

Estimation de la densité des ligneux avec des images drones dans les écosystèmes Sahéliens du Sénégal

Ramata Talla

Diara Sylla

Ndiabou Faye

Moustapha Bassimbé Sagna

Département Biologie végétale

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar-fann, Senegal

Observatoire Homme-Milieux international de Tessékéré, CNRS

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Senegal

Aly Diallo

Observatoire Homme-Milieux international de Tessékéré, CNRS

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Senegal

Département d'agroforesterie

Université Assane SECK de Ziguinchor, Diabir-Ziguinchor, Senegal

Oumar Sarr

Département Biologie végétale

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar-fann, Senegal

Aliou Guisse

Département Biologie végétale

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar-fann, Senegal

Observatoire Homme-Milieux international de Tessékéré, CNRS

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Senegal

[Doi:10.19044/esj.2025.v21n30p154](https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n30p154)

Submitted: 05 June 2025

Accepted: 03 October 2025

Published: 31 October 2025

Copyright 2025 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Talla, R., Sylla, D., Faye, N., Sagna, M.B., Diallo, A., Sarr, O. & Guisse, A. (2025). *Estimation de la densité des ligneux avec des images drones dans les écosystèmes Sahéliens du Sénégal*. European Scientific Journal, ESJ, 21 (30), 154.

<https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n30p154>

Résumé

Les avancées récentes des drones et du traitement des données permettent aujourd'hui de produire des images haute résolution et des modèles 3D utiles pour évaluer les attributs des arbres. Cette étude a été menée

à Widou thiengoly dans la localité du Ferlo, Nord du Sénégal, avec comme objectif général d'appliquer une approche photogrammétrique pour la mesure de la densité des tiges (tiges/ha) avec des images drones. Une méthode de l'approche arbre basée sur un modèle numérique de hauteur d'une zone d'étude de 10 hectares a été mise en œuvre, ce modèle a été construit à partir d'images obtenues par des drones. Au total, 92 arbres de référence ont été comptés dans le cadre de cette étude et l'algorithme a détecté 75 arbres, ce qui donne une précision supérieure à 90 % (score F de 0,93). Dans l'ensemble, l'algorithme a manqué 10 arbres (erreurs d'omission) et a faussement détecté 3 arbres (erreurs de commission), ce qui donne un compte total de 88 arbres. Cette étude suggère que l'algorithme de filtrage des maxima locaux combiné avec des tailles de fenêtre optimale, appliqués sur un Modèle Numérique de Hauteur construit par photogrammétrie est capable d'effectuer des comptages d'arbres avec une précision acceptable ($F > 0,90$) dans la zone sahélienne.

Mots-clés: Drone, densité, écosystèmes, Sahel, Sénégal, Ferlo

Estimation of Woody Plant Density Using Drone Imagery in the Sahelian Ecosystems of Senegal

Ramata Talla

Diara Sylla

Ndiabou Faye

Moustapha Bassimbé Sagna

Département Biologie végétale

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar-fann, Senegal

Observatoire Homme-Milieux international de Tessékéré, CNRS

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Senegal

Aly Diallo

Observatoire Homme-Milieux international de Tessékéré, CNRS

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Senegal

Département d'agroforesterie

Université Assane SECK de Ziguinchor, Diabir-Ziguinchor, Senegal

Oumar Sarr

Département Biologie végétale

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar-fann, Senegal

Aliou Guisse

Département Biologie végétale

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar-fann, Senegal

Observatoire Homme-Milieux international de Tessékéré, CNRS

Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Senegal

Abstract

Recent advances in drone technology and data processing now make it possible to generate high-resolution images and 3D models that are useful for assessing tree attributes. This study was conducted in Widou Thiengoly, in the Ferlo area of northern Senegal, with the overall objective of applying a photogrammetric approach to measure stem density (stems/ha) using drone imagery. A tree-based method was implemented on a Digital Height Model covering a 10-hectare study area, constructed from drone images. In total, 92 reference trees were counted during the study, and the algorithm detected 75 trees, resulting in an accuracy above 90% (F-score of 0.93). Overall, the algorithm missed 10 trees (omission errors) and falsely detected 3 trees (commission errors), giving a total count of 88 trees. This study suggests that the local maxima filtering algorithm, combined with optimal window sizes and applied to a photogrammetrically derived Digital Height Model, can perform tree counts with acceptable accuracy ($F > 0.90$) in the Sahelian zone.

Keywords: Drone, density, ecosystems, Sahel, Senegal, Ferlo

Introduction

Les arbres jouent un rôle très important dans la conservation des eaux, des sols et de la biodiversité par leurs fonctions agro écologiques (Isaac, 2024). Ils constituent un élément crucial pour le fonctionnement de l'écosystème, et ont des impacts non négligeables sur les cycles biogéochimiques, en particulier ceux de l'eau et du carbone (Diallo *et al.*, 2011 ; Ndiaye *et al.*, 2013).

A l'heure actuelle, les politiques forestières visent à assurer la gestion durable des forêts en conciliant les fonctions économiques, sociales et écologiques. Cependant, la planification forestière est une activité complexe qui doit tenir compte des différents niveaux d'échelle (arbre individuel, peuplement, paysage), des différents niveaux d'intervention (stratégique, opérationnel) et des différents objectifs (récolte, biodiversité, modélisation des feux de forêt, etc.) (Bergseng *et al.*, 2015). Cette complexité, liée à la multiplicité des échelles et des objectifs à concilier, impose le recours à de nouvelles méthodologies pour les programmes d'inventaires forestiers (White *et al.*, 2015). Afin d'œuvrer pour la gestion durable de l'écosystème forestier et réussir la planification forestière, le gestionnaire doit disposer d'un panel d'informations caractérisant l'ensemble de la forêt (Leclère *et al.*, 2018). Ces informations devraient être précises, peu coûteuses, géo localisées, à large échelle et renouvelables et doivent renseigner sur la composition de la forêt, son potentiel récréatif et, son potentiel de production en bois.

