

Prédiction des paramètres dendrométriques à l'aide des prises de vue de drone en zone soudanienne : perspectives pour une évaluation rapide des stocks de carbone forestier

Ibrahim KONATÉ^{1*}, Sidzabda Djibril DAYAMBA^{2,5}, Jonas KOALA², Nongma TONDE³, Abdoul Karim DAMOUE⁴, Louis SAWADOGO², Mipro HIEN¹

¹Université Nazi Boni, Institut du Développement Rural (IDR), Laboratoire des systèmes Naturelles, des Agrosystèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E), 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso,

²Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA)/Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), 03 BP 7047 Ouagadougou, Burkina Faso,

³Direction Générale des Eaux et Forêts (DGEF)/Ministère de l'Environnement de l'Économie Verte et du Changement Climatique (MEEVCC), 03 BP 7044 Ouagadougou, Burkina Faso,

⁴West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use (WASCAL), 06 BP 9507 Ouagadougou, Burkina-Faso,

⁵African Forest Forum (AFF), United Nations Avenue, P.O. Box 30677-00100 Nairobi, Kenya

*Correspondant auteur email : ikonate06@gmail.com, djibril.dayamba@yahoo.fr, koalajonas@gmail.com

Submitted on 20th July 2022. Published online at www.m.elewa.org/journals/ on 30th September 2022
<https://doi.org/10.35759/JABs.177.12>

RESUME

Objectif : Depuis l'avènement de la REDD+, l'estimation du stock de carbone de la biomasse est devenue capital afin de préserver les massifs forestiers moyennant une compensation financière. Estimer la biomasse par inventaire terrain est coûteuse et fastidieuse. Cette étude met à contribution des images acquises par drone estimant les variables dendrométriques utilisées dans la prédiction allométrique de la biomasse aérienne de *Vitellaria paradoxa*.

Méthodologie et résultats : L'étude a consisté à une collecte des paramètres dendrométriques tels que la hauteur et la Surface du houppier (SH) par photogrammétrie de drone et un inventaire direct sur terrain du diamètre à hauteur de poitrine (DHP), la hauteur et la SH. Les données traitées du drone ont été comparées à celles mesurées sur terrain, puis une équation allométrique de prédiction du DHP a été élaborée en fonction des paramètres dendrométriques pris par drone et enfin, le stock de carbone de la biomasse a été estimé par le DHP prédit en utilisant une équation allométrique. Une forte corrélation existe entre les hauteurs ($R^2=0,91$; p-value <0,0001) et entre les SH ($R^2=0,80$ p-value=<0,0001) mesurées sur terrain et celles déterminées par drone. Trois (3) équations de prédiction du DHP dont la régression $R^2 >80\%$ pour chacune d'elle ont été enregistrées. Le stock de carbone est appréciable par l'utilisation des DHP de prédiction.

Conclusions et application des résultats : De façon générale, cette étude montre un bon potentiel d'utilisation de la photogrammétrie par drone pour l'évaluation des paramètres dendrométriques

de parc agroforestier à *Vitellaria paradoxa*. Cependant, il convient de faire des études de cas en fonction de la diversité des espèces ligneuses et de tenir compte du fait que cette méthode n'est pas très bien connue en Afrique subsaharienne. Ainsi c'est une innovation qui pourrait ouvrir de grandes perspectives pour un meilleur profit des services environnementaux.

Mots clés : Drone, photogrammétrie, *Vitellaria paradoxa*, paramètres dendrométriques, carbone de la biomasse, Burkina Faso

Prediction of dendrometric parameters using drone imagery in the Sudanian zone: perspectives for rapid assessment of forest carbon stocks

ABSTRACT

Objective: Since the advent of REDD+, estimating the carbon stock of biomass has become crucial in order to preserve forest massifs in return for financial compensation. Estimating biomass by field inventory is costly and tedious. This study uses drone images to estimate dendrometric variables used in the allometric prediction of *Vitellaria paradoxa* aboveground biomass.

Methodology and results: The study consisted of a collection of dendrometric parameters such as height and crown area (SA) by drone photogrammetry and a direct field inventory of diameter at breast height (DBH), height and SA. The processed drone data was compared to the field data, then an allometric equation for predicting DBH was developed based on the dendrometric parameters taken by drone and finally, the biomass carbon stock was estimated by the predicted DBH using an allometric equation. A strong correlation exists between the heights ($R^2=0.91$; p-value <0.0001) and between the HS ($R^2=0.80$ p value= <0.0001) measured in the field and those determined by drone. Three (3) predictive equations for DHP with R^2 regression $>80\%$ for each were recorded. The carbon stock is appreciable by using the prediction DHP.

Conclusions and application of results: In general, this study shows a good potential for the use of drone photogrammetry for the assessment of dendrometric parameters of *Vitellaria paradoxa* agroforestry parks. However, case studies should be carried out according to the diversity of woody species and the fact that this method is not very well known in sub-Saharan Africa should be taken into account. Thus, it is an innovation that could open up great perspectives for a better benefit of environmental services.

Keywords: Drone, photogrammetry, *Vitelaria paradoxa*, dendrometric parameters, biomass carbon, Burkina Faso

INTRODUCTION

Les écosystèmes forestiers constituent, pour de nombreux pays une importante source de richesses et sont liées aux dynamiques climatiques et environnementales mondiales en raison de la photosynthèse qui donne à la canopée la capacité de capter puis de stocker le dioxyde de carbone (Bonan, 2008 ; Pan *et al.*, 2011 ; Zuidema *et al.*, 2013 ; Bourge, 2017). Il a donc été mis en place, l'initiative REDD+ (Réduction des Émissions dues à la Déforestation et la Dégradation des forêts) par la Convention Cadre des Nations Unies sur les

Changements Climatiques. Cette initiative permet d'inciter les pays en développement à conserver leurs massifs forestiers et autres terres moyennant une certaine compensation financière issue des crédits de carbone (Angelsen *et al.*, 2013 ; Loubota Panzou *et al.*, 2016), dans le but de réduire les émissions du carbone issu de la biomasse. Cependant, la conception d'une stratégie d'évaluation du carbone tel que le système de Mesure, Notification et Vérification (MRV) rend efficace le programme de REDD+ car il permet

avec précision de quantifier la dynamique du carbone des formations végétales (Gibbs *et al.*, 2007 ; Baccini *et al.*, 2012 ; Chave *et al.*, 2014). L'estimation du carbone forestier se fait par la quantification de la biomasse forestière. Cette biomasse est composé d'environ 50 % de carbone (Losi *et al.*, 2003). La biomasse est régulièrement estimée d'abord au niveau de l'arbre ou individuelle (étape de base) (Molto *et al.*, 2013) puis au niveau des parcelles (Maniatis *et al.*, 2011) et enfin au niveau paysage. L'estimation de la biomasse au niveau l'arbre est souvent faite grâce aux équations allométriques (2014 ; Sawadogo *et al.*, 2010 ; Mbow *et al.*, 2013 ; Thiam *et al.*, 2014 ; Bayen *et al.*, 2015, 2020 ; Koala, 2016 ; Djomo & Chimi, 2017 ; Dimobe, 2017 ; Ganamé, 2021 ; Tyano, 2021). L'équation allométrique est la relation mathématique entre la mesure de l'arbre (biomasse par exemple) et une autre mesure de l'arbre qui est facilement mesurable en forêt (Picard *et al.*, 2012). Ces équations allométriques ont été conçu en utilisant les paramètres dendrométriques mesurés sur le terrain au cours d'un inventaire forestier. Ces paramètres peuvent être le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et à la base (DHB), la Hauteur totale, la surface du houppier et la surface terrière qui sont des prédictors très importants de la biomasse (Chave *et al.*, 2005 et 2014 ; Sawadogo *et al.*, 2010 ; Mbow *et al.*, 2013 ; Goodman *et al.*, 2014). Cependant, en plus des moyens financiers exigeants, les tâches des techniciens sur le terrain peuvent s'avérer longues, répétitives, d'une précision variable, parfois destructives et surtout limitées à certains attributs rendant les informations difficiles à collecter surtout sur de grandes superficies et des zones inaccessibles (Lees *et al.*, 2018 ; Bossoukpé, 2021). C'est ainsi que les chercheurs dans le domaine de la foresterie ont commencé l'utilisation des techniques de la télédétection dans les inventaires et cartographies de la ressource forestière (Goreaud, 2004 ; Ferraz, 2014 ; Lisein *et al.*,

