

Slim SAÏDI¹
Dominique LOUPPE^{2,3}
Sébastien LE BEL^{2,3}

¹ Geomatics & Range
Ecology Consulting
34000 Montpellier
France

² Cirad,
UPR Forêts et Sociétés, Campus
International de Baillarguet
34398 Montpellier Cedex 5
France

³ Forêts et Sociétés, Univ Montpellier,
CIRAD
Montpellier
France

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Slim Saïdi – saidi@slimconsult.fr

Approcher la densité des ligneux par l'indice perpendiculaire de végétation : cas d'une savane arborée au nord de la Tanzanie



Photo 1.
Remontées salines au voisinage de Namalok.
Photo D. Louppe.

Doi : 10.19182/bft2018.337.a31629 – Droit d'auteur © 2018, Bois et Forêts des Tropiques – Date de soumission : 23 décembre 2016 ;
date d'acceptation : 18 janvier 2018 ; date de publication : 1^{er} juillet 2018.



Licence Creative Commons :
Attribution - Pas de Modification 4.0 International.
Attribution-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-ND 4.0)

Citer l'article / Cite the article

Saïdi S., Louppe D., Le Bel S., 2018. Approcher la densité des ligneux par l'indice perpendiculaire de végétation : cas d'une savane arborée au nord de la Tanzanie. Bois et Forêts des Tropiques, 337 : 39-51. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2018.337.a31629>

RÉSUMÉ

Approcher la densité des ligneux par l'indice perpendiculaire de végétation : cas d'une savane arborée au nord de la Tanzanie

Le domaine de Namalok (4 500 ha), situé au nord-est de la Tanzanie, a été protégé par TPC Limited, une société sucrière privée, pour en faire une réserve privée de faune et de flore. La végétation locale est constituée de savanes arbustives à *Salvadora persica*, de fourrés de *Suaeda monoica* et de savanes arborées plus au moins denses à *Acacia xanthophloea*, *Faidherbia albida* et *Acacia tortilis*. Afin de répondre à un objectif de gestion suite à la réintroduction de grands herbivores, la composition floristique de ces formations ligneuses a été étudiée en association avec une approche cartographique du degré d'accessibilité des formations ligneuses par les herbivores, exprimé en classes de densité établies selon l'indice perpendiculaire de végétation (IPV). Les résultats révèlent tout d'abord une corrélation très élevée entre la densité calculée des ligneux et l'IPV ($r^2 = 0,96$) et confirment l'intérêt de l'approche proposée d'analyse d'images satellitaires. Dans une perspective plus locale, ils montrent aussi que, sur le plan floristique, les niveaux successifs des densités cartographiées sont composés de 70 espèces végétales et relèvent d'un fond floristique d'espèces pantropicales. Ces savanes montrent également une distribution spécifique relativement équitable et très diverse, avec des fréquences spécifiques voisines les unes des autres. Les savanes arborées représentent 38 % de la surface du domaine. Par ordre croissant de densité, les savanes de moins de 100 arbres/ha couvrent 836 ha, celles comptant 100 à 200 arbres/ha occupent 654 ha et celles ayant des densités de 200 à 300 arbres/ha sont assez peu importantes et n'occupent que 206 ha. Les savanes de densité supérieure à 300 arbres/ha représentent des étendues beaucoup moins vastes, soit seulement 22 ha.

Mots-clés : *Acacia xanthophloea*, composition floristique, densité des ligneux, cartographie, Namalok, Tanzanie.

ABSTRACT

Estimating tree density with the Perpendicular Vegetation Index: application to the tree savannahs of northern Tanzania

The 4,500-hectare Namalok estate in north-eastern Tanzania has been protected as a private fauna and flora reserve by a private sugar company, TPC Limited. The local vegetation is *Salvadora persica* tree savannah with copses of *Suaeda monoica* and some more or less dense tree savannah with *Acacia xanthophloea*, *Faidherbia albida* and *Acacia tortilis*. For management purposes following the reintroduction of large herbivores, their access to the wooded formations was mapped and a study was made of the floristic composition of the wooded areas using the Perpendicular Vegetation Index (PVI). The results show a very high correlation between the calculated density of the woody vegetation and the PVI ($r^2 = 0.96$) and confirm the validity of the proposed approach based on analyses of satellite imagery. For more local purposes, our results also show that, concerning floristic composition, the successive density levels mapped are made up of 70 different plant species belonging to the range of pantropical flora. These savannah formations also show a fairly even distribution of highly diverse species, with very similar species frequencies. The different types of tree savannah cover 38 % of the area of the estate. In increasing order of density, savannah areas with less than 100 trees/ha cover 836 ha, those with 100 - 200 trees/ha cover 654 ha, while those with densities of 200 - 300 trees/ha are fairly small and occupy only 206 ha. Savannah areas with densities of more than 300 trees/ha are much smaller and cover just 22 ha.

Keywords: *Acacia xanthophloea*, floristic composition, woodland density, mapping, Namalok, Tanzania.

S. SAÏDI, D. LOUPPE, S. LE BEL

RESUMEN

Estimación de la densidad arbórea con el índice de vegetación perpendicular: aplicación a sabanas arboladas del norte de Tanzania

El estado de Namalok, de 4 500 hectáreas y situado al nordeste de Tanzania, ha sido protegido como reserva privada de fauna y flora por una empresa de azúcar, TPC Limited. La vegetación local es una sabana arbolada de *Salvadora persica* con bosquetes de *Suaeda monoica* y alguna sabana arbolada más o menos densa con *Acacia xanthophloea*, *Faidherbia albida* y *Acacia tortilis*. Para la gestión posterior a la reintroducción de grandes herbívoros, se cartografió el acceso de estos herbívoros a las formaciones boscosas y se realizó un estudio de la composición florística de las áreas boscosas mediante el índice de vegetación perpendicular (IVP). Los resultados muestran una correlación muy elevada entre la densidad calculada de vegetación boscosa y el IVP ($r^2 = 0,96$), y confirman la validez del planteamiento propuesto basado en el análisis de imágenes de satélite. Para enfoques más locales, nuestros resultados también muestran que, en cuanto a la composición florística, los niveles de densidad sucesivos cartografiados constan de 70 especies de plantas diferentes pertenecientes a la flora pantropical. Las formaciones de sabana también muestran una distribución bastante uniforme de especies muy diferentes, con frecuencias específicas muy similares entre especies. Los diferentes tipos de sabanas arboladas cubren el 38 % de la superficie del estado. En orden creciente de densidad, las zonas de sabana con menos de 100 árboles/ha ocupan 836 ha, las de 100-200 árboles/ha ocupan 654 ha, mientras que las que tienen densidades de 200-300 árboles/ha son bastante pequeñas y ocupan solo 206 ha. Las superficies de sabana con densidades de más de 300 árboles/ha son mucho más pequeñas y ocupan únicamente 22 ha.

Palabras clave: *Acacia xanthophloea*, composición florística, densidad de superficie arbolada, cartografía, Namalok, Tanzania.

Introduction

La présente étude a été menée dans le domaine de Namalok, propriété de la société sucrière privée « TPC Limited ». Ce domaine, mis en défens en 2004 dans le but d'en faire une réserve privée de faune et de flore, couvre 4 500 ha au nord de la Tanzanie.

Dans le cadre de son développement, TPC Limited prévoit d'aménager durablement le domaine de Namalok afin de préserver ses habitats naturels et d'assurer le maintien et le renouvellement des différentes espèces végétales. À cet effet, la réintroduction de grands herbivores sauvages est envisagée dans un but de tourisme de vision, fondé sur une éthique de l'environnement comprenant la protection et la conservation de cet écosystème.

Pour atteindre cet objectif de gestion, il est indispensable de s'interroger non seulement sur la composition floristique des formations ligneuses du domaine, mais aussi sur leur degré d'accessibilité, en l'occurrence sur la notion de densité des ligneux à l'hectare.

Il ne s'agit nullement ici de présenter les caractéristiques structurales de ces savanes arborées (densités par classe de hauteur, densités par classe de diamètre ou encore densité des tiges d'avenir) mais d'identifier, grâce à une approche spatiale, les surfaces qui s'avèreraient déterminantes ou marginales pour les grands herbivores dans la perception de l'espace pâturé. En effet, en saison sèche, la dynamique spatiale de ces grands animaux est fonction de leur perception de l'espace pâturé, selon un certain seuil de densité ligneuse (Poilecot *et al.*, 2013). C'est dans cette perspective de planification que nous avons cartographié la distribution spatiale des niveaux successifs de densité des ligneux, ce que permet l'utilisation de l'indice perpendiculaire de végétation (IPV). Nous avons ensuite analysé la composition floristique de ces formations arborées par l'utilisation des indices de diversité de Shannon et Weaver (1963) et d'équitabilité (régularité) de Pielou (1966).