Grâce à la photogrammétrie, l'acquisition d'images aériennes multispectrales à très haute résolution (précision décimétrique voire centimétrique) (Lisein *et al.*, 2013) permet la production d'ortho-images et de données 3D (Dandois *et al.*, 2013). Cette technique constitue ainsi avec les drones, une solution intéressante étant donnée 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 de *S-f-M* « *Structure from motion* » (Agisoft LLC. 2014) nécessitant peu d'expertise, a permis des applications dans le domaine forestier (Tang and Shao, 2015) ; (Lisein *et al.*, 2013). L'évolution récente de ces techniques ouvre de nouvelles possibilités pour la caractérisation géométrique des houppiers ou de la canopée des forêts tropicales et permet de calculer avec une grande précision la canopée et la hauteur de chaque arbre d'une forêt et donc d'estimer la densité de cette dernière. Ces possibilités permettraient de remplacer les mesures de terrain fastidieuses et souvent peu précises.

Ainsi, pour estimer avec précision la densité des arbres, surtout pour les arbres de petite taille, l'utilisation de résolutions spatiales plus élevées (images drone) que celles généralement obtenues à partir d'images satellitaires est souvent recommandée (Clark *et al.*, 2004) ; (Read *et al.*, 2003). Les applications pionnières des drones en forêt tropicale ont porté sur l'estimation, à l'échelle des parcelles, des paramètres de la structure forestière en utilisant des indices de télédétection dérivés du MNS (Messinger *et al.*, 2016) ; (Ota *et al.*, 2015) et, dans quelques cas rares, d'ortho-images (Bourgoin *et al.*, 2020). Davantage d'études sont donc nécessaires pour explorer le potentiel des drones et des ortho-images pour la caractérisation de la ressource forestière, notamment à l'échelle de l'arbre. Afin de combler ces limites, notre étude s'appuie sur des paramètres dendrométriques mesurés sur le terrain pour calibrer et valider une approche par photogrammétrie appliquée aux images drones, en vue de caractériser la structure des arbres et d'estimer leur densité à l'échelle de la parcelle.

Cette étude a été menée dans une savane arbustive à arborée de structure simple, c'est-à-dire homogène constituée que par quelques espèces bien connues au sahel. L'objectif général de ce travail est de caractériser le taux de détection des arbres en stéréo et donc la mesure de la densité des tiges (tiges/ha).

Matériel et méthodes

Plan d'échantillonnage et données d'inventaires sur le terrain

Base de sondage et choix du site d'étude

Avant de se rendre sur le terrain, un site de 100 ha a été préalablement sélectionné sur base de Google Earth Satellite (Google, 2015). Ce site a été géolocalisé (les quatre cotés) à partir de cartes issues de l'image satellites sur Google Earth. Les coordonnées géographiques de chacun de ces points sont prises depuis le laboratoire et insérées dans le GPS (Figure 1).

La sélection de la zone d'échantillon a été effectuée de manière à représenter la variabilité de la densité forestière retrouvée dans ces milieux. Le choix de ce site se justifie par l'abondance des deux espèces ligneuses : *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir et *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile prises en compte dans cette étude.

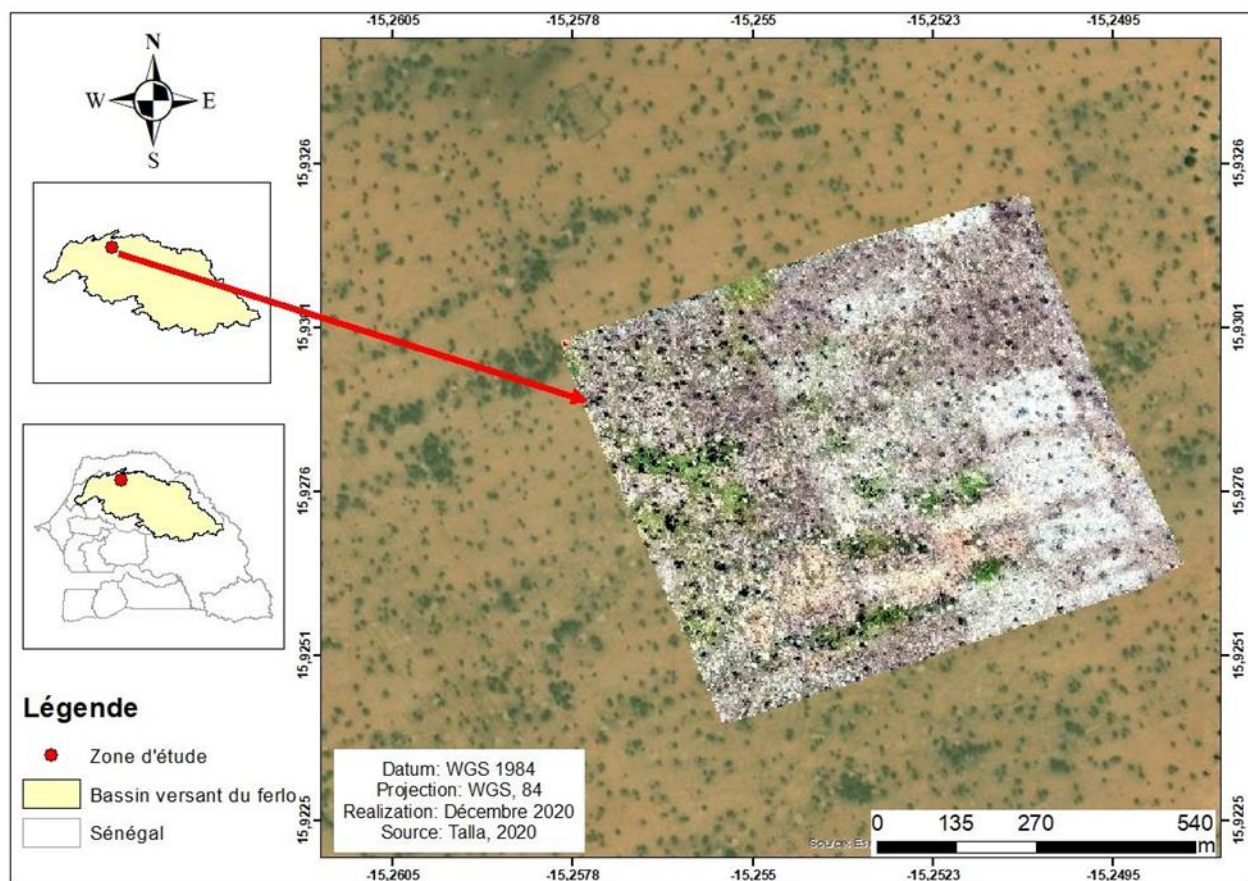


Figure 1 : Site d'étude

Données d'inventaires sur le terrain

Une étude de terrain a été réalisée afin de recueillir les informations réelles sur les arbres. Une placette de 10 ha a été choisie et un échantillonnage intégral y a été effectué (Iizuka et al., 2018). L'identification botanique des individus a été réalisée en suivant la nomenclature de l'APG IV (Angiosperm Phylogeny Group IV, 2016). Seuls les individus dont le diamètre à la base était supérieur ou égal à 3,5 cm ont été pris en compte. Des mesures dendrométriques ont ensuite été effectuées. Les paramètres biophysiques collectés pour chaque arbre incluent : les coordonnées géographiques, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), la hauteur totale (H), les deux diamètres du houppier mesurés selon des orientations fixes (Nord-Sud et Est-Ouest), ainsi que l'état sanitaire de l'arbre (vivant ou mort).