2013 ; Lisein, 2017 ; Bourge, 2017 ; Brigot, 2017 ; Gradin, 2019 ; Fadil *et al.*, 2020 ; Momo Takoudjou, 2020). Les méthodes de télédétection permettant d'évaluer les formations végétales sont très variées. Certaines d'entre elles permettent un suivi sur de très vastes territoires avec une précision relativement faible alors que d'autres méthodes sont adaptées à des suivis plus fins, mais confinés à des zones restreintes (White *et al.*, 2016 ; Gradin, 2019). En outre, les techniques de télédétection offrent la possibilité à l'aménagiste d'avoir de grandes superficies de gestion. L'utilisation donc des techniques de télédétection, permet donc de réduire ou de s'affranchir des mesures de terrain fastidieuses et de caractériser la végétation en mettant en évidence de manière plus exhaustive leur variabilité spatiale (Fadil *et al.*, 2020). Mais l'utilisation des satellites à très haute résolution est coûteuse et difficile à appliquer par temps couvert (forte couverture nuageuse pendant la saison des pluies) (Bossoukpé, 2021). Ainsi, l'avènement des drones et leur utilisation dans les domaines de la foresterie et de l'écologie a été utilisé pour résoudre ce problème (Lisein, 2017 ; Lucie *et al.*, 2017 ; Momo Akoudjou, 2020 ; Khun, 2020 ; Ncutirakiza *et al.*, 2020 ; Bossoukpé, 2021). Un drone est un aéronef doté d'une télécommande, et ne possédant pas de pilote à bord, et disposant d'une autonomie de vol (Eisenbeiss, 2009). Cette autonomie est conférée par les outils de navigation embarqués dans le drone tels que le GPS, la station inertielle (mesure de l'orientation), la boussole, le baromètre (mesure de la hauteur de vol). La majorité des drones permettent de faire des observations, et ont pour charge utile un capteur comme un appareil photographique par exemple. Cette technologie a abouti à un succès et son développement (drones civils par exemple) dans le cadre de la prise de vue aérienne, offre des opportunités pour caractériser la forêt. Cette manière de caractériser la forêt permet le développement

du concept de foresterie de précision, avec une caractérisation et une action sylvicole se focalisant sur les arbres individuels, et non plus seulement au niveau du peuplement (Drauschke *et al.*, 2014 ; Lisein, 2017). Le drone a pour but d'acquérir rapidement et à moindre coût des images à haute résolution, du fait de la faible hauteur de vol. Par rapport aux autres plateformes d'acquisition aériennes comme les satellites ou les avions, le drone permet d'acquérir des images à une résolution plus élevée, avec un coût d'exploitation plus faible sur les petites et les grandes superficies (Matese *et al.*, 2015). La capacité du drone à acquérir des images de résolution centimétrique montre particulièrement l'intérêt de son utilisation par rapport aux images satellitaires qui ne sont généralement pas de résolution suffisante pour identifier et mesurer les houppiers en forêt tropicale (Lisein *et al.*, 2014). Les drones constituent à ce titre une solution intéressante étant donné leur coût réduit, leur flexibilité opérationnelle, leur capacité à voler sous la couverture nuageuse et à produire des images de très haute résolution, de l'ordre du centimètre par pixel. Le traitement de ces images grâce aux techniques photogrammétriques permet de générer une ortho-image et un modèle numérique de surface (MNS) qui décrit les variations d'altitude de la canopée (Lisein *et al.*, 2013). Malgré l'utilisation des drones permettant d'avoir efficacement des informations sur les structures végétatives, la collecte de données terrain reste cependant nécessaire pour valider les résultats générés à partir de différents moyens de télédétection (Kerr et Ostrovsky, 2003). Elle permet notamment de calibrer des modèles de prédiction d'attributs d'après un petit échantillon pour ensuite appliquer ces modèles à des peuplements entiers (Bossoukpé, 2021). En outre, quelle qu'en soit la méthode de télédétection employée, des mesures de terrain doivent être disponibles pour établir des relations qui prédisent la biomasse en fonction des observations faites

par les capteurs. L'inventaire forestier et les mesures de certains paramètres dendrométriques sur terrain constituent un préalable à l'utilisation des méthodes indirectes d'estimation de la biomasse (Tyano, 2021). Cependant, l'approche de la photogrammétrie par drone a pour avantages de faciliter l'acquisition des images et l'existence d'outils peu onéreux. Néanmoins, bien que la technologie des plateformes drones ainsi que celle des capteurs soient maîtrisées, les applications possibles en écologie n'en sont pas toutes explorées. Par ailleurs, Il existe très peu d'étude sur l'utilisation des drones en milieu sahélien pour l'étude de la végétation naturelle. La plupart des études scientifiques faites sur la végétation naturelle en Afrique, ont été faites en milieu tropical humide (Delley & Chatelain, 2013 ; Ngabinzeke *et al.*, 2017 ; Momo Akoudjou, 2020 ; Ncutirakiza *et al.*, 2020 ; Bossoukpé, 2021). C'est dans ce contexte que la présente étude a été initiée sur le thème « Prédiction des paramètres dendrométriques à l'aide des prises de vue de drone en zone soudanienne : perspectives pour une évaluation rapide des stocks de carbone forestier ». L'objectif principal de cette étude est d'analyser la possibilité de mettre à contribution des images aériennes à haute résolution acquises par drone pour estimer les paramètres dendrométriques utiles à l'évaluation du stock de carbone de *Vitellaria paradoxa* à l'aide d'équations allométriques. De manière spécifique, les objectifs visés sont : - (1) connaître les niveaux de corrélation entre (i) la hauteur, et la surface des houppiers mesurées sur le terrain et (ii) celles acquises par photogrammétrie du drone ; - (2) disposer d'équations allométriques de prédiction du diamètre à hauteur de poitrine en fonction des paramètres dendrométriques déterminés à l'aide de la photogrammétrie ; - (3) déterminer le stock total de carbone de la biomasse ligneuse aérienne évalué par le diamètre de prédiction par utilisation d'une équation allométrique.

MATERIELS ET METHODES

Site d'étude : La collecte des données de terrain s'est déroulée dans la forêt classée de Tiogo (12°13'N et 2°42'W) dans la région du Centre Ouest. Elle est située à 40 km à l'ouest de la ville de Koudougou sur l'axe routier Koudougou–Dédougou ; administrativement, elle relève des départements de Kyon et de

Tenado, province du Sanguié. La forêt classée de Tiogo a été classée en 1940 par l'administration coloniale (Tankoano *et al.*, 2016). Elle est bordée par les villages de Tenado, Tiogo, Tiogo-Mouhoun, Tialgo, Kyon, Négarpoulou, Poa, Esapoum, Po, Dassa et Ziliwèlè (Savadogo, 2002) (figure 1).

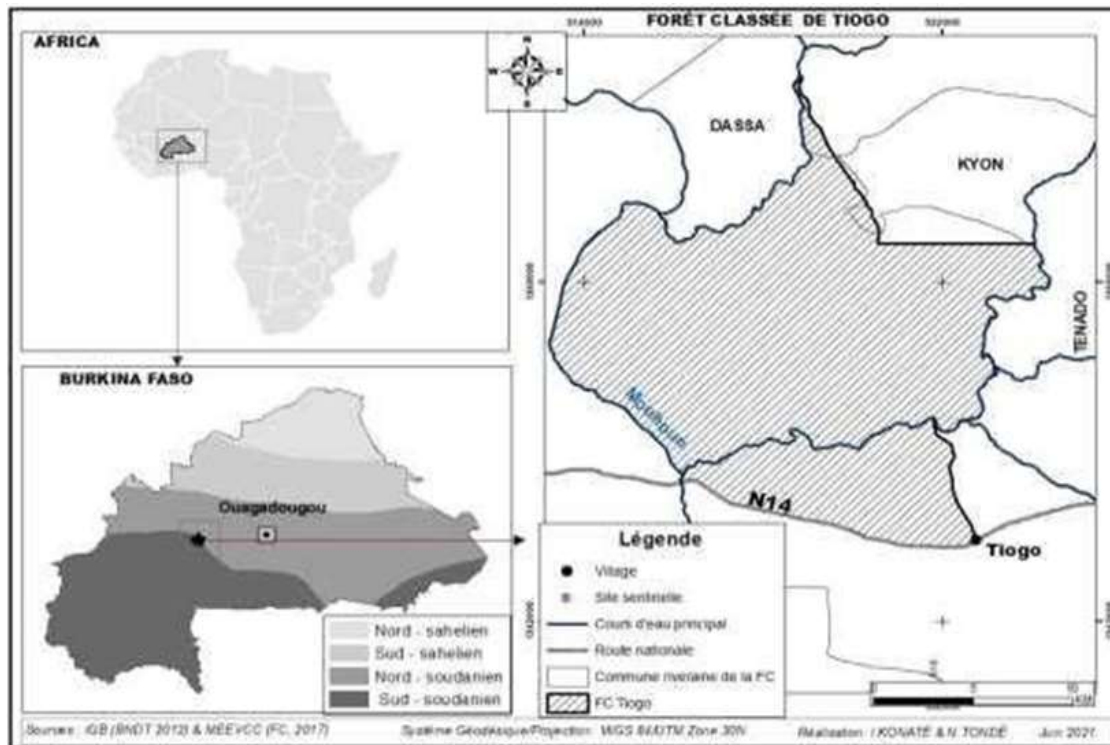


Figure 1 : Localisation de forêt classée de Tiogo, Burkina Faso

Appartenant au climat nord soudanien (Fontes and Guinko, 1995), la forêt classée de Tiogo est caractérisée par deux saisons : une saison pluvieuse allant de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril. La pluviométrie de Tiogo comme les autres localités du Burkina Faso est inégalement répartie d'une année à l'autre. De 2001 à 2020, la hauteur moyenne annuelle d'eau recueillie était de 859 ± 162 mm par an à Tiogo pour un nombre moyen de jours de pluie de 56 ± 12 . A Tiogo, l'année 2015 a été l'année la moins pluvieuse (581 mm), et la plus pluvieuse était 2012 avec une hauteur d'eau annuelle de 1117,5 mm. Deux types de vents soufflent sur le village de Tiogo comme

partout dans le pays, et modifient le régime des pluies. Les alizés boréaux ou harmattan qui sont des vents fortement desséchants, soufflent en période sèche entre décembre et avril et les moussons interviennent de mai à octobre durant la période pluvieuse. Quant à la température moyenne annuelle, elle est de 24 °C, avec une amplitude thermique de 15 °C. Le relief de la forêt classée de Tiogo est plat et monotone dans l'ensemble avec un certain nombre de buttes cuirassées (Savadogo, 2009). Pour les différents types de sols, la forêt classée de Tiogo est caractérisée par des sols peu profonds, des sols hydromorphes et des sols à sesquioxyle de fer, avec des profondeurs