Notre intervention s'est limitée à la seule observation des peuplements ligneux car, en saison sèche, ces savanes arborées demeurent la seule ressource alimentaire pour les grands herbivores à introduire. Les graminées mûres desséchées sont extrêmement pauvres en protéines, phosphore et carotène, et ne peuvent couvrir les besoins d'entretien de ces grands animaux.

Ces savanes arborées sont essentiellement dominées par des *Acacia xanthophloea* (encadré 1) et plus localement par *Faidherbia albida* et *Acacia tortilis* (Loupe et Le Bel, 2015).

En saison sèche, ce type de savane arborée offre une importante quantité de fourrage, de l'ordre de 849 kg/ha/an. Ce taux de production primaire nette peut atteindre 1 573 kg/ha/an en saison humide (Robin et Pellew, 1980). En effet, *A. xanthophloea*, dont la plupart des racines sont situées dans les couches supérieures du sol (Otieno *et al.*, 2005), présente très rapidement, dès les premières pluies, de vigoureuses repousses végétales dont le contenu en protéines reste particulièrement élevé (Dougall *et al.*, 1964).

Ces formations ligneuses sont régulièrement fréquentées par de nombreuses espèces d'herbivores lourds tels que la girafe de Rothschild (*Giraffa camelopardalis rothschildi*), le rhinocéros noir (*Diceros bicornis*) et plusieurs autres mammifères (Dharani *et al.*, 2009).

L'impact du pâturage de ces grands animaux réduit la hauteur de la canopée des individus de *A. xanthophloea* et favorise la régénération des semis (Dharani *et al.*, 2006). Ce type d'action est également tributaire de la perception qu'ont ces animaux du degré d'accessibilité de ces formations ligneuses (Poilecot *et al.*, 2013). Ainsi, l'approche cartographique des niveaux successifs de densité du peuplement à *A. xanthophloea*, proposée à travers cet article et combinée à une analyse du cortège floristique, présente l'avantage de répondre à un premier niveau de contrainte, celui de la connaissance du type de fourrage ligneux existant et, surtout, du degré d'accessibilité de l'espace pâturé. Sur ces bases, des propositions de gestion et de calcul de charge animale pourront alors être formulées en tenant compte de la hiérarchisation des enjeux écologiques présents.

Zone d'étude

Le domaine de Namalok couvre 4 500 ha. Il est situé au nord-est de la Tanzanie, au sud du Kilimandjaro et de Moshi, entre les coordonnées 3,59° Sud - 37,33° Est et 3,52° Sud - 37,4° Est, dans le district de Marangu, sur une pénélaine culminant à 685 m d'altitude (figure 1).

Le climat est de type tropical aride avec des précipitations de 400 à 450 mm, caractérisées par une variabilité interannuelle élevée. Les pluies sont réparties en deux saisons, avec une grande saison des pluies, centrée sur la période de mars à mai, suivie d'une saison pluvieuse plus courte de novembre à décembre (figure 2). Les températures maximales moyennes dépassent 30 °C entre octobre et avril, et les températures minimales moyennes descendent sous les 20 °C entre mai et octobre.

Encadré 1. *Acacia xanthophloea*.

Originaire de la majorité des zones arides et semi-arides d'Afrique de l'Est, *Acacia xanthophloea* ou « yellow fever tree » est un arbre de la famille des Mimosaceae qui croît sur des sols alluviaux d'argile noire et affectionne les localités marécageuses, les ripisylves, dans les plaines inondables ou dans des dépressions avec remontées de nappes (Mutangah, 1994 ; Mutangah et Agnew, 1996). Cette espèce peut atteindre 26 m de haut (Coe et Beentje, 1991) ; son tronc dépasse rarement 60 cm de diamètre ; son écorce, lisse et légèrement écaillée, est de couleur jaune citron à jaune verdâtre (Maua et Ngazi, 2009).

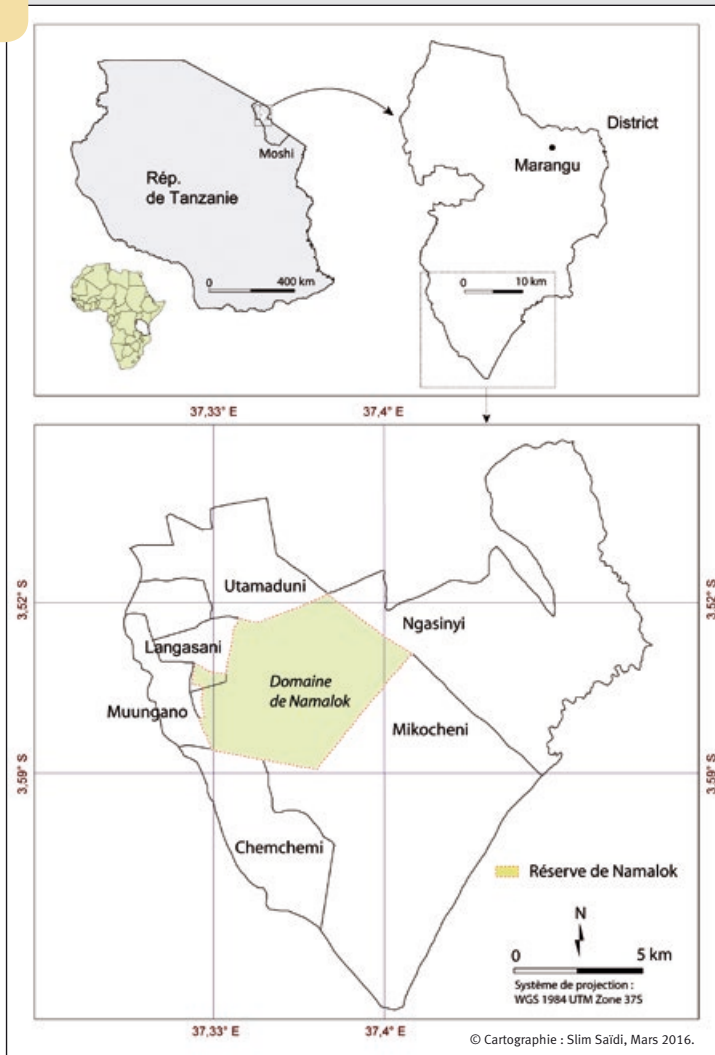


Figure 1.
Localisation géographique de la zone d'étude,
au sud du Kilimandjaro, en Tanzanie.

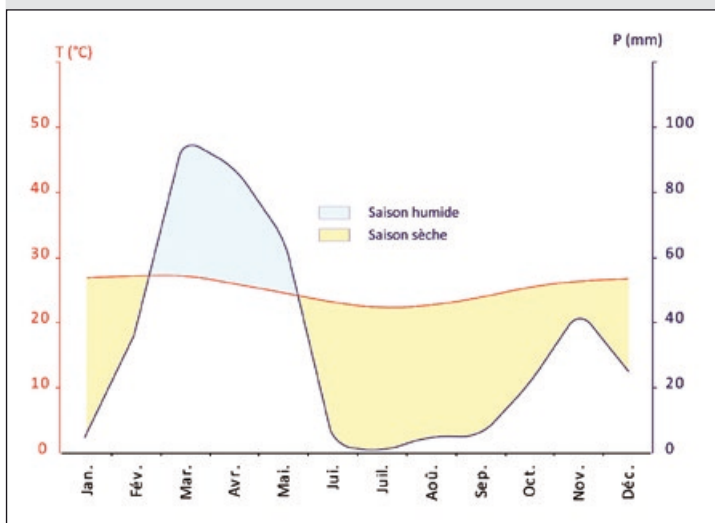


Figure 2.
Diagramme ombrothermique (station météorologique
de Arusha Chini, de 1974 à 2012). Source : TPC Limited.

Les sols sont d'origine volcanique (piedmont du Kilimandjaro) et ont tendance à se saliniser à cause de l'alternance de saisons sèches et pluvieuses (Legros, 2007). La rivière Kikuletwa, qui descend du mont Méru, volcan voisin, est fortement chargée en sel et alimente en partie la nappe phréatique dans la zone d'étude où les sols présentent de hauts niveaux de salinité et de sodicité. Le taux de sodium échangeable passe de 4 % à plus de 30 % selon les localisations. La conductivité électrique (mS/m) est comprise entre 50 et 100 dans les 60 premiers centimètres du sol et dépasse localement 600 (source : TPC Limited). En saison des pluies, l'engorgement du sol provoque des remontées salines, surtout là où la nappe phréatique est à faible profondeur (photo 1). Dans des situations comparables, des taux très élevés de Na^+ , K^+ , Cl^- et SO_4^{2-} solubles dans l'eau et une conductivité électrique de 170 mS/m (Western et Praet, 1973 ; Mills, 2006) provoquent le dépérissement des individus de *A. xanthophloea*.