Acquisition des images drone

Matériel

Un drone à voilure DJI – Phantom 4 Pro+ (Version UE) a été utilisé pour cette étude (figure 2). Il est équipé d'une nacelle vidéo 4K en version Black Edition noir mat (figure 2) et d'un capteur CMOS produisant des images de 12 millions de pixels (4000 x 3000) dans les bandes spectrales rouge, verte et bleue. Le Phantom 4 pro pèse 1388g (moins de 2 kg) pour 1 mètre d'envergure et est doté d'une propulsion électrique propulsant l'appareil à une vitesse maximum de 72 km/h. Phantom 4 pro peut voler à une altitude maximum de 6000 m au-dessus du niveau de la mer. Son temps de vol approximatif est de 30 minutes (<https://www.dji.com/phantom-4-pro> consulté le 20 avril 2020). Les vols sont entièrement automatisés, du décollage à l'atterrissage (atterrissage sur le ventre). Son système de pilote automatique est équipé d'une centrale inertielle (gyroscopes et baromètre) ainsi que d'un GPS atteignant une précision de quelques mètres (<https://www.dji.com/phantom-4-pro> consulté le 20 avril 2020).



Figure 2 : Drone DJ Phantom 4 Pro

Méthodes

Collecte de données

La préparation de la prise de vue aérienne a été effectuée avec une station de contrôle au sol en définissant les paramètres de vol suivants : délimitation de la zone rectangulaire à couvrir, hauteur de vol (entre 100 et 750 mètres au-dessus du niveau du sol), recouvrement des images (le recouvrement latéral étant de même valeur que le recouvrement longitudinal), ainsi que la direction et le sens du décollage et de l'atterrissage.

Les plans de vol ont été programmés avant le départ pour la mission de terrain avec l'application mobile Pix4Dcapture (Pix4D SA, Lausanne, Suisse) sur iPad Air (iOS 13.1.1, Apple Worldwide Developers Conference). Les vols se sont déroulés au mois d'août et ont débuté chaque

jour à 10h00 GMT+2 afin de limiter les effets d'ombrage, dans des conditions météorologiques optimales (ensoleillement stable et élévation solaire suffisante).

Le drone a décollé à partir du point de contrôle au sol situé au centre du dispositif. La hauteur du premier vol a été fixée à 50 mètres, soit environ 30 mètres au-dessus de la végétation dominante du site (savane arborée avec des arbres de 3 à 6 m de hauteur en moyenne). Cette hauteur a été choisie afin d'augmenter la résolution spatiale des images tout en assurant un bon appariement (Pix4D, 2019 ; Dandois et al., 2015 ; Fraser and Congalton, 2018 ; Thibaut, 2019).

La zone couverte en stéréoscopie représentait plus de 100 ha pour chaque parcelle. Afin d'assurer une bonne corrélation pour la génération d'un modèle numérique de surface (MNS) de qualité, un recouvrement d'images de 70 % a été appliqué, aussi bien longitudinalement que latéralement.

Traitement photogrammétrique des images

Les photos collectées (3048 photos) ont été traitées avec le logiciel de modélisation 3D Agisoft (Metashape) Version 1.6.2 build 10247 (Agisoft LLC, Saint-Petersbourg, Russie) qui est utilisable sur les systèmes d'exploitation : Microsoft Windows; Linux; macOS (Agisoft LLC, 2018).

Agisoft Metashape Pro est un logiciel de traitement photogrammétrique automatisé d'images numériques. Il génère automatiquement des nuages de points denses classifiables et des modèles polygonaux texturés en 3D. Le logiciel permet aussi de produire des orthomosaïques géoréférencées, des modèles numériques de surface (MNS), de terrain (MNT) et de hauteur (MNH), ce dernier étant également appelé modèle numérique de canopée (MNC) (Agisoft LLC, 2014). Les données générées peuvent être traitées et interprétées directement dans Metashape ou intégrées dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Ce programme est utilisé dans le cadre d'autres études (Gonçalves et Henriques, 2015) ; (Panagiotidis et al., 2017).

Pour la création d'orthomosaïques géoréférencées, de modèles numériques de surface (MNS), de modèles numériques de terrain (MNT) et de modèles numériques de Hauteur (MNH), le processus complet de traitement photogrammétrique est divisé en plusieurs étapes :

(a) alignement automatique et manuel des photos ; (b) placement guidé des GCP ; (c) optimisation sur base des positions relatives des photos et actualisation sur base des positions des GCP afin de géoréférencer au mieux le modèle ; (d) construction du nuage de points dense ; (e) classification des points sols ; (f)-(g)-(h) génération des MNT, MNS et orthomosaïque. La classification des points sols est basée sur l'algorithme progressif TIN. L'algorithme nécessite qu'on lui précise trois paramètres : i) maximum angle

(deg), ii) distance maximale (m), et iii) taille de la cellule (m). Le premier fixe une limite d'angle entre le MNT et la courbe reliant le point d'intérêt à un point de la classe *sol* ; le deuxième fixe une distance maximale entre le point d'intérêt et le MNT ; le dernier correspond à la taille des cellules du processus de classification des points *sol* et constitue l'étape préparatoire de cette classification (Agisoft LLC, 2018).

Un Modèle Numérique de Hauteur (MNH) a été produit en soustrayant le Modèle Numérique de Terrain au Modèle Numérique de Surface ($MNS - MNT = MNH$) (Lisein et al., 2013) ; Ce modèle fournit des informations sur la hauteur des objets se trouvant au-dessus de la surface du sol.

