

EMPIÈTEMENT AGRICOLE DANS LA FORÊT CLASSÉE DE NAFADJI AU MALI : DÉTERMINANTS ET IMPACTS SUR LES ESPÈCES VÉGÉTALES LIGNEUSES

A. F. AZIHOU*, M. HAIDARA** & B. A. SINSIN*

* *Laboratoire d'Ecologie Appliquée, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 526 Cotonou, République du Bénin – email : fazihou@gmail.com*

** *Direction Nationale des Eaux et Forêts, BP 275 Bamako, Mali*

RÉSUMÉ

La conversion des écosystèmes naturels en exploitations agricoles est une menace majeure sur la diversité biologique au plan mondial. Cette étude vise à évaluer les impacts de la déforestation sur la diversité et la démographie des espèces ligneuses dans la Forêt Classée de Nafadji. Les données de terrain ont été collectées à travers une enquête socio-économique dans 55 exploitations agricoles, un inventaire forestier dans 74 placeaux de 1 ha installés dans les champs et les savanes de la Forêt Classée de Nafadji. Une régression multiple avec sélection des variables pas à pas a été utilisée pour identifier les facteurs déterminants l'accroissement annuel des superficies emblavées. Les indices de diversité intracommunautaire, les paramètres dendrométriques ainsi que la stabilité de la démographie des espèces ligneuses ont été comparés entre les champs et les savanes. Les exploitations agricoles existantes ont un accroissement moyen de superficie de 0,18 ha/an. La diversification des productions agricoles est le facteur déterminant l'extension des fronts agricoles. Les résultats mettent également en exergue les impacts de l'installation des champs sur les paramètres dendrométriques notamment la densité des adultes, la densité de régénération et la hauteur moyenne qui sont plus faibles dans les champs. La restauration participative des zones dégradées et leur reconversion en espaces économiquement rentables sont envisageables pour assurer un financement durable de l'aménagement et de la gestion de la Forêt Classée de Nafadji.

Mots clés : déforestation, diversification agricole, espèces ligneuses, Forêt Classée de Nafadji, Mali

AGRICULTURAL ENCROACHMENT IN THE NAFADJI FOREST RESERVE IN MALI : DRIVERS AND IMPACTS ON WOODY PLANT SPECIES

ABSTRACT

Habitat lost due to natural ecosystem replacement by agriculture is a major threat to biodiversity globally. This study aims to assess the impacts of deforestation on the diversity and the demography of woody plant species. Data were collected through a socio-economic survey on 55 farms and a forest inventory within 74 1-ha plots in farms and savannas. A step-wise multiple regression was performed to identify the main factors determining the increase in the area of croplands. Intracommunity diversity indexes, dendrometric parameters and the recruitment were compared between croplands and the natural vegetation. In average, existing croplands had a yearly area increase rate of 0.18 ha/year. The diversification of crops was the main factor determining the extension of farms. Findings showed the impacts of habitat degradation to install crops on dendrometric parameters such as the density of adult trees, the density of regenerations and mean tree height which were lower in fields. Participatory restoration of degraded areas and their valuation in economically profitable business are a good option to ensure sustainable funding for the management of the Nafadji Forest Reserve.

Keywords : deforestation, crop diversification, woody plant species, Nafadji Forest Reserve, Mali

INTRODUCTION

La perte des habitats due aux changements des modes d'occupation du sol constitue une menace majeure sur la diversité biologique à l'échelle mondiale (Martinuzzi *et al.*, 2015). L'expansion des superficies cultivées (Laurance *et*

al., 2014 ; Lewis *et al.*, 2015) et le développement des infrastructures (Armenteras *et al.*, 2017) sont reconnus comme des déterminants directs de la déforestation. La conversion des habitats naturels en exploitations agricoles entraîne la perte de biodiversité ; ce qui n'est pas sans conséquences pour le fonctionnement des écosystèmes et le bien-être humain (Haddad *et al.*, 2015 ; Pfeifer *et al.*, 2017). Avec la réduction des habitats, les populations d'animaux sauvages déclinent (Pfeifer *et al.*, 2017). Ainsi, 20 – 30 % des amphibiens, des reptiles et des mammifères sont menacés d'extinction à l'échelle planétaire (Young *et al.*, 2004 ; Schipper *et al.*, 2008 ; Böhm *et al.*, 2013). Cette triste situation pourrait empirer dans le futur. En effet, la population humaine passera de 7 milliards en 2011 à 9 milliards d'habitants en 2050 avec pour conséquence le remplacement additionnel de 10 – 20 % des écosystèmes en exploitations agricoles et infrastructures urbaines (Alcamo *et al.*, 2006). La croissance démographique est également une réalité au Mali où la population humaine est passée de 9,8 millions d'habitants en 1998 à 14,6 millions en 2009 (R.G.P.H., 2009).

Il est urgent de comprendre l'ampleur et les conséquences de la pression anthropique sur la nature afin d'évaluer où et comment les pressions croissent ou décroissent en relation avec les actions d'aménagement. Ceci représente un défi majeur pour plusieurs raisons. D'une part, la pression anthropique est variée avec des conséquences complexes difficiles à modéliser. D'autres parts, l'impact de la pression anthropique sur les écosystèmes et les espèces peut varier considérablement en fonction d'une multitude de facteurs. Ainsi, l'effet spécifique d'un facteur ne peut pas être évalué de manière isolée (Geldmann *et al.*, 2014). Ceci a amené à différentes méthodes d'évaluation de la pression anthropique en fonction de l'échelle ou du phénomène étudié (causes ou conséquences de la pression).

Plusieurs travaux se sont intéressés à la cartographie de la pression anthropique sur l'environnement depuis les travaux préliminaires de McCloskey & Spalding (1989). Les principaux résultats (végétation dégradée, empreintes humaines) proviennent de données de télédétection collectées sur l'occupation du sol, les infrastructures ainsi que la densité de la population humaine et concernent les écosystèmes terrestres (Sanderson *et al.*, 2002; Mittermeier *et al.*, 2003 ; Alkemade *et al.*, 2009 ; Ellis *et al.*, 2010), marins (Halpern *et al.*, 2008) et d'eaux douces (Vörösmarty *et al.*, 2010). Il ressort de ces travaux que la diversité des espèces végétales est globalement menacée par la dégradation des écosystèmes et l'occupation des terres (Sala *et al.*, 2000 ; Gerstner *et al.*, 2014).