variables (Sawadogo, 2009). Les principaux types physiologiques de végétation rencontrés selon Sawadogo (2009) dans le village de Tiogo sont les suivants par ordre d'importance : des savanes arborées, des savanes arbustives, des formations ripicoles boisées installées principalement sur les berges du fleuve Mouhoun et ses affluents, des savanes herbeuses caractérisées par des sols superficiels gravillonnaires, des végétations de jachère récente et des champs clandestins qui se retrouvent dans la forêt classée de Tiogo et représentent près de 8 % de sa superficie. Parmi les espèces ligneuses rencontrées dans ces formations, nous pouvons citer : *Detarium microcarpum* Guill. & Perr., *Vitellaria paradoxa* C.F.Gaertn., *Burkea africana* Hook., *Anogeissus leiocarpa* Guill. & Perr., *Combretum micranthum* G.Don, *Acacia macrostachya* Rchb. ex G.Don. Quant aux herbacées, les plus rencontrées sont : *Andropogon pseudapricus* Stapf, *Andropogon gayanus* Kunth, *Andropogon ascinodis* C.B.Clarke, *Diheteropogon amplexans* (Nees) Clayton, *Loudetia togoensis* (Pilg.) C.E.Hubb., *Pennisetum pedicellatum* Trin., *Rottboellia exaltata* L.f., *Diheteropogon hagerupii* Hitchc., *Microchloa indica* (L.f.) P.Beauv. L'agriculture, est l'activité la plus dominante pratiquée par les populations. C'est une agriculture de subsistance totalement dépendante de la pluie, consommatrice d'espace et sans apport de fertilisants à la terre (Sawadogo, 2009). Les principales spéculations sont : les céréales (*Sorghum bicolor* (L.) Moench, *Panicum miliaceum* L. et *Zea mays* L.), les légumineuses (*Arachis hypogaea* L., *Vigna unguiculata* (L.) Walp.) et le coton (*Gossypium hirsutum* L.). L'agriculture de contre-saison est aussi pratiquée à petite échelle dans quelques zones favorables. Concernant l'exploitation forestière, il existe dans les zones riveraines de la forêt classée de Tiogo, des groupements organisés pour exploiter les produits forestiers surtout le bois de feu. L'exploitation se fait

selon un plan d'aménagement et suivant un cahier de charge car la forêt classée de Tiogo fait l'objet d'un aménagement depuis 1990 (Sawadogo, 2009). L'exploitation des PFNL, surtout pratiquée par les femmes concerne la cueillette de produits alimentaires et médicinaux. Les espèces les plus exploitées sont généralement *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don, *Vitellaria paradoxa* Gaertn., *Maerua angolensis* DC., *Adansonia digitata* L., *Bombax costatum* Pellegr. & Vuillet.

Dispositif : L'étude a été menée dans les sites de parcs agroforestiers du dispositif connu sous le nom de Cadre de Surveillance de la Dégradation des Terres (LDSF en anglais) mis en place par l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) en collaboration avec ICRAF pour collecter des données de suivi et d'évaluation pour apprécier les processus de dégradation des sols et l'efficacité des mesures de réhabilitation au fil du temps (Koala, 2016 ; ICRAF, 2018). Le cadre est conçu autour d'un protocole d'échantillonnage et d'enquête de terrain hiérarchique utilisant un site de 100 km² (10 km x 10 km) (figure 2). A l'intérieur, 16 sous blocs ou grappes de 2,5 km x 2,5 km ont été créés. Chaque sous bloc est composé de 10 "parcelles". Le point central de chaque grappe du LDSF est placé de manière aléatoire dans un "cadran" de chaque site sentinelle. Les parcelles d'échantillonnage sont sélectionnées de manière aléatoire autour de chaque point central de la grappe et à un rayon de 564 m à partir du centroïde de chaque grappe, ce qui donne un plan d'échantillonnage aléatoire stratifié spatialement. Chaque parcelle a une superficie de 0,1 ha (1000 m²) et se compose de 4 sous-parcelles de 0,01 ha. Le choix aléatoire des parcelles dans la grappe est extrêmement important car elle permet de minimiser les préjugés locaux pouvant résulter de l'échantillonnage de convenance. Le système LDSF a permis de sorte à localiser 5 grappes où les parcs agroforestiers ont été identifiés pour faire voler le drone (figure 3).

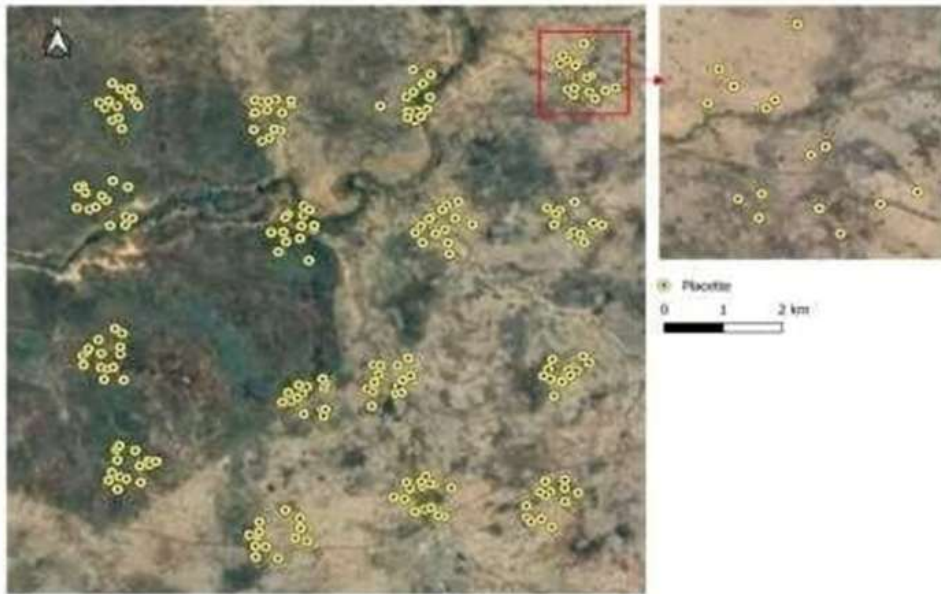


Figure 2 : Dispositif spatial du site sentinelle (LDSF) illustrant les 16 grappes de 10 parcelles chacune



Figure 3 : Dispositif spatial identifiant les parcs agroforestiers à *V. paradoxa*

Choix de l'espèce : L'étude a porté sur *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn. dont l'aire de distribution s'étend sur près d'un million de km² de l'Est du Sénégal au Cameroun et en Ouganda sur une bande de 5 000 km de long et 400 à 700 km de large (Arbonnier, 2009). Sa répartition est très irrégulière dans son aire de distribution et les peuplements les plus denses se rencontreraient au Burkina Faso et au Mali (Boussim, 1991). Au Burkina Faso, *V.*

paradoxa est présente dans tous les secteurs phytogéographiques, excepté le nord-sahélien et à la meilleur Indice de Valeur d'Importance (IVI= 37,24%) (MEEVCC, 2020). Cette une espèce qui joue un rôle important dans les stratégies de développement, de lutte contre la pauvreté et l'insécurité alimentaire au Burkina Faso (Lamien *et al.*, 2009) et est très répandue dans la zone d'étude (Koala, 2016).

Méthodologie



(1)



(2)

Image 1 : Matériel de prise de vue aérienne : drone DJI Mavic 2 Pro (1) ; appareil photographique (2)

Collecte des données : Sur le dispositif LDSF, les parcs agroforestiers regroupent 5 grappes qui ont été identifiés pour la collecte. Les données ont été collectées en deux (02) phases. La première phase de collecte représente la phase d'acquisition des images par drone à voilure tournante de marque DJI Mavic 2 Pro capable d'effectuer des vols stationnaires (Image 1). Ce drone a une autonomie de 31 minutes. Et est équipé d'une caméra 4K UHD (Ultra Haute Définition) avec stabilisation brushless sur 3 axes (Image 1). La caméra permet de capturer des images en vol avec une qualité professionnelle. Elle est capable d'enregistrer jusqu'en 4K (3840 x 2160) à 30 images/seconde avec un débit de 100Mb/s et capable de prendre des clichés en JPEG ou DNG RAW (format brut). La deuxième phase représente celle des mesures directes de terrain des paramètres dendrométriques sur *V. paradoxa*.

Acquisition des images par drone : L'activité de prise de vues aérienne de la zone d'étude s'est faite à l'aide du drone décrit ci-dessus. Une procédure allant de la préparation de la mission à l'exécution du plan de vol, telle que décrite ci-dessous, nous a permis de collecter les données dans les parcs agroforestiers

(regroupant 5 grappes comme échantillonnage spatial).

Préparation de la mission : Elle a consisté à vérifier d'abord le bon état du drone et de ses accessoires notamment les Hélices, les batteries, les mises à jour des Firmware, les calibrations des capteurs optiques, le compas et le IMU. Les batteries de la radiocommande, du drone et de la tablette de pilotage ont été chargées à 100%. Tous les éléments nécessaires à l'exécution de la mission ont été rangés dans la manette du drone.

Délimitation de la zone à couvrir : Elle a concerné 5 grappes de 625 ha chacune (625 ha x 5) du site sentinelle composées de 10 parcelles chacune. Pour des raisons de précaution, une zone tampon de 100 m a été ajoutée autour de chacune des grappes. L'emprise ainsi délimitée a été par la suite convertie en format kml avec le logiciel ArcGIS et importée dans le logiciel de pilotage « DroneDeploy ».