Le MNS représente la hauteur des éléments naturels de la surface, et le MNT est une représentation mathématique de la surface du sol qui contient les données d'élévation du terrain sous la forme d'une grille rectangulaire dans laquelle une valeur d'élévation unique est attribuée à chaque pixel (Lisein et al., 2013).

Détection automatique des arbres individuels

Il est important d'obtenir un décompte d'arbres le plus précis possible, car plusieurs variables forestières en dépendent (densité, biomasse, surface terrière, etc.) (Pouliot et King, 2005).

Cette partie a été réalisée suivant une méthodologie basée sur l'article de (Mohan et al., 2017). Elle consiste en un quadrillage de la zone d'étude, chaque carré faisant 25 m de côté et 10% de ses carrés ont été sélectionnés de manière aléatoire.

Au sein de chacun d'eux, le nombre de houppiers visibles a été compté sur base de l'orthomosaïque et du MNH. Ensuite, une approche de détection des arbres individuels (approche *arbre*, *Individual Tree Detection* (ITD)) a été faite afin d'isoler les apex des arbres. Cette approche passe par un algorithme matriciel d'identification filtrant les maxima locaux (Thibaut, 2019). Les paramètres d'établissement des maxima locaux ont été déterminés à l'aide de l'outil de statistiques filtre-focal dans ArcGIS version 10.4.1. Ce filtre morphologique est choisi pour identifier la valeur du pixel la plus élevée sur la cime de l'arbre à partir du MNH (Navarro et al., 2019). Le nombre de maxima détecté dans chaque carré issu de la sélection aléatoire a été relevé pour chaque itération. Pour chaque carré et chaque itération, une comparaison entre le nombre d'arbres comptés manuellement et le nombre d'arbres détectés par l'algorithme a été faite.

Cependant, il est possible que l'algorithme de détection des maxima locaux détecte des apex d'arbres qui ne le sont pas (FN pour fausse négative, erreur d'omission) et ne détecte pas des apex d'arbres alors qui le sont (FP pour fausse positive, erreur de présence). Les arbres correctement détectés sont

considérés comme des vrais positifs (TP pour true positive) (Mohan et al., 2017).

A la manière de l'étude de (Mohan et al., 2017), pour la taille de fenêtre optimale, trois paramètres ont été calculés pour évaluer la performance de la détection des apex des arbres sur la base d'un algorithme de détection des maxima locaux appliqués au MNH :

- le rappel (recall, r),
- la précision (precision, p) et
- le score F (F-score, F)

Selon les équations suivantes :

$$r = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$p = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$F = 2 * \frac{r * p}{r + p}$$

Le paramètre F correspond à la moyenne harmonique entre r et p et va renseigner sur la précision globale de l'algorithme. r informe sur la mesure de la détection à proprement parlé et p sur la mesure des arbres correctement détectés. Ensuite, un shapefile représentant les positions des pixels de proximité a été généré en fichiers .txt en utilisant le logiciel ArcGIS version 10.4.1 (ESRI, Redlands, CA, USA), et chaque arbre a été marqué avec un numéro d'identification unique.

Estimation du nombre d'arbres individuel

Une méthode itérative a été effectuée basée sur la méthodologie de (Mohan et al., 2017) afin de comparer le nombre d'arbres détectés par l'algorithme et ceux comptés visuellement sur la base de l'orthomosaïque et sur le terrain. Afin d'évaluer les performances de l'algorithme de détection maximale locale, le taux de rappel, la précision et le score F ont été calculés. Bien qu'une grande surface ait été générée (couvrant toute la parcelle), les arbres échantillonnés individuellement provenaient d'une surface relativement plus petite (10 ha) ; par conséquent, les zones d'intérêt ont été extraites pour une analyse plus approfondie (figure 3).

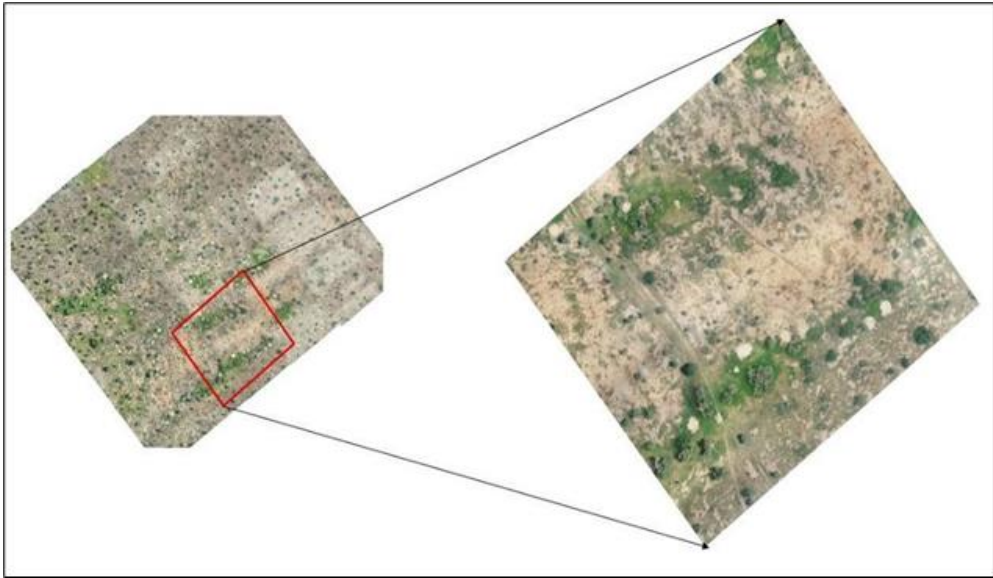


Figure 3 : Zone extraite pour l'analyse

Résultats

Génération des modèles photogrammétriques orthomosaïques géoréférencées, de modèles numériques de surface (MNS), de modèles numériques de terrain (MNT) et de modèles numériques de Hauteur (MNH)

L'orthomosaïque, générée à partir de 3 048 clichés collectés sur le site (figure 4), présente une résolution de 1,17 cm, tandis que celle du modèle numérique de surface (MNS) atteint 1,28 cm. Il s'agit d'une orthophotographie aérienne ou drone, géoréférencée et produite par photogrammétrie, couvrant une superficie d'environ 600×600 m. Elle permet de distinguer avec précision la végétation arborée et herbacée et met en évidence la répartition spatiale des ligneux, généralement isolés, de densité faible à moyenne et disposés de manière hétérogène.