En Afrique de l'Ouest, plusieurs études ont également abordé les impacts des actions anthropiques sur la diversité des espèces végétales ligneuses. Bonou *et al.* (2009) ont conclu que les paramètres dendrométriques et démographiques de *Azelia africana* Sm. présentent des valeurs supérieures en forêt dense non dégradée contrairement aux zones anthropisées (forêts secondaires, jachères). Lokonon *et al.* (2013) ont obtenu des résultats

similaires sur *Dialium guineense* Willd. dans Forêt Classée de la Lama. Dans les savanes soudaniennes, Houéhanou (2012) a observé que la densité des arbustes est plus élevée dans les aires protégées comparativement aux zones anthropisées.

Entre 1985 et 2014, la Forêt Classée de Nafadji a été soumise à une destruction de la végétation due à l’empiètement agricole à un rythme moyen de 15 nouveaux champs installés chaque année ; ce qui correspond à 37 ha d’habitats naturels convertis en exploitations agricoles (Haidara, 2015). Le présent travail s’inscrit dans la perspective de comprendre les déterminants de l’évolution des fronts agricoles et leurs impacts sur les formations végétales dans la Forêt Classée de Nafadji au Mali. L’objectif global de l’étude est d’évaluer les impacts de la déforestation sur la diversité et la démographie des espèces ligneuses. Plus spécifiquement, il s’agira de : (i) identifier les déterminants de l’évolution des fronts agricoles dans la Forêt Classée de Nafadji ; et (ii) évaluer les impacts de l’installation des champs sur la diversité et la démographie des espèces végétales dans la Forêt Classée de Nafadji. Pour atteindre les objectifs fixés, les hypothèses suivantes sont formulées : (i) en raison de la pratique de l’agriculture extensive, l’abondance de la main d’œuvre familiale exprimée par le nombre d’actifs agricoles est déterminante dans l’extension des superficies cultivées ; (ii) la destruction de la végétation naturelle pour installer les champs réduit la diversité biologique des espèces ligneuses tout en entravant leur recrutement.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Milieu d’étude

Située dans la Commune rurale de Kassaro, Sous-Préfecture de Sébékoro dans le Cercle de Kita (Région de Kayes, République du Mali), la forêt de Nafadji a été classée par l’Arrêté N°148 S.E. du 16 janvier 1945 du Gouverneur Général de l’Afrique Occidentale Française (AOF) en application de l’Article 8 du Décret du 4 juillet 1935 sur le régime forestier en AOF. La Forêt Classée de Nafadji s’étend sur une superficie de 43000 ha entre 8°30’ et 8°50’ de longitude Ouest et entre 12°45’ et 13°05’ de latitude Nord (figure 1). La Forêt Classée de Nafadji est une des zones d’intervention de l’Opération aménagement du Parc National de la Boucle du Baoulé (OPNBB) et partie intégrante de la Réserve de Biosphère de la Boucle du Baoulé, qui constitue actuellement un patrimoine mondial de l’UNESCO. Elle est située à 70 km de Bamako et à environ 80 km de la ville de Kita, sur l’axe ferroviaire Bamako- Dakar (Haidara, 2015).

Située entre les isohyètes 900 mm et 1100 mm, la Forêt Classée de Nafadji jouit d’un climat tropical caractérisé par trois saisons : une saison sèche froide allant de mi-novembre à mi-février, correspondant à l’alizé avec une température minimale de 21,7°C ; une saison sèche chaude allant de mi-février à mi-mai avec une température maximale de 38°C en mai ; une

saison pluvieuse de mi-mai à mi-novembre qui correspond à la mousson. La Forêt Classée de Nafadji est localisée sur le Plateau Mandingue qui est un ensemble très imposant de collines et buttes de surfaces d'aplanissement et d'accumulation. On y distingue les sols limono-sableux, limono-argileux et sablo-limoneux. Le réseau hydrographique est dominé par le fleuve Baoulé qui constitue la limite à l'est. La végétation est constituée de savanes arborées et arbustives, de vestiges de forêts claires dans les bas-fonds et les galeries forestières. La faune a été largement décimée dans la Forêt Classée de Nafadji, à cause de l'occupation humaine. Les grands mammifères de la savane se font rares mais les phacochères et les primates (patas, vervets et babouins), pintades, francolins y sont abondants (Haidara, 2015).

Autour et à l'intérieur de la Forêt Classée de Nafadji domine l'ethnie Peulh. On y rencontre d'autres groupes socioculturels tels que : Bambaras, Malinkés, Sénoufos, Sarakolés et Wolofs venus d'horizons divers. Actuellement, deux (2) villages (Nafadji Coura et Koliflo) sont installés à la lisière de la Forêt Classée de Nafadji (figure 1). En outre, six (6) hameaux sont repartis dans la Forêt Classée de Nafadji : Dembacoro, Sébénicoro, Sanancoro, Nafadji Coro, Lundji I-II et Soribougou (figure 1). L'agriculture est la principale activité des habitants. On y cultive le mil, le maïs, le sorgho, l'arachide, le niébé et le riz comme cultures vivrières. L'avènement de la Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles (CMDT) en 1995 a fait de la localité une grande productrice de coton comme culture industrielle. L'élevage a atteint une croissance encourageante avec le nombre élevé de bovins, caprins, ovins, asins et de volailles. L'exploitation forestière est pratiquée dans la zone et certains villages ont une longue expérience de la carbonisation, de la vente de bois et de la cueillette. La pratique du petit commerce, de la production du miel, la pêche, constituent des activités secondaires. L'artisanat est assez développé dans la zone (Haidara, 2015).