Matériel et méthode

Données floristiques

Les observations au sol de la végétation ligneuse, composée d'une mosaïque de formations arborées de taille et de densité variables, ont été réalisées selon un dispositif d'échantillonnage de type systématique (Godron *et al.*, 1968 ; Gounot, 1969 ; Frontier, 1983). Les relevés, distribués de manière régulière, sont espacés de 600 m selon une grille orientée nord-sud et est-ouest. Le choix de cette distance (Poilecot *et al.*, 2009) vise essentiellement à ne pas négliger l'hétérogénéité floristique du site. Chaque relevé est ainsi géoréférencé et a pu être positionné sur l'image satellite du site (figure 3).

Parmi les 94 relevés effectués, seuls ceux relatifs aux formations comportant une composante ligneuse ont été retenus pour cette étude, soit 50 relevés. Chaque relevé a été réalisé dans une placette circulaire de 1 000 m², matérialisée par une corde de 17,8 m tournant autour d'un jalon planté au point GPS (Bellefontaine *et al.*, 2000 ; Poilecot *et al.*, 2009). L'identification de tous les taxons a été réalisée en conformité avec la flore de Coates-Palgrave (2003).

La fréquence spécifique est traduite par le rapport entre le nombre de relevés dans lesquels l'espèce *i* est présente et le nombre total de relevés. Elle est donnée par le quotient suivant (Lamotte, 1962) :

$$FS_i = 100 \times P_i / N$$

Avec FS_i : fréquence de l'espèce *i* ; P_i : nombre de relevés dans lesquels l'espèce *i* est présente ; N : nombre total de relevés.

L'une des caractéristiques essentielles de tout peuplement est son degré d'organisation. Celui-ci se traduit par la distribution des abondances spécifiques, de l'espèce la plus abondante à l'espèce la plus rare. L'indice de diversité de Shannon et Weaver (H') rend compte de cette inégale répartition (Shannon et Weaver, 1963). C'est le rapport entre le nombre d'espèces et le nombre d'individus d'une même population. Il est fonction de la fréquence relative des espèces qui est la probabilité P_i de présence de chaque espèce *i* par rapport au nombre total d'individus. Il est donné par la formule suivante :

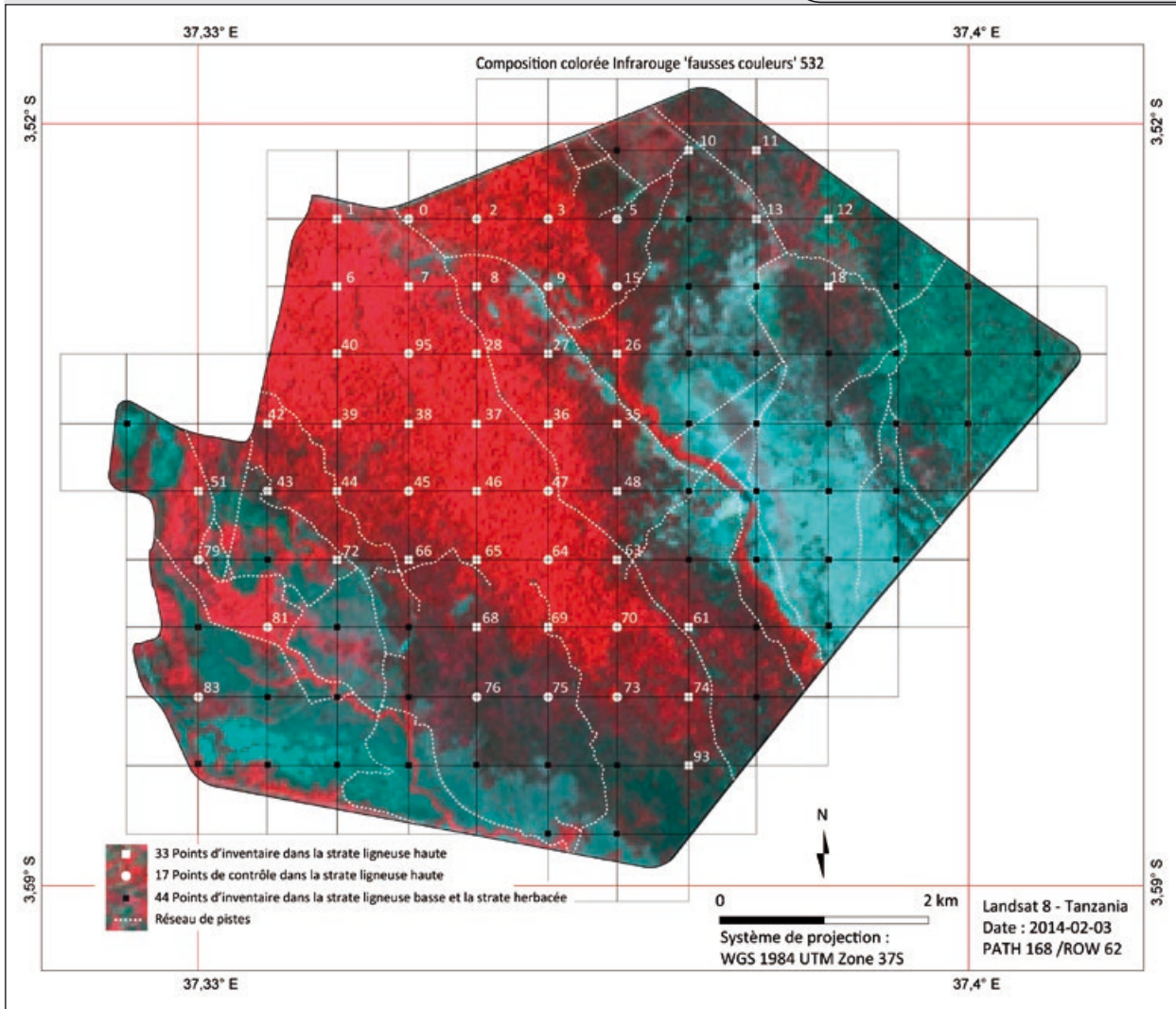


Figure 3.
 Plan d'échantillonnage global du domaine de Namalok (Landsat 8 en fausses couleurs).

$$H' = - \sum ((N_i / N) \times \log_2 (N_i / N))$$

Avec N_i : nombre d'individus d'une espèce donnée ; i allant de 1 à s (s : nombre total d'espèces) ; N : nombre total d'individus.

Les diversités végétales sont comparées par la régularité spécifique (équité) de Pielou (1966), qui est le rapport entre la diversité (H') mesurée sur le site et la valeur du maximum théorique possible de cette diversité (H'_{\max}). Il se calcule par le quotient suivant :

$$R = H' / H'_{\max} = H' / \log_2 (S)$$

Avec R : régularité spécifique comprise entre 0 et 1 ; H' : indice de Shannon ; H'_{\max} : valeur maximale possible de H' ; S : richesse spécifique.

La diversité est maximale dans un peuplement lorsque toutes les espèces de celui-ci présentent le même nombre d'individus. À l'inverse, un peuplement dont une espèce est majoritairement dominante donne lieu à un indice de diversité faible (Barbault, 1995). La régularité spécifique (R)

correspond à la diversité relative et varie entre 0 et 1. Elle tend vers 0 quand la quasi-totalité des effectifs est concentrée sur une espèce (une seule espèce domine). Elle est égale à 1 lorsque toutes les espèces ont la même abondance.

Données satellitaires

Le choix de l'image satellite a été fonction du coût d'acquisition, qui conditionne la mise en œuvre des méthodes utilisées et leur répétitivité dans le temps, de la résolution spatiale, qui détermine la taille du plus petit élément détectable, et, enfin, de la date de prise de vue, qui rend compte de l'état de la végétation et de sa réponse aux radiations solaires. Le système Landsat a été choisi du fait de sa haute résolution spatiale (15-100 m) et multispectrale (4 à 11 canaux d'observation), avec l'avantage d'être en libre accès. L'USGS¹ distribue des données Landsat 8 corrigées des effets atmosphériques ; cependant, ces données ne sont pas en libre accès et doivent être commandées. Notre choix

¹ United States Geological Survey.

s'est donc porté sur un produit Landsat-8 OLI (*Operational Land Imager*) directement accessible, sur lequel nous avons appliqué différents niveaux de prétraitements (voir ci-dessous). La date des prises de vue (03/02/2014) correspond à la reprise de végétation et est antérieure de quelques mois à la période d'inventaire sur le terrain (mai-juin 2014).

Corrections géométriques

La rectification des distorsions géométriques liées aux instruments de mesure repose sur la localisation de points invariants. Six points (croisements de routes, de pistes) ont été choisis, bien répartis sur toute la zone étudiée, et relevés sur le terrain par GPS. Cette méthode utilise une fonction de transformation d'un système de coordonnées arbitraire en un système de coordonnées conventionnel (projection cartographique). La procédure utilise une fonction polynomiale pour déterminer les transformations qui ajustent au mieux l'image au système de coordonnées choisi. C'est par le calcul de l'écart entre la position des amers (points de repère fixes), dans l'image à rectifier et dans le fichier de référence, qu'on établit les formules de transformation pour passer d'un référentiel à l'autre. Le référentiel spatial UTM fuseau 34 Nord (*Universal Transverse Mercator*) a été adopté. La précision ainsi obtenue par rapport à la réalité du terrain est de l'ordre de 3 m.