Planification des vols : Des plans de vol ont été créés par grappe et répondant aux paramètres suivants (Figure 4) : la hauteur de vol à 80 m a été retenue car cette hauteur donne une bonne distinction des arbres pour des hauteurs comprises entre 1 et 12 m avec une précision de 70 cm (Sarron et al., 2018;

Boussoukpé, 2021) ; le recouvrement longitudinal de 80% (entre les photos de la même ligne) et latéral de 75% (entre les photos de la même rangée); un plan en grille et polygonal a permis de définir les lignes et les rangers suivi par le drone pendant le vol ; une

vitesse moyenne horizontale de vol de 7,9 m/s a été choisie pour permettre une bonne prise des images car une grande vitesse peut entraîner un défaut d'enregistrement de photo sur la carte SD.



Figure 4 : Plan de vol

Ligne bleue = ligne de vol ; **A** = 80 m hauteur de vol ; **H.S** = 7,9 M/S vitesse horizontale de vol ; **V.S** = 0 M/S vitesse verticale ; **D**=392 M, distance du drone par rapport au point de décollage/atterrissage

Exécution de la prise de vues aériennes : Elle a été effectuée entre 10 heures du matin à 14 heures après midi pour minimiser l'ombrage sur les images. L'exécution des vols a suivi les étapes suivantes (Image 2) :

- vérification de la charge des batteries, assemblage du drone et connexion du drone ;
- vérification du plan de vol, choix du point de décollage pour une utilisation optimale de

l'énergie de la batterie, vérification de la vitesse et de la direction du vent pour minimiser son effet sur le vol ;

- démarrage et exécution de la mission suivie de la vérification constante du contraste de luminosité des images, du niveau de la batterie, du comportement du drone et de l'environnement.

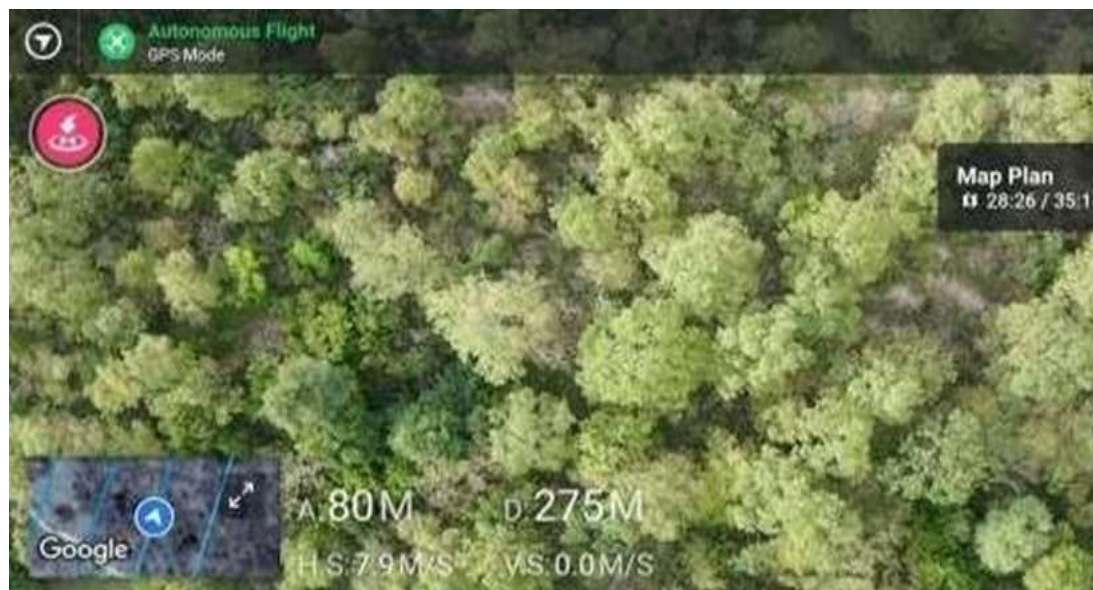


Image 2 : Prise de vue de drone en vol

Caractéristiques des images collectées : Image panchromatique couleur naturelle RGB ; Dimensions : 5472*3648 ; Résolution spatiale : 1.9 cm/px ; Taille : 8 Mo en moyenne

Inventaire terrain des pieds de *Vitellaria paradoxa* (mesure des paramètres dendrométriques)

Échantillonnage : Les sujets de *V. paradoxa* ont été identifiés à l'aide de l'image orthomosaïque capté par le drone dans le parc agroforestier. Ensuite un plan de sondage a été élaboré avec les coordonnées géographiques des sujets ciblés sur l'image du drone. Ainsi les coordonnées de 38 sujets ont été générées pour l'inventaire terrain. Cette taille (38 individus) de l'échantillon respecte les normes statistiques, car la taille minimale d'étude d'un même peuplement doit être au moins 30 individus (Rondeux, 1993). Les mesures ont donc été prises avec précision sur les 38 arbres sélectionnés aléatoirement sur l'ensemble des 5 grappes des parcs agroforestiers identifiés à partir de leurs coordonnées GPS. Avant de prendre les mesures, les informations suivantes ont été collectées : la date, les coordonnées géographiques (à l'aide d'un GPS). Les 38 arbres qui ont été choisis ont un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) supérieur ou égale à 5 cm comme recommandé par Thiombiano *et al.* (2016) pour la zone soudanienne sèche et le sahel.

Mesure des variables dendrométriques : Les variables mesurées sont : le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), la hauteur totale (Ht) et les diamètres Nord-Sud (NS) et Est-Ouest (EO) du houppier.

Mesure du diamètre à hauteur de poitrine : Un compas forestier a été utilisé pour mesurer le DHP. Deux mesures croisées (DHP₁ et DHP₂) ont été effectuées par individu. **Mesure de la Hauteur totale** : La hauteur totale est la distance verticale séparant le niveau du sol du sommet de l'arbre c'est-à-dire le bourgeon terminal (Rondeux, 1999). Elle a été mesurée à partir de deux visées (haut et bas) faites sur l'arbre à l'aide d'un dendromètre BUME-LEISS : une première visée (Vh) au sommet de l'arbre et une deuxième visée (Vb) au pied de l'arbre à une distance de 15m. **Mesure des diamètres du houppier** : Les diamètres du houppier ont été mesurés avec un décimètre, dans 2 directions perpendiculaires NS et EO, afin de tenir compte de la forme des houppiers, rarement circulaire et ainsi permettre l'estimation la plus correcte possible du recouvrement de l'arbre. **Traitement et analyse des données collectées**

Traitements des données avec Pix4D Mapper :

Le logiciel Pix4D Mapper a été utilisé pour le traitement des images qui s'est effectué en quatre (4) étapes : (1) le prétraitement, (2) le traitement initial, (3) la détermination des nuages de points et du maillage 3D et (4) la réalisation de l'ortho mosaïque, du modèle numérique de surface (MNS) et du modèle numérique de terrain (MNT).

Prétraitement : Cette étape permet de sélectionner les photos à traiter, vérifier leurs

systèmes de coordonnées qui est « datum : World Geodetic System 1984 » et de vérifier si toutes les images sont dans ce même système. Elle a permis de déterminer le modèle caméra et la précision des coordonnées (exactitude). Il a donné également les coordonnées de sortie des résultats qui est « WGS 84/UTM zone 30N ». Après le choix de modèle de traitement 3D MAP, il a permis de présenter l'alignement des photos (Image 3).

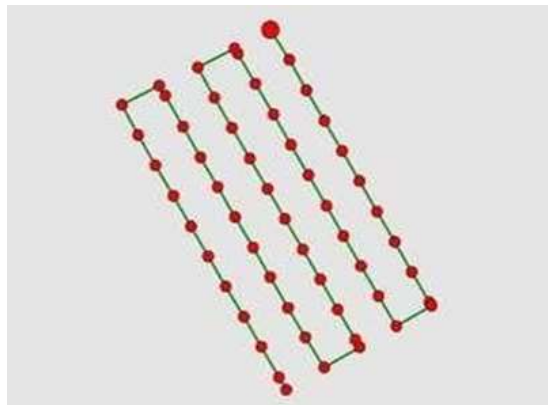


Image 3 : Alignement des photos

Traitement initial : Cette étape réalise la correspondance entre les images et l'étalonnage de celles-ci. Les options définies d'après ce modèle de traitement pour la mise en correspondance sont optimisées sur les paramètres internes de la trajectoire de vol « en grille » du logiciel Pix4D (taux de recouvrement de l'image, orientation de la caméra, etc.). Le nombre de points homologues extrait sur les différentes vues d'une même scène est défini automatiquement. Le logiciel précise que lors de l'extraction de ces points sur une image, une notation interne leur est affectée. Sur la base de cette notation, les meilleurs points de correspondances sont sélectionnés et l'étalonnage optimise les paramètres de la caméra embarquée. C'est le nuage de point qui permet la génération du modèle numérique de surface (MNS) et son

classement propose la sortie d'un modèle numérique de terrain (MNT).

Création des nuages de points et maillage 3D : Elle débute par le paramétrage du « nuage de points ». Ensuite, des points 3D supplémentaires sont ajoutés jusqu'à obtenir une densification d'un point pour 8 pixels par images. Le logiciel paramètre ensuite un seuil de 3 images minimales pour valider la projection de chaque point 3D. Ce calcul s'effectue sur une fenêtre de 5x5 pixels définis par le modèle de traitement.

Création de MNS, MNT et l'ortho mosaïque : C'est l'étape finale du processus de traitement.

Elle a permis de créer :

- le modèle Numérique de Surface (MNS) ;
- le modèle Numérique de Terrain (MNT) (MNT) ;

- l'ortho-mosaïque qui est basée sur l'orthorectification (Image 4). Le MNS et le MNT ont permis d'estimer la hauteur et la surface des houppiers (Figure 5).