Le plan d'aménagement de la Forêt Classée de Nafadji a été validé en 2001 par l'Arrêté N°013094/MEATEU-SG du 20/11/2001. En octobre 2002, il a été établi un protocole pour gérer de façon concertée les zones de culture délimitées dans la Forêt Classée de Nafadji par le Service de la Conservation de la Nature (SCN) et le Service Local d'Appui Conseil, d'Aménagement et d'Équipement Rural (SLACAER). Dans le cadre de ce protocole, les bénéficiaires devaient rester dans les parcelles délimitées sur la base de la population recensée en 1995 avec un ratio de 1,8 ha par habitant. Les clauses du protocole n'ont pas été respectées par les occupants. Au total, 1654 champs (parcelles continues dans une même aire) couvrant une superficie cumulée de 3906 ha ont été identifiés en 2014 sur la base de la carte d'utilisation du sol issue de l'interprétation semi-supervisée des images Landsat prises en mars 2014 (Haidara, 2015).

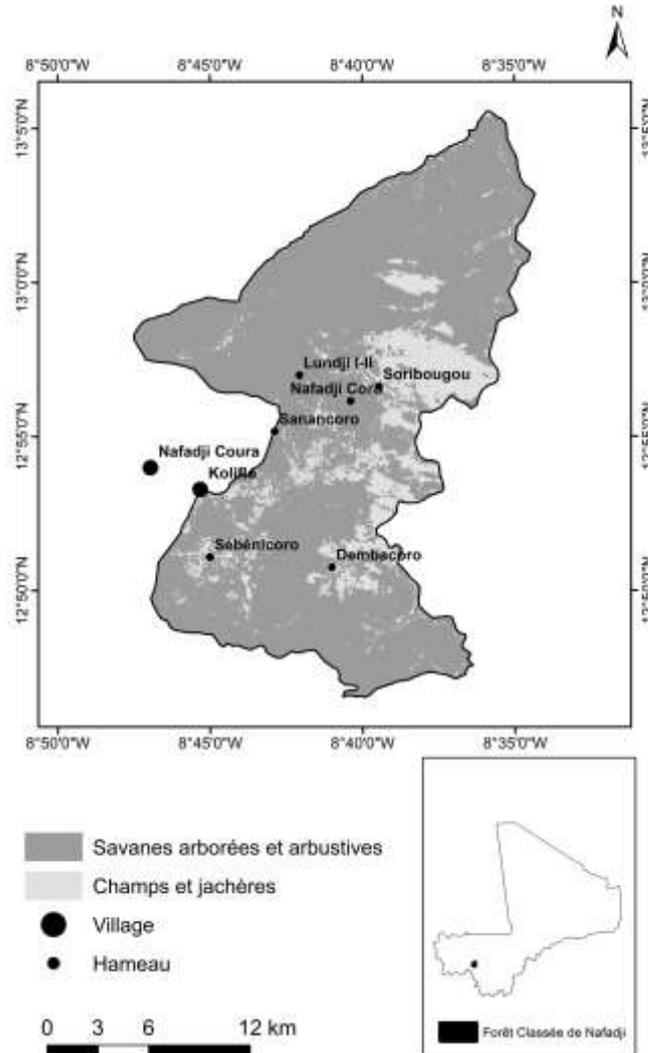


Figure 1. Localisation de la Forêt Classée de Nafadji

Enquêtes socio-économiques

Le nombre de personnes interviewées a été déterminé par la formule de Dagnelie (1998) :

$$N = U^2_{1-\alpha/2} \frac{p(1-p)}{d^2}$$
 ; avec N le nombre de personnes à enquêter ; U la valeur de la distribution normale réduite égale à 1,96 pour une erreur α de 5% ; p le pourcentage de personnes ayant un champ issu de la dégradation de la végétation ($p = 0,6$); d la marge d'erreur comprise entre 1 et 15 %. Au total, 55 personnes ont été interviewées en prenant une marge d'erreur de 13 %.

Le contenu du questionnaire renseigne sur l'identité, la composition du ménage et les activités agricoles des enquêtés.

Inventaire forestier

L'impact de l'installation des champs sur la diversité et la démographie des espèces végétales de la Forêt Classée de Nafadji a été évalué par un inventaire forestier. Les données ont été collectées aussi bien dans les champs des chefs de ménage interviewés que dans la végétation naturelle. Le périmètre et la superficie de chaque champ exploité ont été déterminés par un tracking au GPS. La fiche de collecte des données sur l'étendue des champs renseigne également sur l'année d'installation du champ ainsi que sa superficie initiale. Une fois le tracking au GPS terminé, un plateau de 1 ha (100 m x 100 m) a été installé pour mesurer le diamètre à hauteur de poitrine et la hauteur totale de tous les individus d'espèces ligneuses de diamètre supérieur ou égal à 5 cm. A l'intérieur de chaque plateau, 5 quadrats de 100 m² (10 m x 10 m) sont installés dans les angles et au centre afin de dénombrer la régénération des espèces ligneuses. La régénération désigne les individus de diamètre inférieur à 5 cm. Au total, 54 plateaux ont été installés dans les champs et 20 dans les savanes de la Forêt Classée de Nafadji.

Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R version 4.0.2 (R Core Team, 2020). Une régression multiple avec sélection des variables pas à pas a été utilisée pour identifier les facteurs déterminants l'accroissement annuel des superficies emblavées. La variable dépendante est l'accroissement annuel de la superficie cultivée à l'échelle des exploitations agricoles. Les variables indépendantes incorporées dans le modèle initial sont : l'âge du chef de ménage à l'installation du champ ; le nombre d'années écoulées après l'installation du champ ; le nombre d'actifs agricoles du ménage ; le nombre d'espèces cultivées ; le nombre d'espèces ligneuses conservées dans le champ. La corrélation entre les variables indépendantes prises deux à deux a été calculée afin d'éviter d'incorporer des variables colinéaires dans le modèle initial.