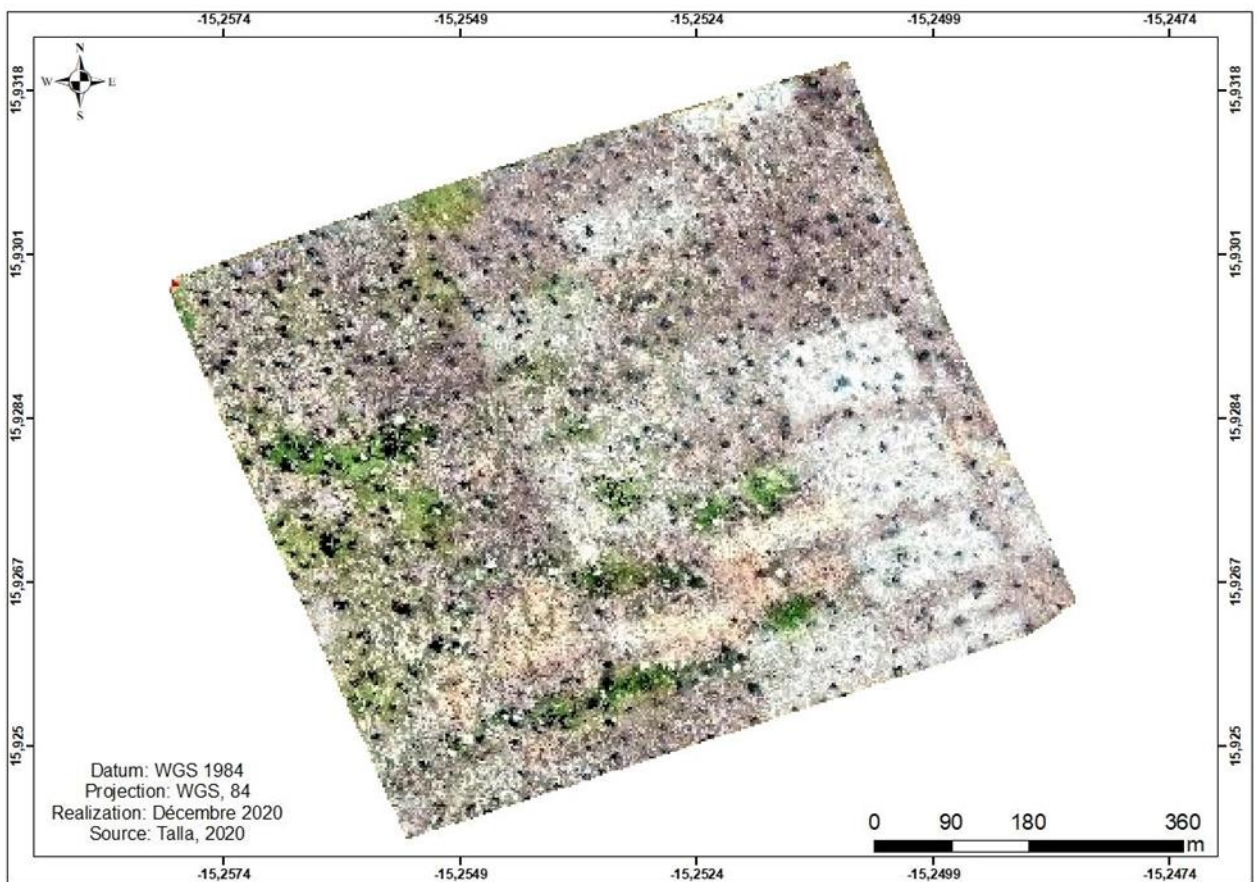


Figure 4 : Orthomosaique géoréférencée de la zone d'étude

Les modèles numériques de surface, de terrain et de hauteur (MNS, MNT et MNH) issus de la reconstruction photogrammétrique des images acquises par drone sont illustrés à la planche 1. Le MNS permet de voir le relief avec la végétation, le MNT restitue uniquement la topographie du sol, et le MNH révèle la structure et la distribution en hauteur de la végétation ligneuse.

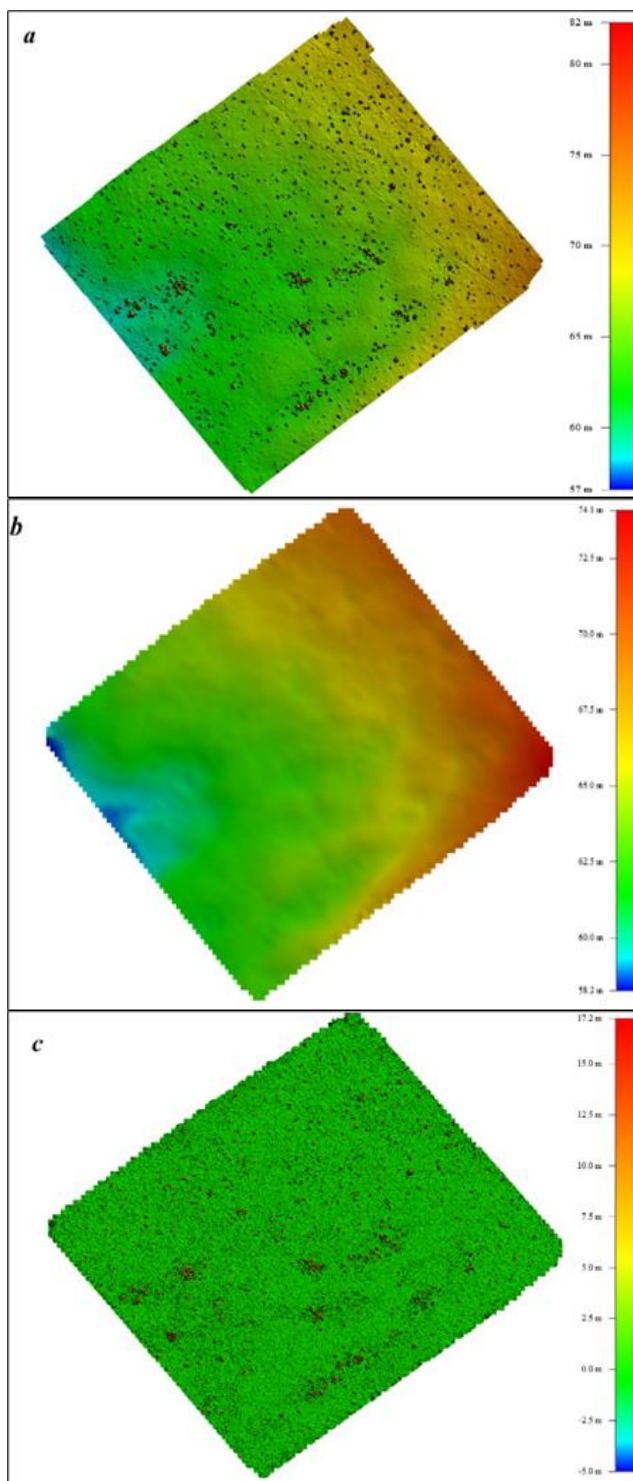


Planche 1 : (a) Modèle Numérique de Surface (b) Modèle Numérique de terrain et (c) Modèle Numérique de Hauteur pour site A. La hauteur maximale est de 17m