Corrections radiométriques

Les défauts radiométriques, ponctuels ou en lignes, dus essentiellement au capteur embarqué, n'ont pas été corrigés car l'image acquise était de très bonne qualité, sans aucune couverture nuageuse. Cependant, l'étalonnage des données du capteur, visant à exprimer le rayonnement réfléchi ou émis vers ce capteur en luminances (valeurs absolues mesurées en $W/m^2/sr/\mu m$) et en réflectances (valeurs relatives, dites « exo-atmosphériques », au-dessus de l'atmosphère) de chaque bande spectrale, a été réalisé selon la double formule suivante :

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

Avec L_{λ} : luminance ; M_L : *Radiance-Mult-Band* de chaque bande spectrale ; A_L : *Radiance_Add_Band* de chaque bande spectrale ; Q_{cal} : compte numérique de chaque pixel (*Digital Number*).

$$\rho_p = (\pi \times L_{\lambda} \times d^2) / (ESUN_{\lambda} \times \cos \theta_s)$$

Avec ρ_p : réflectance au-dessus de l'atmosphère (*Top of Atmosphere*) ; L_{λ} : luminance ; d^2 : distance terre-soleil en unité astronomique ; $ESUN_{\lambda}$: *Mean solar exo-atmospheric irradiances* ; θ_s : angle zénithal solaire en degrés.

Corrections atmosphériques

Comme tous les capteurs opérant dans le domaine spectral de l'émission solaire, celui du satellite Landsat 8 (OLI) mesure la luminance réfléchi par l'ensemble de la Terre et de l'atmosphère éclairé par le soleil. Le signal radiométrique tient compte de la réflectance de la surface terrestre mais également des effets de l'atmosphère qui interviennent lors du parcours du rayonnement solaire à travers l'atmosphère (soleil - surface terrestre - capteur). De ce fait, la conversion des données d'un capteur, en luminance ou en réflectance, ne fournit qu'un signal composite de l'objet ciblé. Le but des

corrections est d'extraire du signal de la cible une information indépendante des effets de l'atmosphère.

Le logiciel de correction atmosphérique utilisé pour le traitement et l'analyse de l'image Landsat est ATCOR (*ATmospheric CORrection*) version 3, développé au centre aérospatial allemand (DLR) de Wessling (Richter, 1996, 1997, 2005). Cette version permet de prendre en compte la topographie de la scène. La procédure de correction repose sur des tables de correspondance (*Look up tables*) calculées avec le code atmosphérique MODTRAN-4 (Berk *et al.*, 2003) pour le calcul des paramètres atmosphériques (transmittances, éclaircissements et luminances dus à la diffusion atmosphérique, etc.). La vapeur d'eau est estimée par la méthode APDA (*Atmospheric Precorrected Differential Absorption*).

Deux algorithmes ont été utilisés : MASKING2, pour la création des masques des nuages et de la brume (*haze*), et HAZEREM, pour les corrections empiriques des effets de brume sur la luminance mesurée des pixels sous le masque de la brume. Quant aux effets topographiques sur les réflectances, deux autres algorithmes sont disponibles dans ATCOR : TERSETUP pour la création des images des pentes, orientations et facteur de visibilité du ciel, et ILLUMCAST pour ajuster l'éclaircissement solaire direct incident à chaque pixel. Leur utilisation n'a toutefois pas été nécessaire puisque le domaine de Namalok est relativement plat.

Indice perpendiculaire de végétation (IPV)

Une méthode simple pour évaluer l'importance du boisement d'un espace donné est d'estimer la densité des ligneux (nombre d'arbres par hectare) par télédétection. Cette méthode adoptée par différents auteurs sur de vastes étendues de savanes arborées (Poilecot *et al.*, 2009, 2013) est basée sur l'utilisation de l'IPV (Richardson et Wiegand, 1977).

La végétation réfléchit fortement dans le proche infrarouge et absorbe fortement dans le rouge (Darvishzadeh *et al.*, 2008), mais le sol nu réfléchit également dans ces longueurs d'onde. La réflectance du sol nu varie proportionnellement à son taux d'humidité. Cette réflectance peut être représentée par une droite dans le plan des longueurs d'onde du rouge/proche infrarouge. Le calcul de cet indice a pour but de diminuer fortement la signature spectrale des sols nus et de ne conserver que celle de la végétation. Autrement dit, cela revient à calculer la distance euclidienne entre un point correspondant à la réflectance de la végétation et une droite, laquelle correspond à la réflectance du sol nu dans ces longueurs d'onde (Gintzburger *et al.*, 2009 ; Saïdi et Gintzburger, 2013). L'IPV se calcule par l'équation suivante :

$$IPV = \frac{(PIR - aR - b)}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

Avec PIR : réflectance dans le canal proche infrarouge ; R : réflectance dans le canal du rouge ; a : pente de la droite des sols ; b : ordonnée de la droite des sols.

Une fois la droite des sols calculée, la valeur de l'IPV est déduite pour chaque pixel de l'image satellitaire de Namalok. Cet indice (figure 4) varie entre -1 et 1. Un IPV > 0 signifie que le pixel est recouvert par de la végétation, un IPV nul correspond aux sols nus et un IPV < 0 reflète des surfaces en eau de très faible teneur minérale ou chlorophyllienne (algues).

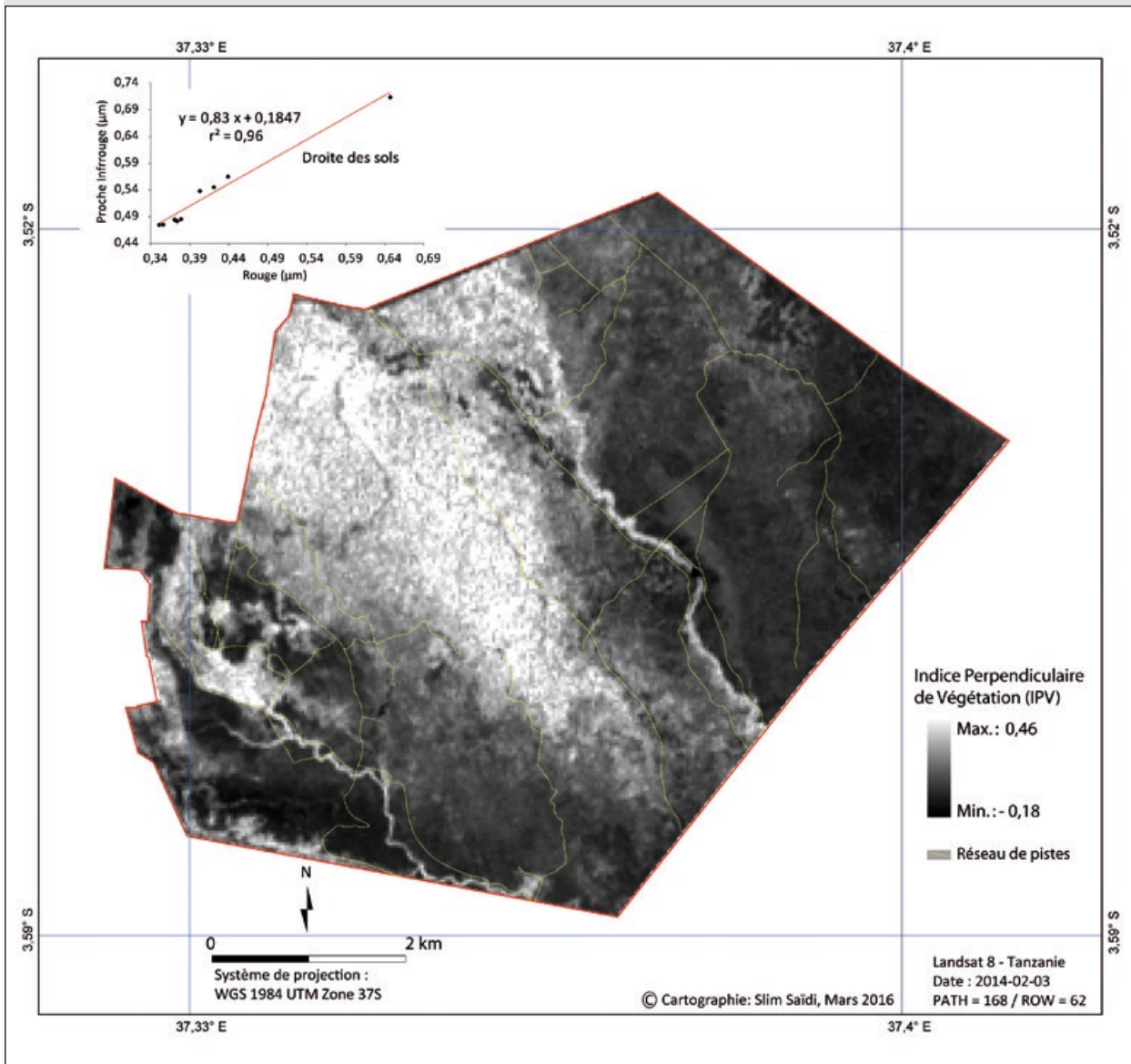


Figure 4.
 L'indice perpendiculaire de végétation (IPV).