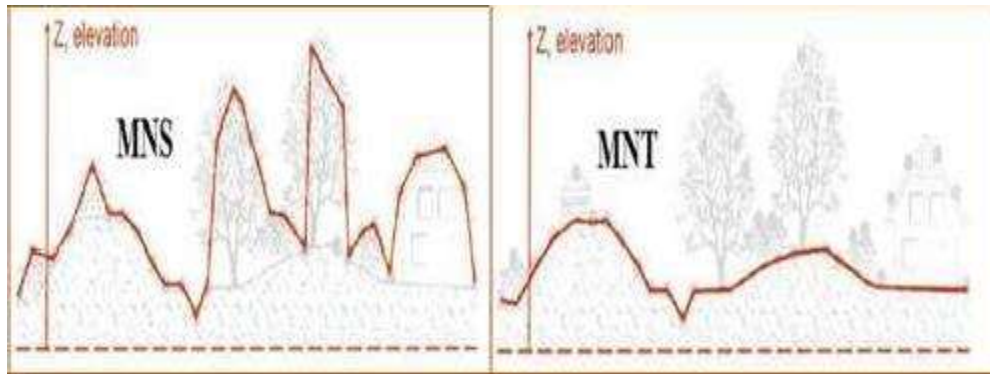


Figure 5 : Illustration du modèle numérique de surface (MNS) et du modèle numérique de terrain (MNT)



Image 4 : Illustration Ortho-mosaïque du parc à *V. paradoxa*

Traitement des données avec ArcGIS 10.8 :

Les résultats du traitement issus du Pix4D mapper sont importés dans le logiciel ArcGIS 10.8 pour des traitements spécifiques pour déterminer des variables dendrométriques

Identification de *Vitellaria paradoxa* :

L'interprétation visuelle a permis d'identifier les arbres facilement détectables sur les orthoimages grâce à leur signature spectrale. Parmi les espèces identifiées seule *V. paradoxa* a été retenue comme indiqué dans le choix de l'espèce (2.3.) pour l'étude.

Vérification de la qualité des résultats :

Les différentes ortho-images des sites ont permis de vérifier la qualité des résultats par la

création, des points d'entraînements (POI) et la génération de leurs coordonnées. Les coordonnées générées de ces POI ont été introduites au GPS et une mission terrain a permis de vérifier les résultats. Cette vérification a permis de valider les résultats.

Détermination de la hauteur des arbres : Les hauteurs des arbres ont été déterminées en faisant la différence entre les modèles numériques de surfaces et les modèles numériques de terrains à partir de la formule suivante dans la fonction Calculateur Raster dans le logiciel Arc GIS :

$Ht = \text{Max} (\text{MNS} - \text{MNT})$, avec **Ht** = Hauteur totale (hauteur des arbres), **MNS** =Modèle

Numérique de Surface (la valeur du pixel représente l'altitude d'où se trouve l'objet et sa hauteur), **MNT** = Modèle

Numérique de Terrain (la valeur du pixel représente l'altitude de la zone correspondante), **Max** = Valeur maximale. Ce calcul a permis d'avoir la hauteur de la canopée sous format raster. Ensuite la fonction conditionnelle Con () a été utilisée pour sélectionner les valeurs de hauteurs obtenues. Les hauteurs retenues sont celles supérieures ou égales à 1,30m. Le format raster final donnant la valeur des arbres a été converti en format « Fichier de forme » ou les pixels représentant les hauteurs ont été converti en valeur numérique (la hauteur de l'arbre). Détermination de la surface de houppier : à partir de l'ortho image de très haute résolution, le houppier de chaque individu de *Vitellaria paradoxa* a été numérisé manuellement et les surfaces des houppiers ont été générées.

Calcul des paramètres dendrométriques (Diamètre à hauteur de poitrine, hauteur totale et surface de houppier) collectés sur terrain **Calcul du DHP des arbres** : Les mesures des DHP₁ et DHP₂ ont été utilisées pour calculer le DHP moyen (DHPm) de chaque individu par la formule suivante :

$$\text{DHPm} = \frac{\text{DHP}_1 + \text{DHP}_2}{2}$$

Calcul de la Hauteur totale : La hauteur totale Ht de l'arbre mesurée a été obtenue par la relation : **Ht** =

$[\text{L}(\text{tg}\alpha + \text{tg}\beta)]$, avec **L** = distance séparant l'opérateur (dendromètre BUME-LEISS) de l'arbre ; **α** = angle de visée haute et **β** = angle visée basse.

Calcul de la surface du houppier : Le rayon moyen R de projection horizontale du houppier a d'abord été calculé, en formant la moyenne quadratique des 2 diamètres mesurés. Ainsi, on obtient: **R** = $[\text{DH}(\text{NS}) + \text{DH}(\text{EO})] \div 4$ où **R** : rayon moyen ; **DH(NS)** : Diamètre Nord-Sud du houppier et **DH(EO)** : Diamètre Est-Ouest du houppier. Puis, la surface du houppier, **SH** a été calculée pour chaque pied à partir de la formule de calcul de la moyenne quadratique (Parde et al, 1988 ; Cailliez, 1980). On l'obtient par la formule universelle de surface d'un cylindre : **SH** = πR^2

Analyses statistiques Les analyses statistiques (décrites ci-dessous) ont été faites avec le logiciel R version 4.0.3.

Comparaisons des mesures photogrammétriques aux mesures de terrain (entre Hauteur totale et surface du houppier du sol et celles estimées par le drone) : Après extraction des mesures géométriques par photogrammétrie (Hauteur totale et surface du houppier), une base de données a été créée avec les deux séries de données (mesures de terrain et mesures photogrammétriques). Avant l'entame du test, la vérification de la normalité des séries de données par le test de Shapiro Wilk a été faite. Ensuite, des tests de

Tableau 1 : Modèles d'équations allométriques corrélation linéaires simple ont été réalisés pour déterminer et apprécier les liens qui existent entre les variables mesurées au sol et celles collectées à l'aide de drone.

Types d'ajustement	Variabes à corrélér
Linéaire	x, y
Exponentiel	x, log(y)
Logarithmique	log(x), y
Puissance	log(x), log(y)

Y= diamètre 1,30 m prédit

X= hauteur totale du pied et la surface du houppier issus du drone

Le test de corrélation paramétrique de Pearson a été utilisé pour les deux séries de données mises en relation qui suivent la loi normale de Gauss.

Etablissement d'équations allométriques du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) à travers les variables (Ht et S_H) estimées par photogrammétrie : Le diamètre à hauteur de poitrine est un paramètre clé pour déterminer la biomasse des arbres en utilisant les équations allométriques (Chave *et al.*, 2005 et 2014). Sa mesure avec le drone est complexe. L'ajustement d'un modèle suppose d'une part, que les données sont déjà disponibles et mises en forme et d'autre part, que l'expression mathématique du modèle à ajuster est connue. Les paramètres dendrométriques retenus pour l'ajustement des modèles dans cette étude sont la hauteur totale et la surface du houppier mesurées avec le drone.

Choix du meilleur modèle : Il existe deux modèles couramment utilisés dans l'élaboration des équations allométriques : le modèle linéaire qui concerne l'ajustement linéaire et le modèle non linéaire composé principalement des ajustements exponentiel, logarithmique et puissance (tableau 1). Le test de normalité de Pearson a été utilisé pour avoir le modèle qui donne un meilleur résultat.

Évaluation des modèles et tests statistiques : L'ajustement des modèles passe par la détermination des paramètres de précision et d'optimisation comme le coefficient de détermination (R^2) et les résidus du modèle (Picard *et al.*, 2012). Pour chaque équation établie, le logiciel fournit les coefficients d'ajustement :

- le coefficient de détermination R^2 qui permet d'avoir une idée globale de l'ajustement

RÉSULTATS

Comparaisons entre mesures photogrammétriques et mesures de terrain de hauteur totale et surface du houppier : Sur les 38 sujets de *V. paradoxa* dont les DHP ≥ 5 cm, les variables (hauteur totale et surface du houppier) mesurées sur terrain comparées à celles déterminées à partir du drone ont montré de corrélations significatives. La comparaison des deux mesures de hauteur, montre qu'il

du modèle. Ce coefficient s'interprète comme le ratio de la variance expliquée par le modèle sur la variance totale. Il est compris entre 0 et 1 et plus il est proche de 1, meilleure est la qualité de l'ajustement ;

- la somme des carrés des erreurs (ou résidus) du modèle (SCE) qui est la somme des carrés des valeurs résiduelles. Elle quantifie la variation des données non expliquées par le prédicteur (le paramètre dendrométrique). Plus la SCE finale est petite, mieux le modèle décrit la réponse.

Comparaison du stock de carbone mesuré par une équation allométrique entre le diamètre prédit par les variables du drone et celui mesuré sur terrain : Pour les 38 individus de *V. paradoxa* retenus pour l'étude, il a été :

- d'abord, calculer séparément pour le diamètre prédit et celui mesuré sur terrain, la biomasse aérienne de *V. paradoxa* en utilisant une équation allométrique élaborée dans le même site par Koala (2016) :

$$\ln(AGB) = \ln(a) + b \times \ln(X),$$

où

$$\ln(a) = -3,05 ; b = 2,66 ; X = D1,30m.$$

- ensuite, déterminer le stock de carbone comme étant 50% de la biomasse totale (Losi *et al.*, 2003 ; Jacques et Saugier, 2008). - enfin, faire un test de *student* apparié au seuil de probabilité de 5% entre les stock de carbone calculé par le diamètre mesuré sur le terrain et le stock de carbone estimé par le diamètre prédit par photogrammétrie du drone.

existe une forte corrélation positive ($R^2 = 0,91$; $p\text{-value} < 0,0001$) entre les mesures de terrain et les mesures de photogrammétrie par drone (Figure 6). La comparaison entre les mesures de surface de houppier évaluée sur terrain et celle déterminée par le drone donne également une corrélation significative ($R^2 = 0,80$; $p\text{-value} < 0,0001$) mais moins forte que celle de la hauteur (Figure 7).