Les indices de diversité intracommunautaire ont été calculés à partir des données de l'inventaire forestier réalisé dans les champs et la végétation naturelle. Les individus adultes ont été distingués de la régénération lors des calculs. Ainsi, la richesse spécifique S des ligneux de dbh > 5 cm et de la régénération (dbh < 5 cm) a été précisée dans les champs et la végétation naturelle. La richesse spécifique est le nombre d'espèces végétales ligneuses dans l'habitat (champ ou végétation naturelle)

L'indice de diversité de Shannon noté H et exprimé en bits a été calculé par la formule :

$$H = \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i \quad \text{avec} \quad p_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^S n_i} ; \quad \text{où } S = \text{richesse spécifique de}$$

l'habitat ; p_i = fréquence relative des individus de l'espèce i ; n_i = effectif des individus de l'espèce i ; n = effectif total des individus de l'habitat. Il permet d'évaluer la diversité des espèces végétales. La diversité est faible lorsque $H < 2,5$ bits, moyenne si H est compris entre 2,5 et 3,9 bits puis élevée quand $H \geq 4$ bits. Le milieu est peu diversifié quand H est faible et relativement diversifié en espèces quand H est élevé.

L'équitabilité de Pielou (E) correspond au rapport entre la diversité obtenue et la diversité maximale. Il exprime la régularité ou l'équitable répartition des individus au sein des espèces. Il est donné par la formule :

$E = \frac{H}{\log_2 S}$; où S désigne la richesse spécifique. L'équitabilité est faible lorsque $E < 0,6$, moyenne quand E est compris entre 0,6 et 0,8 puis élevée si $E \geq 0,8$. Si E est faible, on conclut que peu d'espèces concentrent la majorité des individus du milieu. Lorsque E est élevé, on déduit que le milieu n'est pas spécialisé et donc les individus sont bien répartis au sein des espèces.

Si H et E sont faibles, alors le milieu est homogène et spécialisé. Si H et E sont élevés, alors le milieu est isotrope.

Les paramètres dendrométriques suivants ont été calculés :

- Densité du peuplement (N , tiges/ha) – nombre moyen d'arbres sur pied ramené à l'hectare :

$$N = \frac{n}{s}$$
 ; n étant le nombre total d'arbres du placeau de superficie s .

- Diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne (D_g , cm) – obtenu par la relation

$$D_g = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2}$$
 ; avec n le nombre d'arbres du placeau et d_i le diamètre (cm) de l'arbre i .

- Surface terrière (G , m²/ha) – somme des surfaces des sections transversales à 1,30 m du sol de tous les arbres du placeau, puis ramenée à l'hectare :

$$G = \frac{\pi}{40000s} \sum_{i=1}^n d_i^2$$

- Hauteur moyenne (H , m) des arbres :

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$$
 ; h_i étant la hauteur totale (m) de l'arbre i .

- Densité de régénération (N_r , brins/ha) – nombre moyen de régénérations ramené à l'hectare :

$$N_r = \frac{1}{5s_q} \sum_{i=1}^5 n_{ri} ; \text{ avec } s_q \text{ la superficie des quadrats et } n_{ri}$$

l'effectif de la régénération dénombré dans le quadrat i .

Le test t de Student a été utilisé pour comparer les valeurs des paramètres dendrométriques entre les champs et les savanes. Les conditions d'application du test à savoir la normalité et l'homogénéité des variances ont été vérifiées avant l'exécution des analyses statistiques. Dans chacun des habitats, les arbres ont été répartis par classe de diamètre d'amplitude 5 cm et les densités des arbres (exprimées en tiges/ha) par classe de diamètre ont été déterminées. Dans les peuplements naturels, la dominance des individus de petit diamètre confère à la structure diamétrique une dissymétrie gauche caractéristique des peuplements multi-spécifiques ou inéquiennes. La stabilité de la démographie de l'ensemble des espèces ligneuses a été évaluée suivant la méthode proposée par Condit *et al.* (1998). Ainsi, une régression linéaire simple a été réalisée en utilisant le centre des classes comme une variable indépendante et l'effectif des classes comme une variable dépendante. La pente du modèle de régression a été utilisée comme un indicateur de la stabilité démographique. En général, une pente négative indique un bon recrutement et une stabilité démographique, une pente nulle indique un nombre égal d'individu dans les classes de petits diamètres et les classes de grands diamètres alors qu'une pente positive indique une absence de recrutement (Obiri *et al.*, 2002).

RÉSULTATS

Déterminants de l'évolution des fronts agricoles

L'extension des champs dans la Forêt Classée de Nafadji évolue à rythme moyen de 0,18 ha/an avec une erreur type de 0,03 ha/an. La médiane est égale à 0,12 ha/an avec des valeurs minimale et maximale respectivement égales à 0 ha/an et 1 ha/an.

Le tableau 1 montre le modèle de prédiction de l'accroissement annuel de la superficie cultivée à l'échelle des exploitations agricoles installées dans la Forêt Classée de Nafadji. Sur l'ensemble des variables incluses dans le modèle de départ (âge du chef de ménage à l'installation du champ, nombre d'années écoulées après l'installation du champ, nombre d'actifs agricoles du ménage, nombre d'espèces cultivées et nombre d'espèces ligneuses conservées dans le champ), seule la variable « nombre d'espèces cultivées » a un coefficient de régression significatif ($P = 0,04$). La valeur estimée du coefficient de régression est positive indiquant que l'accroissement annuel de la superficie cultivée croît avec le nombre de spéculations produites. Le coefficient de détermination du modèle est égal à 0,08. Ainsi, seulement 8 % de la variation de l'accroissement annuel de la superficie cultivée est expliquée par la variation du nombre d'espèces cultivées.

Tableau 1. Modèle de prédiction de l'accroissement annuelle de la superficie cultivée dans les exploitations agricoles de la Forêt Classée de Nafadji

| Variables | Valeur estimée | Erreur type | t | Probabilité | Coefficient de détermination R ² |
|----------------------------|----------------|-------------|-------|-------------|---|
| Constante | -0,10 | 0,14 | -0,76 | 0,45 | |
| Nombre d'espèces cultivées | 0,04 | 0,02 | 2,10 | 0,04 | 0,08 |

Impacts de l'évolution des fronts agricoles sur la diversité et la démographie des espèces ligneuses

