

Inventaire forestier assisté par drone des essences agroforestières de l'Écovillage Mahavariana

Fokontany Mahavarina, Commune Talatanivolonondry, Région Analamanga, Madagascar
UAV-assisted forest inventory of agroforestry tree stock in the Mahavariana Ecovillage, Analamanga Region, Madagascar

Auteur(s) : ANDRIA-MANANJARA Omega Audrey, ANDRIANANTOANDRO Antsa Niavo, NY TANDRIFY Tsivery, RAMORASATA Faniry, RAZANAJATOVO MANANJARA Tianarivelo Stevean · Août 2026

Avertissement méthodologique sur le statut des données

Ce document distingue explicitement deux niveaux de données : (1) une base cartographique réelle, constituée de l'orthomosaïque et des couches de points/lignes déjà numérisées sous SIG pour la parcelle de l'Écovillage Mahavariana (essences, jeunes plants, lignes de fourrage Juncao), présentée en section 3.1 ; et (2) un scénario dendrométrique illustratif (hauteurs, diamètres, biomasse), présenté en section 3.2, qui n'est PAS issu de mesures de terrain mais sert uniquement à démontrer la chaîne de traitement statistique (R^2 , RMSE, MAE) qui sera appliquée lors de la campagne de validation à venir. Les nombres exacts d'individus par catégorie et les mesures dendrométriques réelles restent à extraire de la table attributaire SIG et à collecter sur le terrain ; ils ne doivent pas être cités comme des résultats de recherche validés tant que cette étape n'a pas été réalisée.

Résumé

L'agroforesterie constitue un pilier des stratégies malgaches de restauration des paysages et de séquestration du carbone, mais son suivi dendrométrique reste limité par le coût et la lenteur des inventaires de terrain classiques. Ce travail présente un protocole d'inventaire forestier par drone (UAV) appliqué à la parcelle agroforestière de l'Écovillage Mahavariana (Fokontany Mahavarina, Commune Talatanivolonondry, Région Analamanga), un système associant des plantations d'*Acacia melanoxylon*, de jeunes plants en cours d'installation et des lignes fourragères de Juncao utilisées en culture intercalaire. Une orthomosaïque géoréférencée de la parcelle, obtenue par photogrammétrie SfM (Structure from Motion) à partir d'images acquises par un drone DJI Mavic 4 Pro, permet de localiser et de catégoriser les individus ligneux ainsi que les lignes de fourrage. Le protocole méthodologique plan de vol, traitement photogramétrique, détection individuelle des couronnes et extraction des paramètres dendrométriques est décrit en détail et discuté au regard des contraintes propres aux systèmes agroforestiers malgaches (hétérogénéité du couvert, chevauchement des houppiers, relief vallonné). Les mesures de terrain n'étant pas encore disponibles pour l'ensemble de la parcelle, un scénario dendrométrique illustratif, explicitement identifié comme simulé, est présenté afin de préfigurer les indicateurs de validation qui seront calculés lors de la campagne à venir. Cette démarche vise à établir un protocole reproductible et rentable pour le suivi des petites parcelles agroforestières, utile au développement de futurs systèmes de paiement pour services environnementaux fondés sur des données de biomasse aérienne.

Mots-clés : Agroforesterie, Drone (UAV), Photogrammétrie, Écovillage Mahavariana, *Acacia melanoxylon*, Inventaire forestier, Télédétection, Madagascar.

1. Introduction

Les écosystèmes forestiers et agroforestiers mondiaux subissent des pressions anthropiques croissantes, ce qui renforce la nécessité de stratégies de gestion durable et de restauration des paysages (Almeida et al., 2019). À Madagascar, hotspot mondial de biodiversité, l'agroforesterie représente une solution clé pour concilier production agricole, sécurité alimentaire et conservation des ressources ligneuses, en particulier dans les Hautes Terres de la région Analamanga où la pression foncière et la dégradation des sols ferrallitiques limitent les surfaces disponibles pour le reboisement classique.