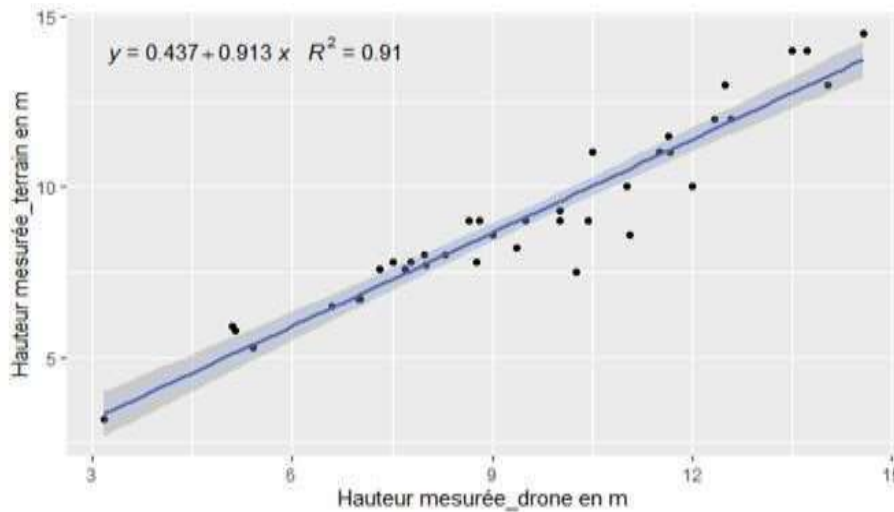


Figure 6 : Relation entre hauteur mesurée par drone et celle mesurée au sol

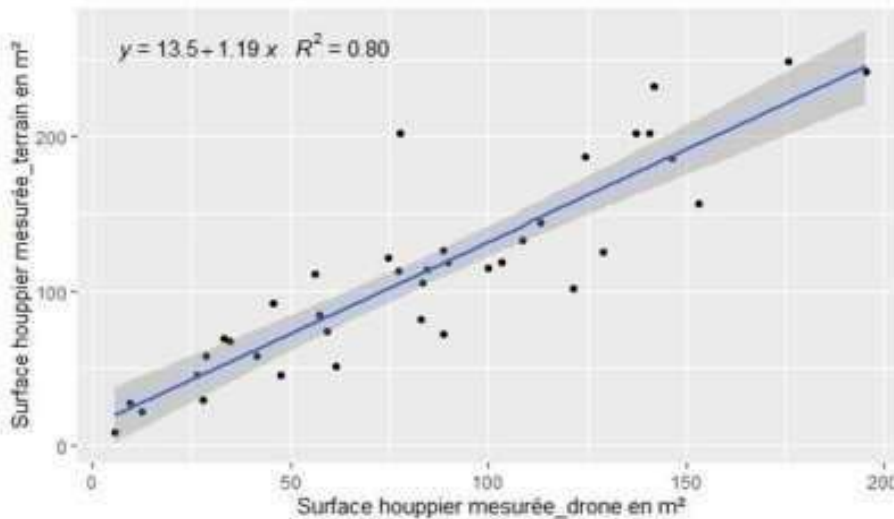


Figure 7 : Relation entre surface du houppier mesurée par drone et celle mesurée au sol

Equations allométriques élaborées pour prédiction du diamètre à 1,30 m à l'aide des paramètres dendrométriques estimés par le drone (Hauteur totale et Surface du houppier) : L'équation (3) de régression est le meilleur modèle pour prédire le diamètre car

elle a le R^2 la plus élevée ($R^2=0,908$; p -value= $2,34 \cdot 10^{-4}$). Elle présente également la meilleure distribution des nuages de points (figure 10) par rapport aux autres équations (figure 8 et 9).

Tableau 2 : Diamètres à 1,30 m (Y) au sol en fonction des variables mesurées à partir du drone

Équation de régression	R ²	R ² Ajusté	AIC	Écart type	Valeur de P
(1) $\ln(Y)=1,27769+1,1430 \ln(\text{hd})$	0,84	0,839	-26,45	0,162	$4,86.10^{-16}$
(2) $\ln(Y) = 1,85019+0,4683\ln(\text{hpd})$	0,86	0,860	-31,96	0,150	2.10^{-16}
(3) $\ln(Y)=1,45130+0,55160\ln(\text{hd})+0,26967\ln(\text{hpd})$	0,90	0,902	-44,866	0,126	$2,34.10^{-4}$

Y= DHP ; **hd**=hauteur mesurée par drone ; **hpd**= surface houppier mesurée par drone

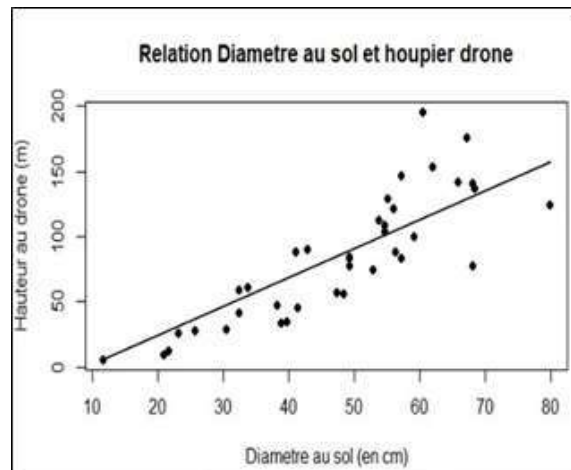
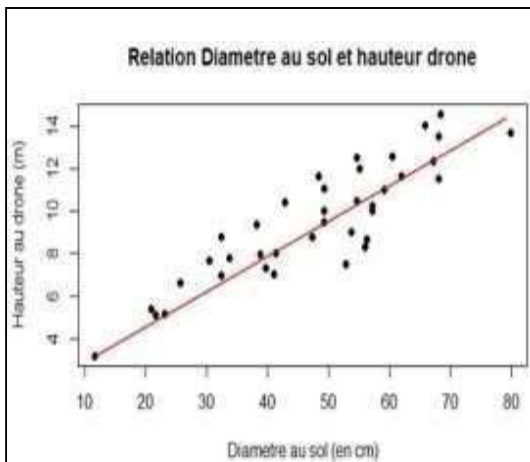


Figure 8 : Régression diamètre et hauteur drone **Figure 9 :** Régression diamètre surface houppier drone

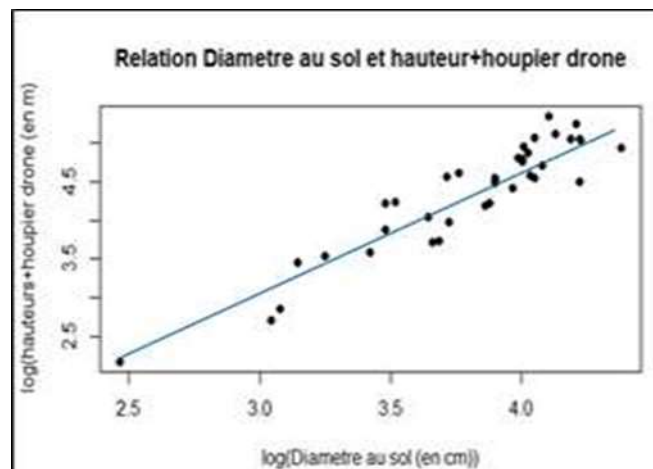
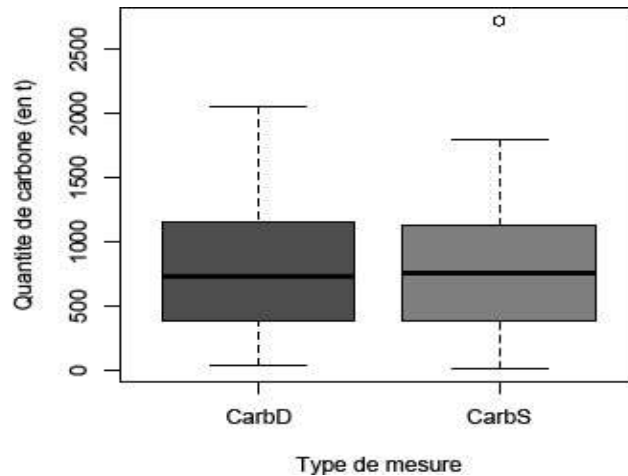


Figure 10 : Régression diamètre, hauteur et surface du houppier mesurée par drone

Comparaison du stock de carbone mesuré par une équation allométrique entre le diamètre prédit par les variables du drone et celui mesuré sur terrain : Le t-test montre qu'il n'existe pas de différence significative (t

=0,43 ; p-value = 0,6634) entre les valeurs de carbone estimée par le diamètre mesuré sur terrain et carbone celles du carbone estimé par le diamètre prédit par le drone (Figure 11).