Le tableau 2 synthétise les paramètres de diversité spécifique calculés pour les champs et les savanes de la Forêt Classée de Nafadji en distinguant les individus adultes de la régénération. Quel que soit l'habitat, la richesse spécifique de la régénération est supérieure à celle des individus adultes. De même, seulement le tiers des espèces ligneuses présentes dans la Forêt Classée est conservé après l'installation des champs. L'indice de diversité de Shannon est élevé en forêt aussi bien dans la communauté des individus adultes ($H = 4,73$) que pour la régénération ($H = 5,13$). Dans les champs, l'indice de diversité de Shannon est respectivement faible ($H = 2,53$) et moyen ($H = 3,66$) pour les individus adultes et la régénération. En ce qui concerne l'équitabilité de Pielou, la valeur obtenue en forêt est élevée pour les adultes ($E = 0,81$) et moyenne au sein de la strate de régénération ($E = 0,79$). En revanche, l'équitabilité de Pielou est faible pour les ligneux adultes conservés dans les champs ($E = 0,59$) et élevée pour la régénération ($E = 0,80$). En considérant le peuplement ligneux, les indices de Shannon et de Pielou sont élevés dans la végétation savanicole et faibles dans les champs. Ainsi, les champs constituent un habitat homogène et spécialisé contrairement aux savanes de la Forêt Classée de Nafadji qui sont un milieu isotrope.

Tableau 2. Diversité des arbres, arbustes et régénération dans les champs et dans les savanes de la Forêt Classée de Nafadji

| Habitats | Arbres et arbustes (dbh \geq 5 cm) | | | Régénération (dbh $<$ 5 cm) | | |
|----------|--------------------------------------|------|------|-----------------------------|------|------|
| | S | H | E | S | H | E |
| Champs | 19 | 2,53 | 0,59 | 24 | 3,66 | 0,80 |
| Savanes | 56 | 4,73 | 0,81 | 89 | 5,13 | 0,79 |

Le Tableau 3 résume les valeurs des paramètres dendrométriques calculés sur les données de l'inventaire forestier exécuté dans les champs et les savanes de la Forêt Classée de Nafadji. La surface terrière ne varie pas significativement entre les champs et la savane ($P = 0,917$). Par contre, les paramètres densité du peuplement, diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne, hauteur moyenne et densité de régénération varient significativement des champs à la savane ($P < 0,001$). Ainsi, la densité de peuplement, la hauteur moyenne et la densité de régénération sont plus élevées dans les savanes que dans les champs. En revanche, le diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne est plus élevé dans les champs

comparativement aux savanes (48,66 cm contre 11, 99 cm ; respectivement). Ainsi, les arbres conservés dans les champs sont majoritairement des individus âgés ou de grands diamètres.

Tableau 3. Paramètres dendrométriques calculés dans les champs et les savanes de la Forêt Classée de Nafadji

| Paramètres | Champs | | Savanes | | Probabilité |
|---|---------|-------------|---------|-------------|-------------|
| | Moyenne | Erreur-type | Moyenne | Erreur-type | |
| Densité (N, tiges/ha) | 54,42 | 8,19 | 826,00 | 95,70 | <0,001 |
| Diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne (D_g ; cm) | 48,66 | 2,60 | 11,99 | 0,76 | <0,001 |
| Hauteur moyenne (H, m) | 12,33 | 0,47 | 5,42 | 0,41 | <0,001 |
| Surface terrière (G, m ² /ha) | 8,94 | 1,26 | 9,12 | 1,15 | 0,917 |
| Densité de régénération (N_r , brins/ha) | 156,30 | 29,30 | 736,00 | 64,60 | <0,001 |

En ce qui concerne la stabilité démographique, la pente du modèle de régression du diamètre en fonction de l'effectif des individus est non significative dans les champs (Tableau 4). Ainsi, il y a autant d'individus dans les classes de petite grosseur que dans les classes de grande grosseur (Figure 2). En revanche, la pente du modèle de régression du diamètre en fonction de l'effectif des individus est négative et significative dans les savanes (Tableau 4). Ceci est un indicateur de la stabilité démographique du peuplement ligneux des savanes confirmée par la structure diamétrique présentant une dissymétrie gauche (Figure 3).

Tableau 4. Résultats de la régression du diamètre en fonction de l'effectif des individus dans les champs et les savanes de la Forêt Classée de Nafadji

| Habitats | Constante | Pente | R ² | Probabilité |
|----------|-----------|-------|----------------|-------------|
| Champ | 45,48 | -0,62 | 0,02 | 0,665 |
| Savanes | 45,18 | -0,14 | 0,44 | 0,004 |

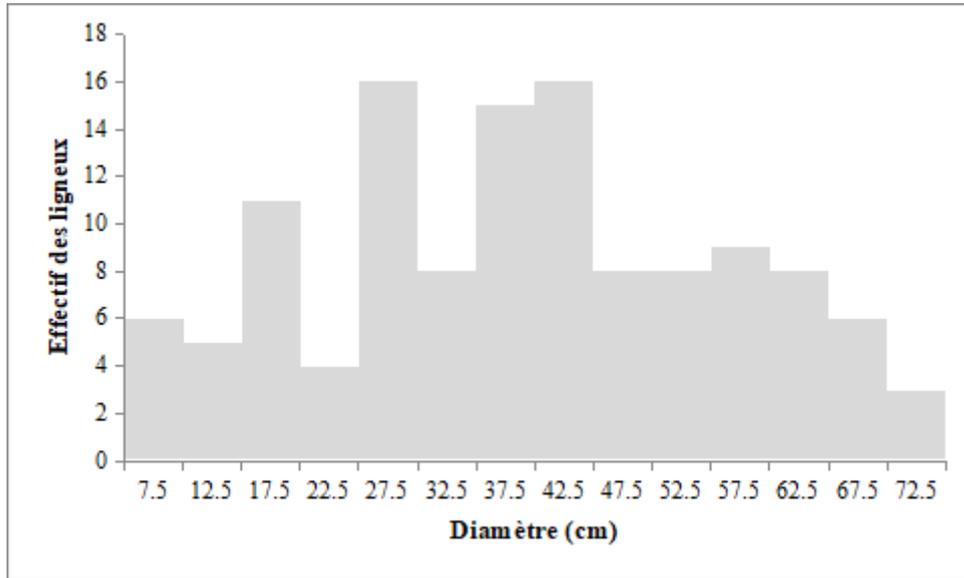


Figure 2. Structure en diamètre des arbres et arbustes dans les champs installés dans la Forêt Classée de Nafadji