Résultats

Cartographie de la densité des ligneux

La représentation cartographique de la densité des ligneux est basée sur l'inventaire de 33 placettes mises en relation avec les valeurs moyennes de l'IPV (figure 5). L'équation de la relation est donnée par le modèle suivant :

$$Dc = 13,53 \times e^{19,4 \times IPV}$$

$$r^2 = 0,96$$

Avec Dc : densité calculée ; IPV : valeurs moyennes de l'indice perpendiculaire de végétation.

Comme cet indice élimine la réflectance des sols nus (Otterman, 1996), il possède une relation hautement significative avec l'indice de surface foliaire (LAI : *Leaf Area Index*). Il permet donc une bonne discrimination de la végétation puisqu'il est proportionnel à la biomasse végétale présente.

Avec le logiciel Erdas Imagine utilisé pour le traitement d'image, la mise en relation des valeurs moyennes de l'IPV avec les densités mesurées a été réalisée sur des zones de 7 x 7 pixels, soit une surface de 4 ha. Cette surface constitue non seulement un point important dans la classification, mais permet également de compenser l'incertitude de localisation géographique des relevés de terrain (Saïdi et Gintzburger, 2013). Plus cette surface est grande et homogène, meilleure est la segmentation des classes de densité.

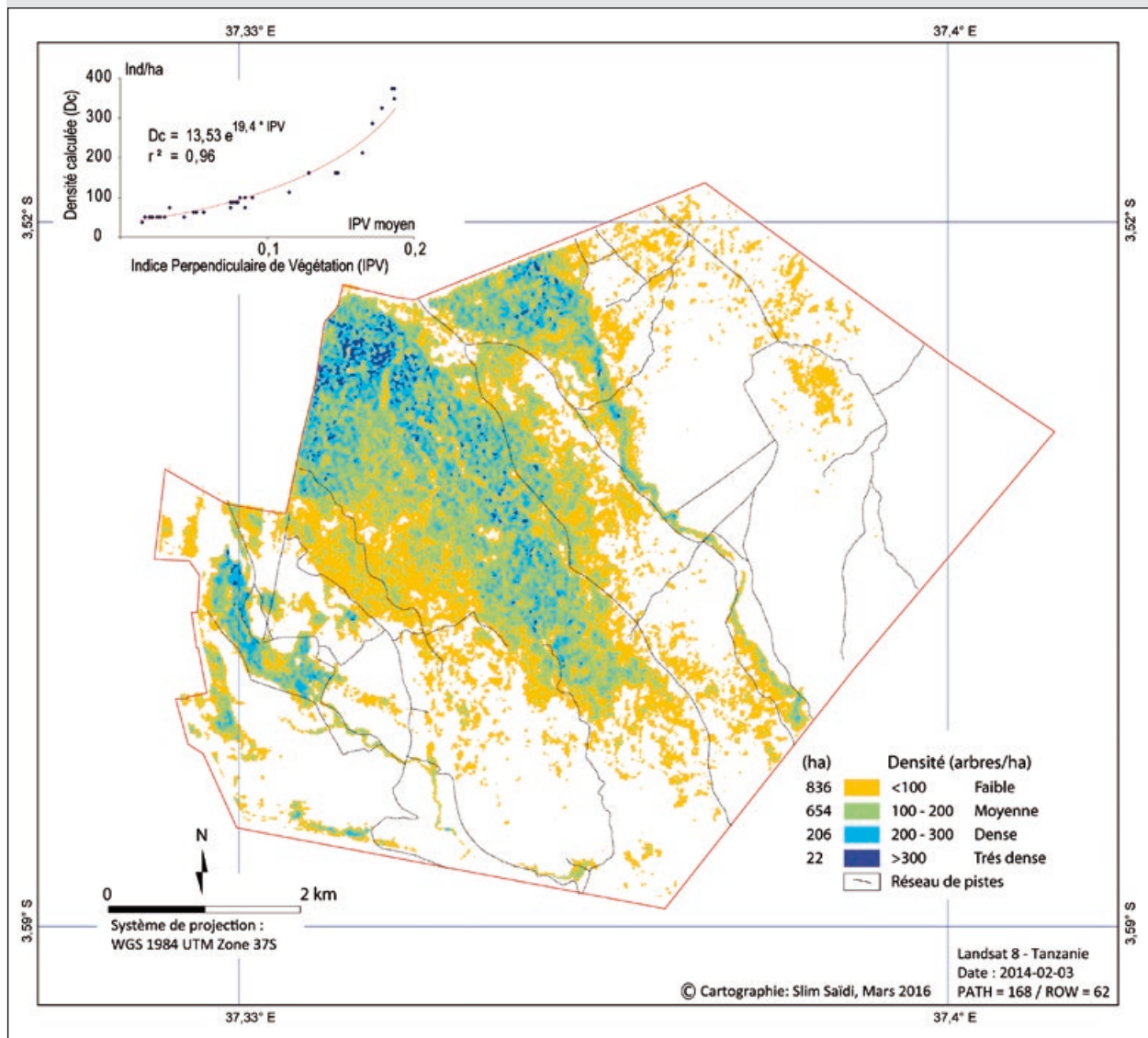


Figure 5.
Distribution géographique des densités ligneuses dans le domaine de Namalok.

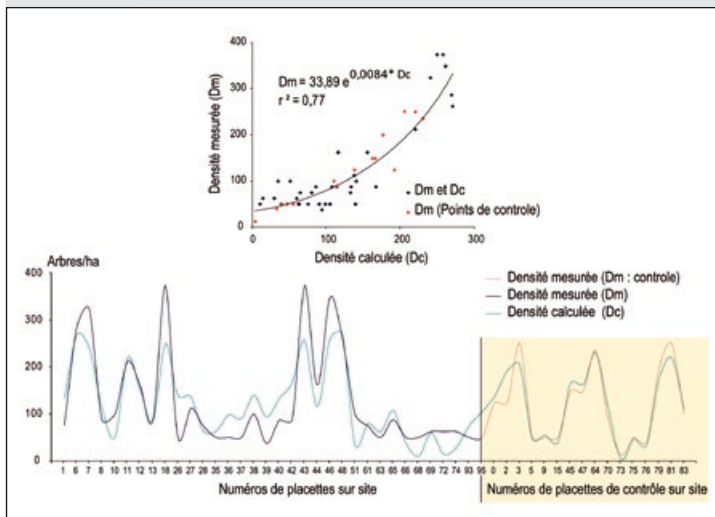


Figure 6.
Relation entre les densités mesurées (arbres/ha)
et celles calculées.

À partir de ce modèle, une estimation cartographique de la densité des arbres du domaine de Namalok a été réalisée (figure 5). Cette estimation a été validée par la comparaison des trajectoires suivies par les densités mesurées sur le terrain avec celles calculées par le modèle (figure 6). À cette fin, 17 points de contrôle supplémentaires, mesurés sur site et n'ayant pas servi pour le calcul du modèle, ont été également utilisés afin de pouvoir renforcer cette validation. L'erreur standard entre les valeurs des densités mesurées et celles calculées était en moyenne de ± 31 arbres/ha.

La carte ainsi produite (figure 5) révèle que les deux premières classes dont les densités demeurent ≤ 200 arbres/ha occupent la majorité de la surface arborée du site, soit 1 490 ha. Les classes de densité > 200 arbres/ha couvrent une surface nettement plus restreinte de 228 ha.

Tableau I.
 Fréquences spécifiques (> 20 %) selon les classes de densité d'arbres.