CarbD = carbone estimé par diamètre de prédit ;
CarbS = carbone estimé par diamètre mesuré au sol

Figure 11 : Comparaison entre les quantités de carbone déterminée par l'équation du diamètre prédit par le drone et le diamètre mesuré sur terrain

DISCUSSION

Précision de la hauteur totale et de la surface du houppier : Les résultats obtenus par le drone, ont permis de distinguer des arbres dont la mesure des hauteurs totales individuelles obtenues est à 91% ($R^2=0,91$) égales à celles obtenues par mesures de terrain. Ce résultat est supérieur à ceux obtenu par Bossoupké (2021) et Sarron *et al.* (2018) au Sénégal. Ces auteurs ont trouvé dans leurs études que 85% des hauteurs obtenu par image de drone étaient égales à celles mesurées sur terrain. Dans notre étude, la très forte corrélation ($R^2 = 0,91$) pourrait être dû à la taille de notre échantillon (38 arbres) et au choix d'une espèce. En, effet, l'étude menée au Sénégal par Bossoupké (2021) était sur un échantillon de 249 individus composés de six (06) espèces et cette taille relativement supérieure à la nôtre (38 individus d'une espèce) aurait occasionné quelques imperfections. En effet, certains arbres par leurs dispositions (situés sur des élévations naturelles) peuvent surestimer la hauteur prise par photogrammétrie sachant qu'il n'est pas possible au drone de voir en dessous des arbres. Par ailleurs, la grande taille de l'échantillon peut également provoquer des erreurs de mesures terrain et à la mauvaise

manipulation du dendromètre utilisé pour les mesures sur terrain. Cependant nos résultats sont semblables à ceux de Fadil *et al.*, 2020 et Zarco-Tejada *et al.*, 2020 qui ont effectué en Espagne, sur une zone forestière de 158 ha ayant pour objectif la détermination de la hauteur des arbres. En effet, ces auteurs ont utilisé un drone à ailes fixes avec un système de caméra qui a permis d'acquérir des images avec 5 cm/pixel. Ils ont généré une orthomosaïque et des modèles numériques de surface de la zone par le biais de méthodes de reconstruction automatique en 3D. Ces chercheurs ont obtenu comme résultats des mesures précises de la hauteur de la canopée en les comparant avec les déterminations classiques sur terrain. En outre, selon Fadil *et al.* (2020), le drone paraît nécessaire pour estimer avec plus de précision le couvert végétal. Par ailleurs, l'application de la relation existante entre les modèles numériques de surfaces et les modèles numériques de terrains sur les images obtenues à l'aide de drone donnent avec précision les hauteurs par comparaison à la détermination classique sur terrain (Zarco-Tejada *et al.*, 2014). Les mesures de surface de houppier obtenues par photogrammétrie sont aussi corrélées à 80%

aux mesures de terrain. Des résultats semblables ont été aussi obtenus par d'autres chercheurs telles que (Sarron *et al.*, 2018) ; Lisein (2016), Tu *et al.*, (2019), qui ont utilisé la photogrammétrie pour évaluer la surface du houppier d'un arbre. Par ailleurs, avec la résolution de l'image du drone, toute la forme convexe du houppier peut être digitalisée manuellement en permettant de bien suivre tous les contours du houppier. Le houppier des arbres présente des formes différentes et leurs estimations directes sur terrain par projection au sol n'est pas souvent une chose aisée. Le drone permet donc de prendre en compte la gravité de la couronne et minimiser les erreurs de projection au sol (Fadil *et al.*, 2020). Il faut aussi noter que, le diamètre du tronc d'arbre n'a pas pu être évalué par la technologie drone car n'étant pas visible sur les photos (Bossoupké, 2021) ; il a plutôt été estimé à la suite de l'établissement d'une corrélation entre la hauteur et la surface du houppier mesurées par le drone et le diamètre mesuré au sol. Ceci est une raison supplémentaire au besoin de quelques données terrain pour la paramétrisation d'équations.

Diamètre à hauteur de poitrine prédit et estimation du stock de carbone : Pour l'estimation du diamètre prédit à 1,30 m à

partir des paramètres dendrométriques estimés par le drone, nous avons enregistré de fortes corrélations pour 3 équations dont la régression R^2 est supérieure à 80% pour chacune d'elle. L'équation estimant la meilleure équation ($\ln(Y) = 1,45130 + 0,55160 \ln(hd) + 0,26967 \ln(hpd)$) indique une régression $R^2 = 0,908$. En effet, la corrélation entre le diamètre du sol et les variables estimées par les images du drone (hauteur et houppier) ont indiqué de bonnes équations linéaires. Ce résultat est supérieur à celui obtenu dans le cadre d'une étude réalisée sur *Acacia nilotica* pour laquelle un coefficient R^2 de 73% a été obtenu par Hountondji (2008). Le stock de carbone évalué par les valeurs de prédiction des diamètres par une équation allométrique n'a pas montré de différence significative à celui évalué par les valeurs du diamètre mesuré sur terrain. Dans l'étude de Mokros *et al.* (2016) la technologie du drone a entraîné une surestimation de 10,4% du volume de bois par rapport aux données terrain. Cependant, les auteurs ont estimé qu'il s'agissait d'un compromis acceptable car le temps nécessaire pour collecter des données était significativement plus faible (12 à 20 fois moins).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La présente étude avait pour objectif principal d'analyser la possibilité de mettre à contribution des images aériennes à haute résolution acquises par drone pour estimer les paramètres dendrométriques utiles à l'évaluation du stock de carbone de *Vitellaria paradoxa* à l'aide d'équations allométriques. Les résultats ont montré une (1) forte corrélation entre les hauteurs mesurées sur terrain et celles déterminées à partir du drone ($R^2=0,91$) de même que la surface du houppier ($R^2=0,80$), (2) de bonnes corrélations pour 3 équations dont la régression R^2 est supérieure à 80% pour chacune d'elle et (3) un stock de carbone appréciable par l'utilisation des DHP

prédits par les paramètres dendrométriques estimés par le drone. De façon générale, les résultats de cette étude montrent un bon potentiel d'utilisation de la photogrammétrie par drone pour l'évaluation des paramètres dendrométriques des parcs agroforestiers à *Vitellaria paradoxa*. Cette étude suggère donc que la technologie du drone pourrait être envisagée pour pouvoir disposer rapidement de données forestières fiables et réduire les contraintes financières, de temps et même de précisions liées aux travaux de terrains prolongés. Cependant, il convient de noter que pour l'utilisation de la technologie drone dans un nouvel paysage et à de grandes échelles, il

pourrait être indispensable de disposer de quelques données terrain pour une bonne paramétrisation (des équations). Cependant, il convient de faire des études de cas en fonction de la diversité des espèces ligneuses au

Burkina et de tenir compte du fait que cette méthode n'est pas très bien connue dans notre contrée. Ainsi c'est une innovation qui pourrait ouvrir de grandes perspectives pour un meilleur profit des services environnementaux.

REMERCIEMENT

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

l'Environnement et de Recherche Agricoles (INERA). Que ces institutions trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. Par ailleurs des remerciements sont donc adressés à Modeste MEDA, technicien forestier du DEF/INERA et aux agents de terrain de la localité de l'étude pour leur assistance pendant le travail de terrain

REFERENCES

- Angelsen, A., Brockhaus, M., Sunderlin, W.D. and Verchot, L.V. 2013. Introduction: Analyse de la REDD+: Les enjeux et les choix. In Analyse de la REDD+: Les enjeux et les choix. Center for International Forestry Research (CIFOR), Bogor, Indonesia. 488.
- Apps M. J., Bernier P.Y. et Bhatti. I. S. (2006). Forests in the Global Carbon Cycle: Implications of Climate Change. In Climate Change and Managed Ecosystems, p. 175200. Florida, USA: Taylor et Francis Group, Boca Raton.
- Arbonnier, M., 2009. Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest. 3^{ème} édition. CIRAD, MNHN, UICN. Troisième édition. CIRAD, MNHN, UICN. 572p.
- Bayen P., Bognounou F., Lykke M. A., Ouédraogo M. and Thiombiano A. (2015). The use of biomass production and allometric models to estimate carbon sequestration of *Jatropha Curcas* L. plantations in western Burkina Faso. *Environ Dev Sustain.*, 17: 3042.
- Brigot, G., 2017. Prédire la structure des forêts à partir d'images PolInSAR par apprentissage de descripteurs LIDAR. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Paris Saclay (COMUE). 166p.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., et al. (2005) Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87–99.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C. Henry, M., Martínez- Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller- Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, A.W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C. M., Saldarriaga, J.G. and Vieilledent, G. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*. 20(10):3177– 3190
- Delley N., Chatelain C. (2013) – R-Pod, essais en forêt dense ivoirienne avec un drone. Suisse E-periodica, 111, 5.
- Dimobé K. (2017). Dynamique, séquestration de carbone et modèles de variations des

- savanes soudanienne du Burkina Faso et du Ghana (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat unique, Spécialité Sciences et Phytoécologie, Laboratoire Biologie/Ecologie Végétale, Université de Ouagadougou.
- Djomo, A.N. and Chimi, C.D. 2017. Tree allometric equations for estimation of above, below and total biomass in a tropical moist forest: Case study with application to remote sensing. *Forest Ecology and Management*. 391:184–193.
- Drauschke, M., Bartelsen, J., Reidelstuerz, P., 2014. Towards UAV-based forest monitoring. In: *Proceedings of the Workshop on UAVbased Remote Sensing Methods for Monitoring Vegetation*. Geographisches Institut der Universität zu Köln - Kölner Geographische Arbeiten, Cologne, Germany, pp.21-32.
- Eisenbeiss, H., 2009. UAV photogrammetry. PhD thesis, ETH, Zurich. URL <http://ecollection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&nr=18515>
- Fadil, S., Sebari, I., Bouhaloua, M., Ait El Kadi, K., 2020. Opportunités d'utilisation de la technologie drone au niveau des écosystèmes forestiers. *Revue Marocaine des sciences Agronomiques et Vétérinaires*. VOL. 8 NO 4.
- Ferraz A., Mallet C., Jacquemoud S., Gonçalves G., Soares P., Pereira L. et Tomé M. (2014). Estimation de la biomasse à partir des données Lidar aéroporté. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 205 : 59-68.
- Ganamé M. (2021). Dynamique spatiotemporelle et potentiel du stock de carbone aérien des écosystèmes forestiers du Burkina Faso. Thèse de Doctorat unique en Biologie et Ecologie Végétales, Option Botanique et Phytoécologie, Spécialité : Sciences Biologiques Appliquées, Université Joseph KIZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso, 167p.
- Gibbs, H.K., Brown, S., Niles, J.O. and Foley, J.A. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environmental Research Letters*. 2(4) ; 045023.
- GIEC. (2007). Bilan 2007 des Changements Climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, Suisse, 103p.
- Goodman, R. and Herold, M. 2015. Why Maintaining Tropical Forests is Essential and Urgent for a Stable Climate. Center for Global Development Working Paper, (385): 1–56.
- Goreaud F. (2004). Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et la modélisation des peuplements complexes. Sciences de la Terre. ENGREF (AgroParisTech), 2000. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'ENGREF, Discipline Sciences Forestières. Laboratoire de Recherche en Sciences Forestières, Equipe Dynamique des Systèmes Forestiers Nancy (France), 527p.
- Grandin, S., 2019. Estimation de la densité, hauteur et surface terrière de la canopée forestière dans la pessière à lichen du Québec à par tir d'images stéréo worldview3. Mémoire de la maîtrise en géographie. 129p.
- Hountondji Y (2008). Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal. Dissertation présentée en vue