Performances de l'algorithme

Les performances de l'algorithme, présentées dans le tableau I, révèlent une valeur globale de corrélation r de 0,97 (variant entre 0,85 et 1) et une précision p de 0,90 (comprise entre 0,72 et 1). Sur les 92 arbres de référence, 81 % ont été correctement détectés, tandis que 10 arbres ont été omis et 3 ont été identifiés à tort, indiquant que la sous-détection reste plus marquée que la sur-détection.

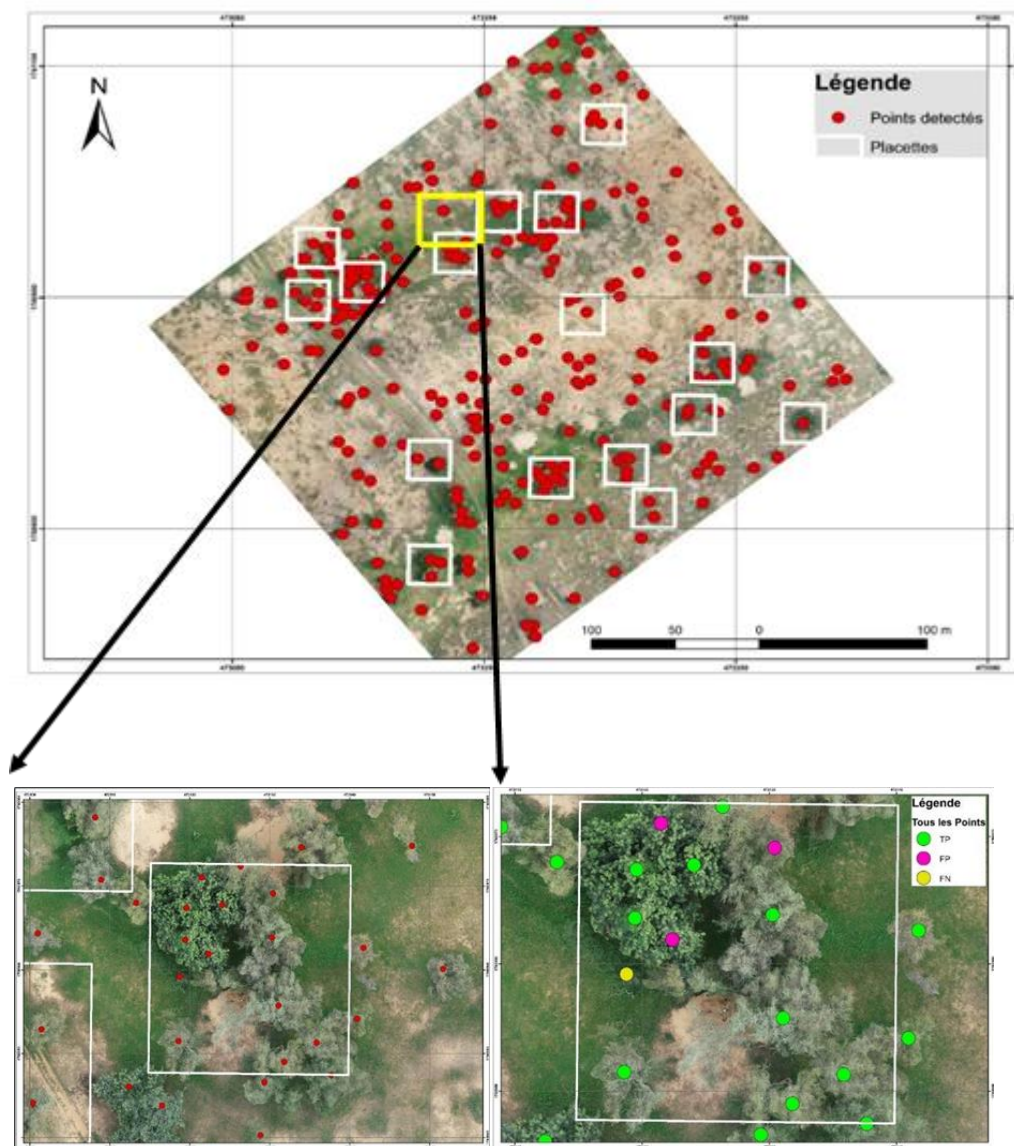
Tableau I : Résultats de l'évaluation de la précision de détection d'arbres individuels pour une taille de fenêtre sélectionnée (23 pixels $\times$ 23 pixels) sur les 16 carrés de 25 m de côté.

Num	N	N algo	TP	FP	FN	r	p	F
12	5	4	4	1	0	1	0,8	0,88
22	5	4	4	1	0	1	0,8	0,88
38	7	6	6	1	0	1	0,85	0,92
59	2	2	2	0	0	1	1	1
63	3	3	0	0	0	1	1	1
72	12	13	8	3	1	0,88	0,72	0,8
86	5	3	3	0	0	1	1	1
88	7	6	6	0	1	0,85	1	0,92
92	14	14	13	1	1	0,92	0,92	0,92
96	4	3	3	1	0	1	0,75	0,85
99	2	2	2	0	0	1	1	1
105	4	4	4	0	0	1	1	1
123	5	4	4	1	0	1	0,8	0,88
132	7	7	7	0	0	1	1	1
154	7	6	6	1	0	1	0,85	0,92
159	3	3	3	0	0	1	1	1
Totale	92	88	75	10	3	0,97	0,90	0,93

Les faux positifs (FP), les faux négatifs (FN), les vrais positifs (TP), le rappel (r), la précision (p) et le score F (F) pour une taille de fenêtre de 25m *25 m et chaque carré d'identifiant ID ; où N est le nombre d'arbres comptés visuellement et N algo le nombre d'arbres détectés par l'algorithme.