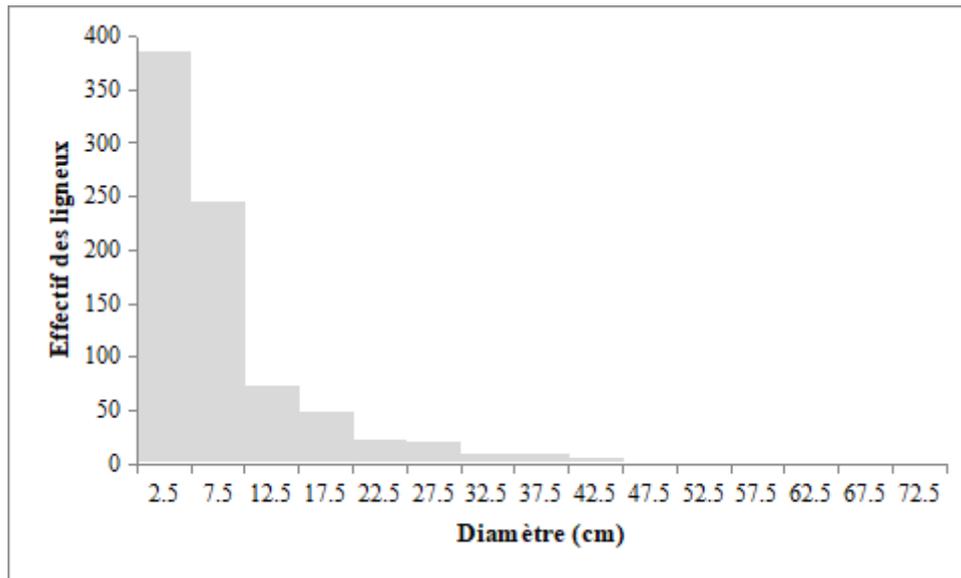


Figure 3. Structure en diamètre des arbres et arbustes dans les savanes de la Forêt Classée de Nafadji

DISCUSSION

La gestion durable des modes d'occupation du sol qui tient aussi bien compte des besoins des êtres humains que du fonctionnement des écosystèmes est indispensable pour assurer la santé des écosystèmes à long terme (Gerstner *et al.*, 2014). En conséquence, la pertinence des études portant sur

l'évaluation quantitative de l'impact de l'occupation du sol sur les écosystèmes tel que la diversité spécifique n'est plus à démontrer (DeFries *et al.*, 2004). Ce travail s'inscrit dans le contexte global d'évaluation des effets de l'anthropisation sur la diversité des espèces végétales.

Contrairement aux attentes, l'abondance de la main d'œuvre familiale exprimée par le nombre d'actifs agricoles n'est pas déterminante dans l'extension des superficies cultivées. Au contraire, l'extension des superficies cultivées est liée à la diversification des productions agricoles. En effet, la création de la Compagnie Malienne Des Textiles (CMDT) en 1995 a entraîné l'introduction d'une nouvelle culture de rente dans la zone : le coton. Ainsi, de grandes superficies ont été emblavées de coton dans les exploitations agricoles au point de faire de la localité une grande productrice de coton. Ces nouvelles superficies occupées par le coton ont été créées en dégradant la végétation naturelle. Toutefois, le pouvoir explicatif du modèle demeure faible ($R^2 = 0,08$) suggérant l'existence d'autres variables explicatives non prises en compte par cette étude. A l'échelle mondiale, la demande en produits agricoles, consécutive à l'explosion démographique est le moteur de la déforestation (Tramberend *et al.*, 2019). Actuellement, la conversion des formations végétales naturelles en exploitations agricoles est plus observée en Afrique et en Amérique Latine que dans les pays développés (Franco-Solís & Montanía, 2021).

Les résultats de l'inventaire forestier confirment que la destruction de la végétation naturelle pour installer les champs réduit la diversité biologique des espèces ligneuses tout en entravant leur recrutement. En effet, les indices de diversité de Shannon et l'équitabilité de Piélou sont élevés dans la savane et faibles dans les champs. Ainsi, la savane de la Forêt Classée de Nafadi est un milieu diversifié caractérisé par la quasi absence d'espèces ligneuses dominantes. A l'opposé, les champs constituent un habitat homogène et spécialisé non seulement en raison de l'anthropisation mais aussi de la préférence des producteurs vis-à-vis de certaines espèces agroforestières dont les densités sont élevées dans les champs. C'est le cas de *Vitellaria paradoxa* qui domine les arbres conservés dans les champs. La préférence de certaines espèces agroforestières notamment en raison de leur importance socio-économique et parfois culturelle a également été mise en évidence au Bénin (Assogbadjo *et al.*, 2012). La conversion des savanes en exploitations agricoles entraîne toujours la réduction de la diversité des espèces végétales ligneuses (Tripathi *et al.*, 2021). La pratique des feux est une option privilégiée de préparation des sols, ce qui constitue des risques écologiques. En outre, au cours des défrichements pour la mise en culture, de nombreux arbres sont abattus. Malgré la préservation des arbres utiles dans les champs, la destruction totale des autres espèces et le passage régulier des feux ne favorisent pas la reconstitution de la végétation originelle (Kio, 1981 ; Dembélé, 1996). Seuls les arbustes sont capables de se régénérer rapidement (Nasi, 1994). Il s'en suit alors une modification profonde de la structure et de

la composition de la végétation (Nasi, 1994 ; Fournier *et al.*, 2001) : l'installation d'espèces pionnières ou même d'espèces rudérales (Tabarelli *et al.*, 2008).