- de l'obtention du grade de Docteur en Sciences. 153p.
- Khun, K., 2020. Contribution de l'imagerie dronique pour la caractérisation des paramètres biophysiques des cultures agricoles. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph. D.) en Géographi Département de Géographie Faculté des arts et des sciences. Université de Montréal. 190p.
- Koala J. (2016). Influences des perturbations anthropiques sur le stock de carbone dans les écosystèmes de savane en zone soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat unique en développement rural, Option Système de Productions Forestières, Spécialité Production Forestière, IDR, Université Polytechnique de Bobo- Dioulasso, Burkina Faso, 210 p
- Lamouri J. et Lavoie A. (2016). L'agroforesterie, pilier de l'agroécologie au Sahel ? Sahel Agroforesterie, Numéro 21-Juin 2015- Juin 2016. 8p.
- Lees, K. J. , Quaife, T., Artz, R. R. E., Khomik, M. et Clark, J. M. (2018). Potential for using remote sensing to estimate carbon fluxes across northern peatlands – A review. *Science of the Total Environment*. 615, 857874.
- Lisein J. (2016) – Application des techniques de photogrammétrie par drone à la caractérisation des ressources forestières. Doctorat Thesis. Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech et Université Paris- Est.
- LISEIN J., 2017. Application des techniques de photogrammétrie par drone à la caractérisation des ressources forestières. Géographie. Université Paris-Est, 2016. Français. ffNNT :2016PESC1049ff. 119p.
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., Lejeune, P., 2013. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests* 4 (4), 922– 944.
- Lisein, J., Pineux, N., Pierrot-Deseilligny, M., Degré, A., Lejeune, P., 2014. Détection de l'érosion dans un bassin versant agricole par comparaison d'images multitudes acquises par drone. Montpellier - France, pp. 1–9.
- Losi CJ, Siccama TG, Condit R, Morales JB. Analysis of alternative methods for estimating carbone stock in young tropical plantations. *For Ecol Manage*. 2003;184: 355-68.
- Loubota Panzou, G.J., Doucet, J.L., Loumeto, J.J., Biwole, A., Bauwens, S. and Fayolle, A. 2016. Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique). *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*. 20(4):508–522.
- Lucie, X., Durrieu, S., Jolly, A., Labbé, S. et Renaud, J-P., 2017. Comparaison de modèles numériques de surface photogrammétriques de différentes résolutions en forêt mixte. Estimation d'une variable dendrométrique simple : la hauteur dominante. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n ° 213-214.
- Maniatis, D., Malhi, Y., Saint André, L., Mollicone, D., Barbier, N., Saatchi, S., Henry, M., Tellier, L., Schwartzberg, M. and White, L. 2011. Evaluating the Potential of Commercial Forest Inventory Data to Report on Forest Carbon Stock and Forest Carbon Stock Changes for REDD+ under the UNFCCC. *International Journal of Forestry Research*. 2011:1–13.
- Matese A., Toscano P., Di Gennaro S.F., Genesio L., Vaccari F.P., Primicerio

- J., Belli C., Zaldei A., Bianconi R., Gioli B. (2015) – Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sensing*, 7, 2971–2990.
- Mbow C., Michel M., Verstraet, Sambou B., Diaw A.T. and Neufeldt H. (2013). Allometric models for aboveground biomass in dry savanna trees of the Sudan and SudanGuinean ecosystems of Southem Senegal. *Journal of Forestry Research*, 19 (3) : 340347.
- MEEVCC, 2020. Second inventaire forestier national du Burkina Faso. Projet BKF/015 « Second Inventaire Forestier National » (IFN 2) Gouvernements du Burkina Faso et du Grand – Duché de Luxembourg. 507p.
- Mokroš, M., Tabačák, M., Lieskovský, M., & Fabrika, M. (2016). UNMANNED AERIAL VEHICLE USE FOR WOOD CHIPS PILE VOLUME ESTIMATION. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 953- 956.
- Molto, Q., Rossi, V. and Blanc, L. 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*. 4(2):175–183.
- Momo Takoudjou S. (2020). Utilisation de l'imagerie 3D pour l'estimation indirecte de la biomasse aérienne des arbres de la forêt semi-décidue du sud-est du Cameroun. *Systématique, phylogénie et taxonomie*. Thèse de doctorat. Université de Yaoundé 1, 264 p.
- Momo Takoudjou, S., 2019. Utilisation de l'imagerie 3D pour l'estimation indirecte de la biomasse aérienne des arbres de la forêt semi-décidue du sud-est du Cameroun. Présentée et soutenue en vue de l'obtention partielle du Doctorat/Ph.D Biologie des Organismes Végétaux, Option : Botanique Écologie Systématique, phylogénie et taxonomie. Université de Yaoundé 1.
- Ndamiyehe Ncutirakiza J.-B., Lejeune P., Gourlet-Fleury S., Fayolle A., Ndjele MiandaBungi L., Ligot G., 2020. Quantifier les dimensions des houppiers à l'aide d'images aériennes à haute résolution pour estimer l'accroissement diamétrique des arbres dans les forêts d'Afrique centrale. *Bois et Forêts des Tropiques*, 343 : 67-81.
- Ngabinzeke J.S., Linchant J., Quevauvillers S., Muhongya J.M.K., Lejeune P., Vermeulen C. (2017) – Cartographie de la dynamique de terroirs villageois à l'aide d'un drone dans les aires protégées de la République démocratique du Congo. *Bois et forêts des tropiques*, 4, 69–83.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, Simon L., Canadell, Josep G., Ciais, Philippe., Jackson, Robert B., Pacala, Stephen W., McGuire, A David., Piao, Shilong., Rautiainen, Aapo., Sitch, Stephen. and Hayes, Daniel. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*. 333(6045):988–993.
- Picard, N., Saint-andré, L. and Henry, M. 2012. Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 224.
- Ramankutty, N., Gibbs, H.K., Achard, F., Defries, R., Foley, J.A. and Houghton, R.A. 2007. Challenges to estimating carbon emissions from tropical

- deforestation. *Global Change Biology*. 13(1):51–66.
- Rondeux J., 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les Presses Agronomiques de Gembloux (Belgique), 512
- p. Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., Zutta, B.R., Buermann, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M. and Morel, A. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *PNAS*. 108(24):9899–9904.
- Sarron J., Malézieux E., Sané C.A.B., Faye E. (2018) – Mango Yield Mapping at the Orchard Scale Based on Tree Structure and Land Cover Assessed by UAV. *remote sensing*, 10(10), 21.
- Sawadogo L. 2009. Influence de facteurs anthropiques sur la dynamique de la végétation des Forêts Classées de Laba et de Tiogo en Zone Soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat 3ème Cycle, Université de Ouagadougou, 181 p.
- Sawadogo L., Savadogo P., Tiveau D., Dayamba S.D., Zida D., Nouvellet Y., Oden P.C., & Guinko S., 2010. Allometric prediction of aboveground biomass of eleven woody tree species in the Sudanian savannawoodland of West Africa.
- Tankoano B., Sanon Z., Hien M., Dibi N, H., Yameogo J. T. et Somda I. (2016). Pression anthropique et dynamique végétale dans la Forêt classée de Tiogo au Burkina Faso : apport de la télédétection. *Tropicultura*, 2016, 34, 2, 193 – 207.
- Thiam S., Sambou B., Mbow C. et Guisse A. (2014). Élaboration de modèles allométriques d'Acacia Sénégal L. Willd pour l'analyse du carbone ligneux en milieu sahélien : cas de la zone sylvopastorale au Sénégal. *Afrique Science*, 10(3) : 304-315.
- Thiombiano A., Glèlè Kakaï R., Bayen P., Boussim J. I. et Mahamane A. (2016). Méthodes et dispositifs d'inventaires forestiers en Afrique de l'Ouest : état des lieux et propositions pour une harmonisation. *Annales des Sciences Agronomiques*, 20 : 15-31.
- Tu Y.-H., Johansen K., Phinn S., Robson A. (2019) – Measuring Canopy Structure and Condition Using Multi-Spectral UAS Imagery in a Horticultural Environment. *remote sensing*, 11, 19.
- Tyano A. (2021). Services écosystémiques des arbustes au champ : intensification écologique des sols et évaluation du stock de carbone en zone nord soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat unique en développement rural, Option Système de Productions Forestières, Spécialité Production Forestière, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 157 p.
- White, J. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Hilker, T. et Tompalski, P. (2016). Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(5), 619 - 641.