La densité d'arbres observée et calculée dans la zone d'étude à partir du modèle numérique de hauteur est de 8,8 arbres par hectare. Les résultats les plus précis ont été obtenus principalement dans des sous-parcelles d'essai allant de 3,2 à 14 arbres par ha. En moyenne, 81 % des arbres ont été détectés correctement, avec des erreurs de commission et d'omission limitées à 3 % et 10 % respectivement, avec un score F de 0,93. En revanche, l'algorithme n'a détecté que 0,66% des arbres dans la sous-parcelle 72 avec un score F de 0,8. La commission associée et les erreurs d'omission étaient respectivement de 8,3 % et 25 % (Planche 2).

Planche 2 : Détection d'arbres individuels à partir d'un modèle de hauteur de la canopée (CHM) dérivé d'un drone



Points rouges représentent les cimes des arbres détectées dans la zone d'étude au niveau du peuplement (A), et au niveau de la placette (placette 72) (B).

Discussion

Durant la dernière décennie, de nombreuses études ont souligné le potentiel de la technologie de télédétection en foresterie (Mohan et al., 2017). Grâce à leur faible coût et à leurs performances rapides par rapport aux méthodes traditionnelles, les drones ont été utilisés pour estimer le nombre d'arbres, les hauteurs et les dimensions des canopées (Sadhasivam et al., 2019

; Thibaut, 2019 ; Mohan et al., 2017 ; Zarco-Tejada, 2014 ; Puttock et al., 2015 ; Wallace et al., 2014).

Dans le cas de notre étude, l'algorithme utilisant le MNH pour identifier les maxima locaux a permis d'atteindre une précision de 81 % (75 arbres détectés sur 92), avec un score F de 0,93. Cette performance peut être expliquée par la qualité de l'orthomosaïque obtenue dans des conditions météorologiques optimales (ciel dégagé, absence de vent) (Dandois et al., 2015), ainsi que par la structure relativement simple des formations végétales du Ferlo. La sous-détection (10 %) observée s'explique par la présence d'arbres de petite taille aux houppiers peu distincts, souvent masqués par des arbres voisins plus grands (Lim et al., 2015). À l'inverse, les cas de sur-détection (3 %) résultent de confusions dans la segmentation des houppiers.

Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux de la littérature. Par exemple, (La et al., 2015 ; Vauhkonen et al., 2010) ont obtenu une précision globale de 91,6 % avec des erreurs d'omission et de commission respectivement de 5,7 % et 2,7 %. (Kattenborn et al., 2019) ont rapporté des précisions variant de 86,1 % à 98,2 % selon le type de forêt. Les études basées sur le LiDAR montrent également des résultats comparables, avec des précisions supérieures à 80 % (Silva et al., 2015). Toutefois, certaines études présentent des scores F plus faibles que le nôtre (0,76 et 0,86 respectivement (Thibaut, 2019 ; Mohan et al., 2017)), ce qui souligne l'importance des conditions locales (densité, structure verticale des peuplements, hétérogénéité des houppiers, qualité des images) (La et al., 2015 ; Vauhkonen et al., 2010 ; Wulder et al., 2003).

Conclusion

Il convient de souligner que les drones ont le potentiel de fournir de nombreuses informations sur la cartographie des variables forestières (telles que la densité, le couvert forestier, le volume et la biomasse d'un peuplement, etc.)

Cette étude suggère que l'algorithme de filtrage des maxima locaux combiné avec des tailles de fenêtres optimales, appliqués sur un Modèle Numérique de Hauteur construit par photogrammétrie est capable d'effectuer des comptages d'arbres avec une précision acceptable ($F > 0,90$) dans la zone sahélienne.

Ensuite, afin d'évaluer la qualité de mesure de la hauteur et du diamètre de la couronne des arbres dérivés du modèle, une régression linéaire simple entre ces mesures et les mesures sur le terrain a été ajustée pour sous-échantillonner 92 arbres, et leurs R^2 respectifs étaient de 0,94 et 0,74. Par conséquent, il est considéré comme correct de mesurer la hauteur et le diamètre de la couronne des arbres grâce à l'imagerie par drone en milieu savanicole. Ainsi, ce travail révèle le potentiel futur des drones et des

traitements de photogrammétrie basés sur la surveillance des forêts sahéliennes, et suggère que les recherches futures devraient se concentrer sur le développement de modèles prédictifs pour l'estimation de la biomasse aérienne et du volume des tiges à partir d'images de drones.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Labex DRIIHM, programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-11-LABX-0010.

References:

1. Agisoft LLC. (2014). *Tutorial beginner level: Orthomosaic and DEM generation with Agisoft PhotoScan Pro 1.3 with ground control points* (14 p). Agisoft LLC.
2. Agisoft LLC. (2018). *Agisoft PhotoScan user manual* (121 p). Agisoft LLC.
3. Angiosperm Phylogeny Group IV (APG IV). (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181(1), 1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
4. Bergseng, E., Ørka, H. O., Næsset, E., & Gobakken, T. (2015). Assessing forest inventory information obtained from different inventory approaches and remote sensing data sources. *Annals of Forest Science*, 72(1), 33–45. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0400-5>
5. Bourgoïn, C., Betbeder, J., Couteron, P., Blanc, L., Le Roux, R., & Cornu, G. (2020). UAV-based canopy textures assess degraded structures in human-modified Amazonian forest. *Ecological Indicators*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106236>
6. Brundtland, G. H. (1987). Our common future—Call for action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291–294. <https://doi.org/10.1017/S0376892900016855>
7. Clark, D. B., Castro, C. S., Alvarado, L. D. A., & Read, J. M. (2004). Quantifying mortality of tropical rain forest trees using high-spatial resolution satellite data. *Ecology Letters*, 7(1), 52–59. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00547.x>

8. Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2013). High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, 136, 259–276. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005>
9. Dandois, J. P., Olano, M., & Ellis, E. C. (2015). Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. *Remote Sensing*, 7(10), 13895–13920. <https://doi.org/10.3390/rs71013895>
10. Diallo, A., Faye, M. N., & Guissé, A. (2011). Structure des peuplements ligneux dans les plantations d'*Acacia senegal* L. Wild dans la zone de Dahra Ferlo, Sénégal. *Revue d'Écologie*, 66, 415–427.
11. Fraser, B. T., & Congalton, R. G. (2018). Issues in unmanned aerial systems data collection of complex forest environments. *Remote Sensing*, 10(6), 908. <https://doi.org/10.3390/rs10060908>
12. Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>
13. Google. (2015). *Imagerie satellite dans Google Earth*. <https://www.google.com/earth>
14. Isaac, M. E., Sinclair, F., Laroche, G., Awokuse, T., Baral, H., Bayala, J., Bisseleua, D., ... & van Noordwijk, M. (2024). The ties that bind: How trees can enhance agroecological transitions. *Agroforestry Systems*, 98, 2369–2383. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01014-6>
15. Kattenborn, T., Eichel, J., & Fassnacht, F. E. (2019). Convolutional neural networks enable efficient, accurate and fine-grained segmentation of plant species and communities from high-resolution UAV imagery. *Scientific Reports*, 9, 17656. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53797-9>
16. La, H. P., Eo, Y. D., Chang, A., & Kim, C. (2015). Extraction of individual tree crown using hyperspectral image and LiDAR data. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(4), 1078–1087. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0460-7>
17. Leclère, L., & Tech, G. A. B. (2018). *Apport de la télédétection aérienne à très haute résolution pour la caractérisation qualitative et quantitative de la ressource forestière: Application à un massif forestier feuillu en Ardenne belge* (Mémoire de master, Université de Liège, 96 p).
18. Lim, Y. S., La, P. H., Park, J. S., Lee, M. H., Pyeon, M. W., & Kim, J. I. (2015). Calculation of tree height and canopy crown from drone images using segmentation. *Journal of the Korean Society of*

- Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 33(6), 605–614. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2015.33.6.605>
19. 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. <https://doi.org/10.3390/f4040922>
 20. Lizuka, K., Yonehara, T., Itoh, M., & Kosugi, Y. (2018). Estimating tree height and diameter at breast height (DBH) from digital surface models and orthophotos obtained with an unmanned aerial system for a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forest. *Remote Sensing*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.3390/rs10010013>
 21. Messinger, M., Asner, G. P., & Silman, M. (2016). Rapid assessments of Amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. *Remote Sensing*, 8(8), 615. <https://doi.org/10.3390/rs8080615>
 22. Mohan, M., Silva, C. A., Klauberg, C., Jat, P., Catts, G., Cardil, A., Hudak, A. T., & Dia, M. (2017). Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest. *Forests*, 8(9), 340. <https://doi.org/10.3390/f8090340>
 23. Navarro, J. A., Algeet, N., Fernández-Landa, A., Esteban, J., Rodríguez-Noriega, P., & Guillén-Climent, M. L. (2019). Integration of UAV, Sentinel-1, and Sentinel-2 data for mangrove plantation aboveground biomass monitoring in Senegal. *Remote Sensing*, 11(1), 77. <https://doi.org/10.3390/rs11010077>
 24. Ndiaye, O. (2013). *Caractéristiques des sols, de la flore et de la végétation du Ferlo, Sénégal* (Thèse de doctorat unique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 114 p).
 25. Ota, T., Ogawa, M., Shimizu, K., Kajisa, T., Mizoue, N., & Yoshida, S. (2015). Aboveground biomass estimation using a structure from motion approach with aerial photographs in a seasonal tropical forest. *Forests*, 6(11), 3882–3898. <https://doi.org/10.3390/f6113882>
 26. Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P., & Chiteculo, V. (2017). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2392–2410. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264028>
 27. Pix4D. (2019). *Pix4Dmapper 4.5 user manual*. Pix4D SA. <https://support.pix4d.com>
 28. Pouliot, D. A., King, D. J., & Pitt, D. G. (2005). Development and evaluation of an automated tree detection–delineation algorithm for

- monitoring regenerating coniferous forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(1), 2332–2345. <https://doi.org/10.1139/x05-146>
29. Puttock, A. K., Cunliffe, A. M., Anderson, K., & Brazier, R. E. (2015). Aerial photography collected with a multirotor drone reveals impact of Eurasian beaver reintroduction on ecosystem structure. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(3), 123–130. <https://doi.org/10.1139/juvs-2015-0015>
30. Read, J. M., Clark, D. B., Venticinque, E. M., & Moreira, M. P. (2003). Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. *Journal of Applied Ecology*, 40(3), 592–600. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2003.00814.x>
31. Sadhasivam, N., Dineshkumar, C., Rahaman, S. A., & Bhardwaj, A. (2019). Estimation of forest tree heights and crown diameter using high-resolution images from UAV: A case study of Kalesar, Haryana. In *International conference on unmanned aerial system in geomatics* (pp. 253–263). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17804-6_21
32. Silva, C. A., Crookston, N. L., Hudak, A. T., & Vierling, L. A. (2015). rLiDAR: An R package for reading, processing and visualizing LiDAR (light detection and ranging) data (Version 0.1, 24 p). <http://cran.r-project.org/web/packages/rLiDAR/index.html>
33. Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26(4), 791–797. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>
34. Thibaut, Q. (2019). *Structure d'une forêt claire de type miombo par imageries drone et satellitaire* (Travail de fin d'études, Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, 70 p).
35. Vauhkonen, J., Korpela, I., Maltamo, M., & Tokola, T. (2010). Imputation of single-tree attributes using airborne laser scanning-based height, intensity, and alpha shape metrics. *Remote Sensing of Environment*, 114(6), 1263–1276. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.01.016>
36. Wallace, L., Lucieer, A., Malenovsky, Z., Turner, D., & Vopěnka, P. (2016). Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. *Forests*, 7(3), 62. <https://doi.org/10.3390/f7030062>
37. White, J. C., Stepper, C., Tompalski, P., Coops, N. C., & Wulder, M. A. (2015). Comparing ALS and image-based point cloud metrics and modelled forest inventory attributes in a complex coastal forest environment. *Forests*, 6(10), 3704–3732. <https://doi.org/10.3390/f6103704>

38. Wulder, M. A., Dechka, J. A., Gillis, M. A., Luther, J. E., Hall, R. J., Beaudoin, A., & Franklin, S. E. (2003). Operational mapping of the land cover of the forested area of Canada with Landsat data: EOSD land cover program. *The Forestry Chronicle*, 79(6), 1075–1083. <https://doi.org/10.5558/tfc791075-6>
39. Zarco-Tejada, P. J., Diaz-Varela, R., Angileri, V., & Loudjani, P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.004>