	Classes de densité de ligneux			
	< 100 N = 19	100-200 N = 18	200-300 N = 8	> 300 N = 5
Strate arborée				
<i>Acacia xanthophloea</i> Benth.	33	76	71	50
<i>Faidherbia albida</i> (Delile) A. Chev.	28	47	29	50
<i>Dalbergia melanoxylon</i> Guill. & Perr.	28	-	-	-
<i>Ficus sycomorus</i> L.	-	-	29	50
<i>Acacia tortilis</i> (Forssk.) Hayne	50	-	-	-
Strate arbustive				
<i>Vernonia cinerascens</i> Sch. Bip.	44	71	43	50
<i>Achyranthes aspera</i> L.	56	82	29	75
<i>Azima tetra-cantha</i> Lam.	56	59	43	-
<i>Suaeda monoica</i> Forssk. ex J.F. Gmel.	56	41	29	-
<i>Salvadora persica</i> L.	78	53	-	25
<i>Lantana camara</i> L.	-	29	43	-
<i>Senna bicapsularis</i> (L.) Roxb.	-	24	29	-
<i>Cordia sinensis</i> Lam.	33	-	-	-
<i>Acacia mellifera</i> (Vahl) Benth.	22	-	-	-
<i>Grewia bicolor</i> Juss.	-	-	-	50
<i>Vernonia colorata</i> (Willd.) Drake	-	-	-	75
<i>Vepris simplicifolia</i> (Verd.) Mziray	-	-	29	-
<i>Commicarpus plumbagineus</i> (Cav.) Standl.	-	53	57	75
<i>Solanum incanum</i> L.	-	-	-	50
Strate herbacée				
<i>Cucumis</i> sp.	22	35	71	50
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	-	-	29	-
<i>Cenchrus ciliaris</i> L.	22	-	-	-
<i>Trianthema ceratosepala</i> Volkens & Irmsch.	-	-	-	25
<i>Eragrostis tenuifolia</i> (A.Rich.) Steud.	-	-	-	25
Indicateurs floristiques				
Diversité spécifique <small>moyenne</small>	1,5 (± 0,6)	1,6 (± 0,4)	1,5 (± 0,45)	1,5 (± 0,4)
Régularité spécifique <small>moyenne</small>	0,7 (± 0,1)	0,8 (± 0,1)	0,8 (± 0,1)	0,8 (± 0,05)

N : nombre de placettes inventoriées dans chaque classe.

Composition floristique des classes de densité

Les formations ligneuses du domaine de Namalok occupent des sols salins dont certains sont temporairement inondés. Elles sont principalement constituées d'une mosaïque de savanes arborées plus au moins denses à *A. xanthophloea* (photo 2), *A. albida*, *Dalbergia melanoxylon* et arbustives à *Salvadora persica*, *Azima tetra-cantha*, et de fourrés à *Suaeda monoica*, appelés localement « *magadi bush* ».

Basée sur le nombre de placettes qu'elle renferme, la végétation de chaque classe de densité cartographiée est décrite selon deux indicateurs : la diversité floristique et la fréquence spécifique.

Parmi les 70 espèces végétales recensées, 12 sont de grands arbres pouvant atteindre 35 m de haut, 35 sont des arbustes de 5 à 14 m, et 23 sont des espèces herbacées (tableau I).



Photo 2.

Jeune peuplement dense d'*Acacia xanthophloea* régénéré naturellement sur une parcelle mise en défens.
Photo D. Louppe.

L'analyse du tableau I révèle que les zones à faible densité ligneuse (< 100 arbres/ha) ont des fréquences spécifiques élevées d'espèces de savane arborée claire à arbustive. Ce type de savane occupe une surface de 836 ha et semble marqué par la présence d'une strate arbustive dominée par *S. persica*, *A. tetraacantha*, *S. monoica* et *Vernonia cinerascens*. La strate arborée est composée de *A. tortilis*, *A. xanthophloea*, *F. albida* et *D. melanoxylon*. Les valeurs de l'indice de diversité sont légèrement dispersées autour de la valeur moyenne (tableau I). La valeur de la régularité spécifique moyenne est de 0,7, rendant compte d'un nombre sensiblement important d'espèces, avec une certaine stabilité de ce milieu.

Les zones à densité moyenne (100-200 arbres/ha) couvrent une surface de 654 ha et demeurent dans une certaine mesure à prédominance arbustive, malgré des fréquences spécifiques plus importantes de *A. xanthophloea* et *F. albida*. La structure de ces savanes arborées à arbustives est composée de *S. persica*, *Achyranthes aspera*, *Commicarpus plumbagineus*, *V. cinerascens*, *A. tetraacantha*, *S. monoica* et *Grewia bicolor* dans des proportions sensiblement significatives. Toutefois, on note une légère tendance à la hausse de la régularité spécifique de ces savanes (tableau I) qui semblent légèrement plus diversifiées que les précédentes.

Les zones relativement denses (200-300 arbres/ha) traduisent une abondance significative de *A. xanthophloea*. Ces savanes arborées denses sont assez peu importantes et occupent seulement 206 ha. Ces formations demeurent cependant caractérisées par la présence de certaines espèces de nature arbustive telles que *C. plumbagineus*, *V. cinerascens* et *A. tetraacantha*. Ce type de savane révèle des variations dans l'indice de Shannon moins marquées que celles des savanes arborées à arbustives.

Les zones les plus denses (> 300 arbres/ha) couvrent des étendues beaucoup moins vastes et occupent une superficie de 22 ha. Ce sont des savanes arborées très denses, voire des forêts claires essentiellement dominées par *F. albida*, *Ficus sycomorus* et *A. xanthophloea*. La régularité spécifique de ce type de savane boisée exprime une répartition homogène de sa flore. Plus cette distribution des espèces est équirépartie, plus l'indice de diversité est élevé.

À cette époque de l'année et sur l'ensemble de nos observations, l'écart entre la diversité mesurée sur le site (H') et la valeur du maximum théorique possible de cette diversité (H_{max}) montre une certaine convergence entre les fluctuations de la richesse spécifique traduite par ces deux indices (figure 7a). L'allure que suivent ces deux courbes révèle que le nombre d'individus tend vers une répartition relativement régulière entre les taxons. Les régularités moyennes mesurées oscillent entre 0,7 et 0,8 (tableau I) et traduisent un degré de diversité qui se rapproche dans une certaine mesure du maximum théorique. La courbe de la figure 7b nous informe sur la proportion de l'abondance totale des individus et montre une certaine richesse spécifique plus marquée au sein des savanes arborées à arbustives ayant des densités de 100 à 200 arbres/ha.

Discussion

L'extrapolation des trajectoires de la densité des ligneux du domaine de Namalok par l'utilisation de la dynamique de l'indice perpendiculaire de végétation (IPV) apparaît comme significative si l'on se réfère à la qualité de la relation entre les densités mesurées (en nombre d'arbres par hectare) et celles calculées (figure 5). Cependant, cet étalonnage empirique des données satellitaires demeure tributaire de la fiabilité du type d'échantillonnage adopté et de la représentativité des résultats obtenus (Bartholomé, 1989).

Même si aujourd'hui la correction des capteurs et des effets atmosphériques est bien maîtrisée, il n'est pas toujours aisé d'étalonner empiriquement des données satellitaires avec un appui sur le terrain réduit au minimum, comme c'est le cas pour certains indices de végétation exploités à l'état brut. La structure du couvert végétal n'est pas sans influence sur la relation « matériel végétal - indice de végétation ». En effet, la question de la couleur et du jaunissement du matériel végétal, celle de la présence des individus arborés pouvant être défeuillés au moment de la prise de vue (*A. tortilis* dans certains endroits du site), ou encore celle des individus arborés de très grande taille (*F. albida* et *F. sycomorus*), qui peuvent donner un IPV similaire à un peuplement dense d'arbres de plus petite taille, montrent bien la nécessité d'une description suffisamment détaillée du matériel végétal dans l'extrapolation cartographique des densités. À cela s'ajoute la nécessité de bien faire correspondre les observations au sol de la structure du couvert végétal avec le moment de la prise de vue.

L'un des problèmes majeurs pour l'application de la méthode utilisée est la détermination du nombre de placettes à inventorier pour atteindre une représentativité suffisante. Ce nombre dépend de l'homogénéité plus ou moins grande de la distribution des densités des types de savanes en présence. Nous avons évité ce problème en utilisant un échantillonnage systématique. Celui-ci a permis de couvrir de manière uniforme le terrain en maintenant une bonne distribution spatiale. Cependant, outre le calcul de l'erreur d'échantillonnage qui peut être biaisé si l'on n'y prête pas attention, ce type d'approche reste souvent recommandé dans les inventaires forestiers à grande échelle (Glèlè-Kakaï *et al.*, 2016).

