte de variabilité climatique. *Journal of Applied Biosciences*, 87 (1): 8047. <https://doi.org/10.4314/jab.v87i1.6>

Sylla M. B., Dell'Aquila A., Ruti P. M., Giorgi F., 2010. Simulation of the intraseasonal and the interannual variability of rainfall over West Africa with RegCM3 during the monsoon period. *International Journal of Climatology*, 30 (12), 1865-1883. <https://rmetsonline.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.2029>

Tankoano B., Sanon Z., Hien M., Dibi N. H., Yameogo J. T., Somda I., 2016. Pression anthropique et dynamique végétale dans la Forêt Classée de Tiogo au Burkina Faso: Apport de la Télédétection. *Tropicultura*, 34 (2): 193-207. <http://www.tropicultura.org/text/v34n2/193.pdf>

Tiendrebeogo N. R., Ouoba P., Bastide B., Nacoulma M. Y. B., Ouoba Y. H., Djuiguemde F., et al., 2022. Influence des attributs forestiers sur le stock de carbone des unités de végétation sud-soudanienne au Burkina Faso, Afrique de l'Ouest. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 38 (2) : 271-285. <https://ijas.issr-journals.org/abstract.php?article=IJIAS-22-258-01>

Tilahun A., Islam Z., 2015. Google Earth for Land Use Land Cover Change detection in the case of Gish Abbay Sekela, West Gojjam, Amhara State, Ethiopia. *International Journal of Advancement in Remote Sensing*, 3 (2): 80-87. <https://www.researchgate.net/publication/317402059>

Tindano E., Poremski S., Koehler J., Thiombiano A., 2021. Ecological and floristic characterization of inselberg habitats in Burkina Faso. Caractérisation écologique et floristique des habitats

des inselbergs du Burkina Faso. *Geo-Eco-Trop.*, 45 (4) : 573-588. https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_454_05.pdf

Traoré S., 2008. Impact des termitières épigées sur la régénération et la dynamique des écosystèmes de savanes : cas de la forêt classée de Tiogo, Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 193 p. <https://beep.ird.fr/collect/upb/index/assoc/SVT-2008-TRA-IMP/SVT-2008-TRA-IMP.pdf>

Yelkouni M., 2004. Gestion d'une ressource naturelle et action collective : le cas de la forêt de Tiogo au Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université d'Auvergne-Clermont-Ferrand I, France, 204 p. <https://theses.hal.science/tel-00660993/document>

Zakari S., Imorou I. T., Thomas O. A. B., Djaouga M., Arouna O., 2018. Application de la Télédétection et du SIG au suivi des formations végétales de la Forêt Classée des Trois Rivières au Nord-Est du Bénin. *European Scientific Journal*, ESJ, 14 (15) : 450. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n15p450>

Zida D., 2007. Impact of forest management regimes on ligneous regeneration in the Sudanian savanna of Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Swedish University of Agricultural Sciences, 44 p. https://www.researchgate.net/publication/30072943_Impact_of_Forest_Management_Regimes_on_Ligneous_Regeneration_in_the_Sudanian_Savanna_of_Burkina_Faso

Konaté et al. – Déclaration de contribution au crédit d'auteur

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	I. Konaté, D. Ilboudo
Gestion des données	D. Ilboudo, S. D. Dayamba
Analyse formelle	I. Konaté, D. Ilboudo
Acquisition du financement	L. Sawadogo, S. D. Dayamba
Enquête et investigation	D. Ilboudo, S. Traoré
Méthodologie	I. Konaté, D. Ilboudo
Gestion de projet	L. Sawadogo, M. Hien
Ressources	L. Sawadogo, M. Hien
Logiciels	I. Konaté, D. Ilboudo
Supervision	L. Sawadogo
Validation	S. D. Dayamba, S. Traoré
Visualisation	I. Konaté, S. D. Dayamba
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	S. D. Dayamba, I. Konaté
Écriture – Révision et édition	I. Konaté, S. Traoré, S. D. Dayamba

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X