Les résultats mettent également en exergue les impacts de l'installation des champs sur les paramètres dendrométriques notamment la densité des adultes, la densité de régénération et la hauteur moyenne qui sont plus élevées dans la savane. Ceci confirme qu'aucun stade de développement des espèces ligneuses n'échappe à la dégradation de l'habitat comme précédemment observé par Lokonon *et al.* (2013) dans la Forêt Classée de la Lama au Bénin. En revanche, le diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne est plus élevé dans les champs. Les savanes de la Forêt Classée de Nafadji ne font pas l'objet d'exploitation forestière. Ainsi, la démographie des espèces est le résultat de processus naturels de germination, croissance, développement et sénescence. Toutes choses étant égales par ailleurs, la densité élevée du recrutement dans les savanes exerce un effet négatif sur la valeur moyenne du diamètre. Ainsi, la valeur élevée du diamètre moyen observée dans les champs pourrait indiquer un échec de recrutement et la persistance des arbres âgés dans les systèmes agroforestiers (McCauley *et al.*, 2013). Ces tendances des paramètres structuraux expliquent la stabilité de la démographie des espèces ligneuses dans les savanes de la Forêt Classée de Nafadji contrairement aux peuplements ligneux des champs.

CONCLUSION

Cette étude a décelé les pressions anthropiques et leurs impacts sur la Forêt Classée de Nafadji. Les résultats obtenus montrent une prolifération des champs de culture au sein de la forêt. L'extension des superficies cultivées est liée à la diversification des productions agricoles, notamment le coton, principale culture de rente promue dans la zone à partir de 1995. La destruction de la végétation naturelle pour installer les champs réduit la diversité spécifique des espèces ligneuses tout en entravant leur recrutement. Enfin, les résultats mettent en exergue les impacts de l'installation des champs sur les paramètres dendrométriques, notamment la densité des adultes, la densité de régénération et la hauteur moyenne, qui sont plus faibles dans les exploitations agricoles.

La restauration participative des zones dégradées et leur reconversion en espaces économiquement rentables sont envisageables pour assurer un financement durable de l'aménagement et de la gestion de la Forêt Classée de Nafadji. Dans cette perspective, le modèle d'aménagement et de gestion de la Forêt Classée de la Lama au Bénin est une source d'inspiration.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par la Coopération Universitaire au Développement-Belgique (CUD) à travers la bourse régionale de formation en Master option Gestion des Ressources Naturelles et de la Biodiversité accordée à Mohamed Haidara pour le compte de l'année académique 2014 – 2015. Les auteurs remercient les Professeurs Achille Assogbadjo et Romain Glèlè Kakaï pour leurs commentaires sur les premières versions de ce manuscrit. L'évaluation critique des lecteurs de la revue Annales des Sciences Agronomiques est appréciée à sa juste valeur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALCAMO J., VANVUUREN D. & CRAMER W. 2006. Changes in ecosystem services and their drivers across the scenarios : 297–373. *In* : CARPENTER S. R., PINGALI P. L., BENNETT E. M., & ZUREK M. B. (eds.), *Ecosystems and human well-being: scenarios*. Volume 2. Island Press, Washington D.C.
- ALKEMADE R., OORSCHOT M., MILES L., NELLEMAN C., BAKKENES M. & TEN BRINK B. 2009. GLOBIO3: a framework to investigate options for reducing global terrestrial biodiversity loss. *Ecosystems*, 12: 374-390.
- ARMENTERAS D., ESPELTA J. M., RODRIGUEZ N. & RETANA J. 2017. Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: three decades of studies (1980–2010). *Global Environ. Change*, 46: 139-147.
- ASSOGBADJO A. E., GLELE-KAKAI R. L., VODOUHE F. G., DJAGOUN C.A.M.S., CODJIA J.-C.T. & SINSIN B. A. 2012. Biodiversity and socioeconomic factors supporting farmers' choice of wild edible trees in the agroforestry systems of Benin (West Africa). *For. Policy Econ.* 14: 41-49.
- BÖHM M., COLLEN B., BAILLIE J. E., BOWLES P., CHANSON J., COX N., ... & MATEO J. A. 2013. The conservation status of the world's reptiles. *Biol. Conserv.* 157 : 372-385.
- BONOU W., GLELE KAKAI R., ASSOGBADJO A. E., FONTON H. N. & SINSIN B. 2009. Characterisation of *Azelia africana* Sm. habitat in the Lama forest reserve of Benin. *For. Ecol. Manage.* 258 : 1084-1092.
- CONDIT R., SUKUMAR R., HUBBELL S. P. & FOSTER R. B. 1998. Predicting population trends from size distributions: a direct test in a tropical tree community. *Am. Nat.* 152: 495-509.
- DAGNELIE P. 1998. *Statistiques théoriques et appliquées*. De Boeck et Larcier, Brussels, Belgium.
- DEFRIES R. S., FOLEY J. A. & ASNER G. P. 2004. Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function. *Front. Ecol. Environ.* 2: 249-257.
- DEMBELE F. 1996. Influence du feu et du pâturage sur la végétation et la biodiversité dans les jachères en zone soudanienne-nord du Mali : cas des jeunes jachères du terroir de Missira (Cercle de Kolokani). Thèse de doctorat, Université de Droit, d'Economie et des Sciences, Aix- Marseille III, France.
- ELLIS E. C., KLEIN GOLDEWIJK K., SIEBERT S., LIGHTMAN D. & RAMANKUTTY N. 2010. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecol. Biogeogr.* 19: 589-606.
- FOURNIER A., FLORET C. & GNAHOUA G. M. 2001. Végétation des jachères et succession postculturale en Afrique tropicale. *In* : FLORET CH. & PONTANIER R. (eds). *La jachère en Afrique tropicale*. Ed. John Libbey Eurotext. Montrouge.
- FRANCO-SOLIS A. & MONTANIA C. V. 2021. Dynamics of deforestation worldwide: a structural decomposition analysis of agricultural land use in South America. *Land Use Policy*, 109 : <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105619>
- GELDMANN J., JOPPA L. N. & BURGESS N. D. 2014. Mapping change in human pressure globally on land and within protected areas. *Conserv. Biol.* 28: 1606-1616.