La prise en compte de la mesure des densités à l'hectare des formations ligneuses du domaine nous est apparue plus précise que celle du recouvrement, indicateur

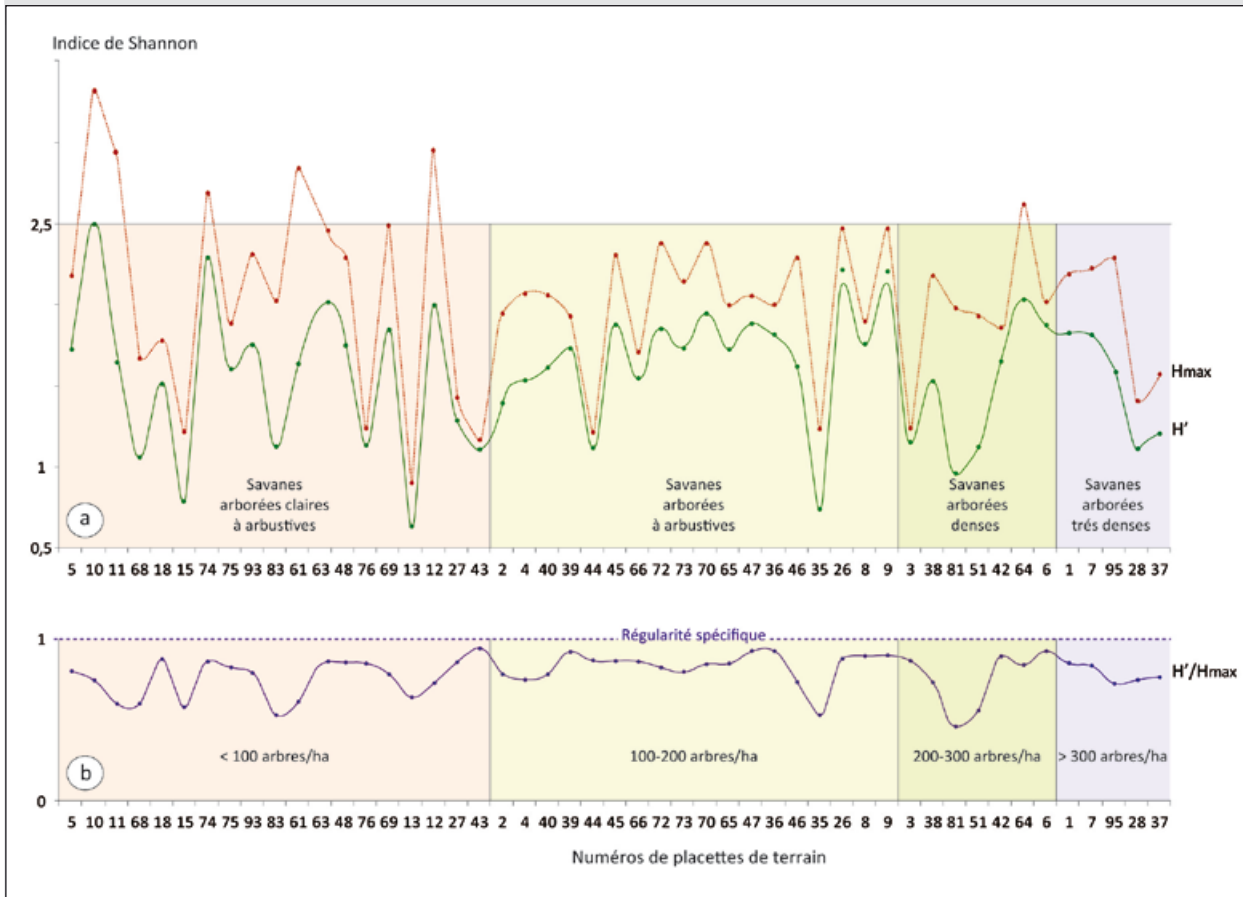


Figure 7.
 a) Allure de l'écart entre la diversité mesurée sur le site (H') et la valeur du maximum théorique (H_{max}). b) Rapport entre la diversité mesurée et la valeur du maximum théorique possible. Les relevés ont été classés selon leur appartenance aux différents types de savanes du site.

communément estimé par la mesure de la projection verticale au sol des houppiers. La mesure du recouvrement perd de sa fiabilité si la stratification du peuplement ligneux devient dense. Elle peut très vite, par endroits, devenir imprécise du fait de l'imbrication des différentes couronnes des individus arborés. Une relation fiable a été trouvée entre les valeurs moyennes de l'IPV et la densité des ligneux pour des savanes à *Acacia seyal* au sud-est du Tchad. Dans ces savanes boisées à *A. seyal*, Poilecot *et al.* (2013) montrent une corrélation raisonnable entre la densité des individus ligneux et les valeurs moyennes de l'IPV ($r^2 = 0,75$).

S'agissant de la surface de 49 pixels de 30 m de résolution (4 ha) qui localisent chacun de nos points de mesure, ce choix constitue non seulement un élément important dans la segmentation (plus cette surface est grande et homogène, meilleure est la segmentation des classes de densité), mais aussi un repère indispensable pour compenser l'incertitude de localisation géographique des relevés de terrain. Saïdi et Gintzburger (2013) ont montré l'importance de cette surface dans la fiabilité géographique des cartes produites.

Les savanes arborées représentent 38 % de la surface du domaine de Namalok. Par ordre croissant de densité, les savanes de densité inférieure à 100 arbres/ha totalisent 18,5 %, celles comptant 100 à 200 arbres/ha occupent 14,5 % et celles ayant des densités de 200 à 300 arbres/ha

couvrent seulement 4,6 % de la surface. Les savanes de densité supérieure à 300 arbres/ha représentent des étendues beaucoup moins vastes, soit seulement 0,5 %. Ces estimations de densité peuvent changer à mesure que les forêts d'*A. xanthophloea* mûrissent et se désintègrent (Mutangah et Agnew, 1996). L'engorgement du sol en saison des pluies provoque des remontées salines et conduit à long terme au dépérissement de ces grands arbres (Western et Praet, 1973).

Sur le plan floristique, ces niveaux successifs de densités offrent souvent une association de certaines espèces ligneuses telles que *F. albida*, *A. xanthophloea* et *A. tortilis* dont l'intérêt fourrager existe surtout dans les régions sèches (Le Houerou, 1980 ; Lawton, 1980). Ceci est typique des forêts d'*A. xanthophloea* en Afrique de l'Est (Mutangah, 1989 ; Belsky, 1989). Plus du tiers de nos observations (40 %) révèlent un indice de Shannon compris entre 1,7 et 2,5. L'allure que suit la courbe de la régularité spécifique (figure 7b) montre une certaine richesse spécifique plus marquée au sein des savanes arborées à arbustives ayant des densités de 100 à 200 arbres/ha. Cela implique que les abondances spécifiques demeurent voisines les unes des autres avec des individus sensiblement équirépartis. Cette hétérogénéité spécifique relative aux peuplements d'*A. xanthophloea* est également observée dans le parc national du lac Nakuru au Kenya (Mutangah et Agnew, 1996).

Conclusion

Recréer la structure spatiale de la densité des formations ligneuses du domaine de Namalok représentait l'objectif de la présente étude, à travers l'analyse de certains paramètres floristiques et géographiques ayant un intérêt particulier pour la gestion de ce domaine, celle-ci ayant été envisagée par TPC Limited dans le cadre d'un projet d'enrichissement faunistique à venir.

L'approche cartographique proposée est non seulement nécessaire pour détecter les changements dans la structure spatiale des savanes du domaine, mais elle est également un outil utile pour estimer leur degré d'accessibilité et identifier les surfaces qui s'avèreraient déterminantes ou marginales pour les grands herbivores dans leur perception de l'espace pâturé.

Si l'on se réfère à la figure 6, qui montre l'allure que suivent les courbes des valeurs de densités mesurées sur le terrain et celles calculées par le modèle, on peut penser que l'utilisation de la dynamique de l'IPV pour l'extrapolation des trajectoires de la densité des savanes arides du domaine de Namalok est envisageable. Cependant, ce type d'approche n'est pas toujours simple à mettre en œuvre, compte tenu des fluctuations spatio-temporelles des rayonnements. La carte des densités correspond à une image radiative instantanée et doit être complétée par des observations échelonnées dans le temps afin d'évaluer précisément les changements d'état de la structure spatiale de ces savanes, qui peut changer à mesure que les forêts d'*Acacia xanthophloea* mûrissent et se désintègrent.

Sur le plan floristique, l'analyse qualitative et quantitative des savanes arborées de Namalok révèle une distribution spécifique relativement équitable et diverse. Le fond floristique est dominé par des espèces pantropicales, comme *Acacia xanthophloea* et *Faidherbia albida*. L'inventaire effectué dans cette partie du domaine dévoile une richesse botanique de 70 espèces végétales, réparties sur quatre types de savanes ayant des niveaux de densité distincts, présentées dans la figure 7a.

Ce type de formation ligneuse est communément fréquenté par de nombreuses espèces d'herbivores lourds tels que la girafe de Rothschild et le rhinocéros noir. L'analyse des paramètres floristique retenus, combinée à une approche physique, permet d'une part une meilleure compréhension de la réalité de l'espace pâturé par ces grands animaux, et d'autre part rend possible l'estimation de leur nombre (charge animale) qui pourrait par la suite être évaluée par les gestionnaires de TPC Limited.

Remerciements

Nos remerciements vont à la société TPC Limited qui a financé cette étude et mis sa logistique à notre disposition. Nous remercions plus particulièrement Pierre Noël, Julien Rousset et Emmanuel Lyimo de TPC Limited pour leur accueil, leur soutien et leurs conseils, ainsi que l'ensemble des personnels qui ont participé aux travaux de terrain. Nous remercions aussi Lise Roche, stagiaire étudiante en foresterie tropicale, pour sa contribution à la récolte des données de terrain, ainsi que Joshua Mushi de MWEKA (College of African Wildlife Management) pour les déterminations botaniques et l'aide apportée lors des inventaires.

Références bibliographiques

- Barbault R., 1995. Écologie des peuplements. Structure et dynamique de la biodiversité. 2^e édition. Paris, France, Masson, 273 p.
- Bartholomé E., 1989. Calibration of vegetation indices for aPAR measurements using intrinsic satellite image information. *In*: Remote sensing for operational application. Proceedings of the 15th annual conference of the Remote Sensing Society, University of Bristol, 13-15 September 1989, 47-52. <https://www.researchgate.net/publication/235432861>
- Bellefontaine R., Gaston A., Petrucci Y., 2000. Management of natural forests of dry tropical zones. Rome, Italie, FAO, Conservation Guide 32, 328 p. <http://www.fao.org/docrep/005/w4442e/w4442e00.htm>
- Belsky A. J., 1989. Landscape patterns in a semi-arid landscape in East Africa. *Journal of Arid Environments*, 17: 265-270.
- Berk A., Anderson G. P., Acharya P. K., Hoke M. L., Chetwynd J. H., Bernstein L. S., *et al.*, 2003. MODTRAN4 Version 3. Revision 1 User's Manual. Hanscom, MA, USA, Air Force Research Laboratory. ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/Vorlesung%20K+S/MOD4_user_guide.pdf
- Coates-Palgrave M., 2003. Trees of Southern Africa, 3rd edition. Cape Town, South Africa, Struik Publishers, 1 212 p.
- Coe M. J., Beentje H., 1991. A Field Guide to the Acacias of Kenya. Oxford, United Kingdom, Oxford Forestry Institute, Oxford University Press, 148 p.
- Dharani N., Kinyamario J. L., Onyari J. M., 2006. Structure and composition of *Acacia xanthophloea* woodland in Lake Nakuru National Park, Kenya. *African Journal of Ecology*, 44 (4): 523-530. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2006.00668.x>
- Dharani N., Kinyamario I. J., Wagacha P. W., Rodrigues A. J., 2009. Browsing impact of large herbivores on *Acacia xanthophloea* Benth. in Lake Nakuru National Park, Kenya. *African Journal of Ecology*, 47 (2): 184-191. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2008.00954.x>
- Darvishzadeh R., Skidmore A., Atzberger C., Van Wieren S., 2008. Estimation of vegetation LAI from hyperspectral reflectance data: Effects of soil type and plant architecture. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10: 358-373. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2008.02.005>
- Dougall H. W., Drysdale V. M., Glover P. E., 1964. The chemical composition of Kenya browse and pasture herbage. *East African Wildlife Journal*, 2: 86-121. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.1964.tb00202.x>
- Frontier S., 1983. L'échantillonnage de la diversité spécifique. *In* : Stratégie d'échantillonnage en écologie. Paris, France, Masson, 494 p.
- Gintzburger G., Saïdi S., Soti V., 2009. Rangelands of the Ravnina region in the Karakum desert of Turkmenistan: Current condition and utilization. Tashkent, Uzbekistan, CGIAR-PFU, Sustainable agriculture in Central Asia and the Caucasus series: CGIAR-PFU 2, 98 p. <http://agritrop.cirad.fr/556722/>

- Glèlè-Kakaï R., Salako V. K., Lykke A. M., 2016. Techniques d'échantillonnage en étude de végétation. *Annales des Sciences Agronomiques*, 20, spécial Projet Undesert-UE : 1-13. <https://www.researchgate.net/publication/301210821>
- Godron M., Daget P., Emberger L., Le Floc'h E., Long G., Pisonet J., et al., 1968. Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. Principes et transcription sur cartes perforées. Rédigé et publié sous la direction de L. Emberger et M. Godron. Paris, France, CNRS, 292 p.
- Gounot M., 1969. Méthodes d'étude quantitative de la végétation. Paris, France, Masson, 314 p.
- Lamotte M., 1962. Initiation aux méthodes statistiques en biologie. Paris, France, Masson, 144 p.
- Lawton R. M., 1980. Les fourrages ligneux dans la forêt claire de Miombo. In : Le Houerou H.-N. (éd.). Les fourrages ligneux en Afrique, état actuel des connaissances. Colloque sur les Fourrages ligneux en Afrique, Addis-Abeba, 8-12 avril 1980. Addis-Abeba, Éthiopie, CIPEA, 25-31.
- Legros J.-P., 2007. Les grands sols du monde. Lausanne, Suisse, Presses polytechniques et universitaires romandes, coll. Science et ingénierie de l'environnement, 574 p.
- Le Houerou H.-N., 1980. Le rôle des ligneux fourragers dans la gestion des parcours. In : Le Houerou H.-N. (éd.). Les fourrages ligneux en Afrique, état actuel des connaissances. Colloque sur les Fourrages ligneux en Afrique, Addis-Abeba, 8-12 avril 1980. Addis-Abeba, Éthiopie, CIPEA, 323-333.
- Louppe D., Le Bel S., 2015. Afforestation and ecosystems management research and development. TPC-Moshi-Tanzania-Final Report. TPC, Cirad, 112 p.
- Maua J., Ngazi J., 2009. Growing *Acacia xanthophloea* and *Acacia polyacantha* for charcoal in Madiany Division, Siaya County. A KEFRI Report, 140 p.
- Mills A. J., 2006. The role of salinity and sodicity in the die-back of *Acacia xanthophloea* in Ngorongoro Caldera, Tanzania. *African Journal of Ecology*, 44 (1): 61-71. <https://eurekamag.com/pdf/004/004485070.pdf>
- Mutangah J. G., 1989. Composition, structure and distribution of plant communities in Lake Nakuru National Park. MSc Thesis, University of Nairobi, Kenya, 282 p.
- Mutangah J. G., 1994. The vegetation of Lake Nakuru National Park, Kenya. *Journal of the East Africa Natural History Society and National Museum*, 83: 71-96.
- Mutangah J. G., Agnew A. D. Q., 1996. Structure and diversity comparison of three dry forests at Nakuru National Park, Kenya. *African Journal of Ecology*, 34 (2): 146-157. [https://doi.org/10.2982/0012-8317\(1994\)83\[71:TVOLNN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2982/0012-8317(1994)83[71:TVOLNN]2.0.CO;2)
- Otieno D. O., Schmidt M. W. T., Kinyamario J. L., Tenhunen J., 2005. Responses of *Acacia tortilis* and *Acacia xanthophloea* to seasonal changes in soil water availability in the savanna region of Kenya. *Journal of Arid Environments*, 62: 377-400. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.01.001>
- Otterman J., 1996. Desert-scrub as the cause of reduced reflectance in protected vs. impacted sandy arid areas. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 615-619. <https://doi.org/10.1080/01431169608949030>
- Piélou E. C., 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13: 131-144. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(66\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0)
- Poilecot P., Saïdi S., N'Gakoutou E. B., 2009. Phytogéographie du Parc national de Zakouma (Sud-Est du Tchad). *Sécheresse*, 20 (3) : 286-295. <http://agritrop.cirad.fr/550718/>
- Poilecot P., Saïdi S., Daget P., 2013. Stratégie de pâturage d'une population d'éléphants en saison sèche : le cas du parc de Zakouma au Tchad. *Bois et Forêts des Tropiques*, 317 : 59-70. <http://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20524>
- Richardson A. J., Wiegand C. L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43: 1541-1552. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1977journal/dec/1977_dec_1541-1552.pdf
- Richter R., 1996. A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (6): 1201-1214. <https://doi.org/10.1080/01431169608949077>
- Richter R., 1997. Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (5): 1099-1111. <https://doi.org/10.1080/014311697218593>
- Richter R., 2005. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery. DLR report DLR-IB 565-01/05, Wessling, Germany, 99 p.
- Robin A., Pellew R., 1980. Production et consommation du fourrage ligneux d'Acacia et sa potentialité pour la production de protéines animales. In : Le Houerou H.-N. (éd.). Les fourrages ligneux en Afrique, état actuel des connaissances. Colloque sur les Fourrages ligneux en Afrique, Addis-Abeba, 8-12 avril 1980. Addis-Abeba, Éthiopie, CIPEA, 221-229.
- Saïdi S., Gintzburger G., 2013. A spatial desertification indicator for Mediterranean arid rangelands: a case study in Algeria. *The Rangeland Journal*, 35 (1): 47-62. <http://www.publish.csiro.au/rj/RJ12021>
- Shannon C. E., Weaver W., 1963. A Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, *Mobile Computing and Communications Review*, 5 (1), 53 p. <https://cultu-remath.ens.fr/sites/default/files/p3-shannon.pdf>
- Western D., Praet C. V., 1973. Cyclical changes in the habitat and climate of an East African ecosystem. *Nature*, 241: 104-106. <https://www.nature.com/articles/241104a0>