- GERSTNER K., DORMANN C. F., STEIN A., MANCUR A.M. & SEPPELT R. 2014. Effects of land use on plant diversity – a global meta-analysis. *J. Appl. Ecol.* 51: 1690-1700.
- HADDAD N. M., BRUDVIG L. A., CLOBERT J., DAVIES K. F., GONZALEZ A., HOLT R. D., LOVEJOY T. E., SEXTON J. O., AUSTIN M. P., COLLINS C. D., COOK W. M., DAMSCHEN E. I., EWERS R. M., FOSTER B. L., JENKINS C. N., KING A. J., LAURANCE W. F., LEVEY D. J., MARGULES C. R., MELBOURNE B. A., NICHOLLS A. O., ORROCK J. L., SONG D-X. & TOWNSHEND J. R. 2015. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Sci. Adv.* 1:1-9.
- H Aidara M. 2015. Déterminants de l'évolution des fronts agricoles et leurs impacts sur les formations végétales dans la Forêt Classée de Nafadji au Mali. Mémoire de Master of Science, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Bénin.
- HALPERN B. S., WALBRIDGE S., SELKOE K. A., KAPPE, C. V., MICHELI F., D'AGROSA C., ... & WATSON R. 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319: 948-952.
- HOUEHANOU T. D. 2012. Ecological gap analysis: assessing the ecological effectiveness of Pendjari Biosphere Reserve in biodiversity conservation in Bénin (West Africa). PhD dissertation. Faculty of Agronomic Sciences, University of Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Benin.
- KIO O. P. R. 1981. Stratégie de conservation des forêts en Afrique tropicale. Compte rendu de colloque du 27 Avril au 01 Mai 1981 à Ibadan, Nigeria.
- LAURANCE W. F., SAYER J. & CASSMAN K. G. 2014. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. *Trends Ecol. Evol.* 29: 107-116.
- LEWIS S. L., EDWARDS D. P. & GALBRAITH D. 2015. Increasing human dominance of tropical forests. *Science* 349: 827-832.
- LOKONON B. E., BONOU W. N., KASSA B., AZIHOU A. F., ASSOGBADJO A. E. & GLELE KAKAÏ R. 2013. Structural and ethnobotanical characterization of Velvet Tamarind (*Dialium guineense* Willd), a multipurpose tree species. *Agronomie Afr.* 25: 121-131.
- MARTINUZZI S., WITHEY J. C., PIDGEON A. M., PLANTINGA A. J., MCKERROW A. J. WILLIAMS S. G., HELMERS D. P. & RADELOFF V. C. 2015. Future land-use scenarios and the loss of wildlife habitats in the southeastern United States. *Ecol. Appl.* 25: 160-171.
- MCCAULEY L. A., JENKINS D. G. & QUINTANA-ASCENCIO P. F. 2013. Reproductive failure of a long-lived wetland tree in urban lands and managed forests. *J. Appl. Ecol.* 50: 25-33.
- MCCLOSKEY J. M. & SPALDING H. 1989. A reconnaissance-level inventory of the amount of wilderness remaining in the world. *Ambio*, 18: 221-227.
- MITTERMEIER R. A., MITTERMEIER C. G., BROOKS T. M., PILGRIM J. D., KONSTANT W. R., DA FONSECA G. A. B., & KORMOS C. 2003. Wilderness and biodiversity conservation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 100: 10309-10313.
- NASI R. 1994. La Végétation du centre régional d'endémisme soudanien au Mali : étude de la forêt des Monts Mandingues et essai de synthèse. Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud XI, Paris, France.
- OBIRI J., LAWES M. & MUKOLWE M. 2002. The dynamics and sustainable use of high value tree species of the coastal Pondoland forests of the Eastern Cape Province, South Africa. *For. Ecol. Manage.* 166 : 131-148.
- PFEIFER M., LEFEBVRE V., PERES C. A., BANKS-LEITE C., WEARN O. R., MARSH C. J., BUTCHART S. H. M., ARROYO-RODRIGUEZ V., BARLOW J., CEREZO A., CISNEROS L., D'CRUZE N., FARIA D., HADLEY A., HARRIS S. M., KLINGBEIL B. T., KORMANN U., LENS L., MEDINA-RANGEL G. F., MORANTE-FILHO J. C., OLIVIER P., PETERS S. L., PIDGEON A., RIBEIRO D. B., SCHERBER .C, SCHNEIDER-MAUNOURY L., STRUEBIG M., URBINA-CARDONA N., WATLING J. I., WILLIG M. R., WOOD E. M. & EWERS R. M. 2017. Creation of forest edges has a global impact on forest vertebrates. *Nature*, 551:187-191.
- R CORE TEAM. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- R.G.P.H. 2009. 4^{ème} Recensement Général de la Population et de l'Habitat au Mali. Bamako, Mali.

- SALA O. E., CHAPIN F. S., ARMESTO J. J., BERLOW E., BLOOMFIELD J., DIRZO R., ... & WALL D. H. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287:1770-1774.
- SANDERSON E. W., JAITEH M., LEVY M. A., REDFORD K. H., WANNEBO A. V., & WOOLMER G. 2002. The human footprint and the last of the wild. *Bioscience*, 52: 891-904.
- SCHIPPER J., CHANSON J. S., CHIOZZA F., COX N. A., HOFFMANN M., KATARIYA V., ... & YOUNG B. E. 2008. The status of the world's land and marine mammals: diversity, threat, and knowledge. *Science*, 322: 225-230.
- TABARELLI M., LOPES A. V. & PERES C. A. 2008. Edge effects drive tropical forest fragments towards and early successional system. *Biotropica*, 40 : 657-661.
- TRAMBEREND S., FISCHER G., BRUCKNER M. & VAN VELTHUIZEN H., 2019. Our common cropland: quantifying global agricultural land use from a consumption perspective. *Ecol. Econ.* 157 : 332-341.
- TRIPATHI H. G., WOOLLEN E. S., CARVALHO M. PARR C. L. & RYAN C.M. 2021. Agricultural expansion in African savannas: effects on diversity and composition of trees and mammals. *Biodiversity Conserv.* <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02249-w>
- VÖRÖSMARTY C. J., MCINTYRE P. B., GESSNER M. O., DUDGEON D., PRUSEVICH A., GREEN P., ... & DAVIES P. M. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467: 555-561.
- YOUNG B., STUART S., CHANSON J. S., COX N. A., & BOUCHER T. M. 2004. Disappearing jewels: the stature of New World amphibians. NatureServe, Arlington, Virginia, USA.