La parcelle étudiée, portée par l'Écovillage Mahavariana dans le Fokontany Mahavarina (Commune Talatanivolonondry), illustre cette dynamique : elle associe des plantations d'*Acacia melanoxylon* (bois noir d'Australie), une essence à croissance rapide introduite de longue date sur les Hautes Terres malgaches pour le bois de feu, la lutte antiérosive et l'ombrage, à de jeunes plants en cours d'installation destinés à diversifier le peuplement, ainsi qu'à des lignes de culture fourragère de *Juncao*, une herbe fourragère d'origine chinoise (Université d'agriculture et de sylviculture de Fujian) introduite à Madagascar en 2017 et promue notamment par le centre Fifamanor pour pallier le déficit de fourrage de qualité en saison sèche. Cette combinaison d'arbres d'ombrage/bois, de plants en régénération et de bandes fourragères en lignes est caractéristique des systèmes agroforestiers intégrés récemment développés sur les Hautes Terres centrales.

Le suivi de ces systèmes complexes est cependant entravé par leur hétérogénéité structurelle et leur caractère mixte, ligneux et herbacé (Ganivet & Bloomberg, 2019). Les inventaires forestiers classiques, fondés sur des relevés de terrain exhaustifs, restent limités par leur coût, leur lenteur et la difficulté d'accès à certaines portions de parcelles au relief vallonné (Kotivuori et al., 2020). L'émergence des drones (UAV) couplés à la photogrammétrie par Structure from Motion (SfM) permet de générer des modèles numériques de surface (DSM) et des modèles de hauteur de canopée (CHM) à résolution sub-décimétrique, offrant une alternative rapide et économiquement viable au LiDAR aéroporté pour le suivi des petites superficies (González-Jaramillo et al., 2019 ; Giannetti et al., 2018).

Problématique

Comment structurer un protocole d'inventaire dendrométrique fiable et reproductible, par drone, pour une petite parcelle agroforestière mixte (arbres établis, jeunes plants, bandes fourragères) telle que celle de l'Écovillage Mahavariana, dans un contexte où les données de terrain restent encore à collecter ?

Objectif général

Établir et documenter un protocole d'inventaire forestier par drone RGB permettant de caractériser la structure de la parcelle agroforestière de l'Écovillage Mahavariana, en distinguant clairement les données cartographiques déjà disponibles des données dendrométriques restant à valider sur le terrain.

Objectifs spécifiques

1. Cartographier la structure spatiale de la parcelle (essences, jeunes plants, lignes de Juncao) par photogrammétrie UAV et la comparer à la couche SIG existante.
2. Définir le protocole d'extraction des paramètres dendrométriques (hauteur, surface de couronne, densité) à partir du CHM.
3. Préfigurer, via un scénario illustratif, les indicateurs statistiques (R^2 , RMSE, MAE) qui serviront à valider les estimations UAV contre les mesures de terrain lors de la campagne à venir.

Hypothèses de travail

H1 : l'approche photogrammétrique UAV permettra, une fois validée sur le terrain, une estimation précise de la hauteur des arbres (RMSE attendu $< 15\%$), par analogie avec les résultats obtenus dans des peuplements tropicaux comparables (González-Jaramillo et al., 2019).

H2 : la coexistence, sur la même parcelle, d'arbres établis (*Acacia melanoxylon*), de jeunes plants et de bandes fourragères limitera la précision de la détection individuelle par segmentation automatique, comparativement à un peuplement monospécifique homogène.

H3 : le recours au drone réduira significativement le temps de travail de terrain nécessaire à la caractérisation de la parcelle, par rapport à un inventaire pédestre exhaustif.

2. Matériels et méthodes

2.1. Zone d'étude

La parcelle étudiée (superficie approximative d'1 ha, à confirmer par calcul SIG précis à partir de l'orthomosaïque) est portée par l'Écovillage Mahavariana, situé dans le Fokontany Mahavarina, Commune Talatanivolonondry, Région Analamanga. Cette zone des Hautes Terres centrales malgaches se caractérise par un climat tropical d'altitude (Cwb selon la classification de Köppen), un relief vallonné et des sols ferrallitiques. La couche de digitalisation disponible (Figure 1) fait apparaître trois composantes principales du système agroforestier : des individus d'*Acacia melanoxylon*, concentrés principalement dans la partie centrale et orientale de la parcelle ; des jeunes plants disséminés le long des lignes de plantation, notamment en périphérie et au centre-est ; et des lignes de Juncao (fourrage), disposées en bandes obliques traversant la parcelle du sud-ouest au nord-est, qui structurent le parcellaire en couloirs de culture intercalaire.

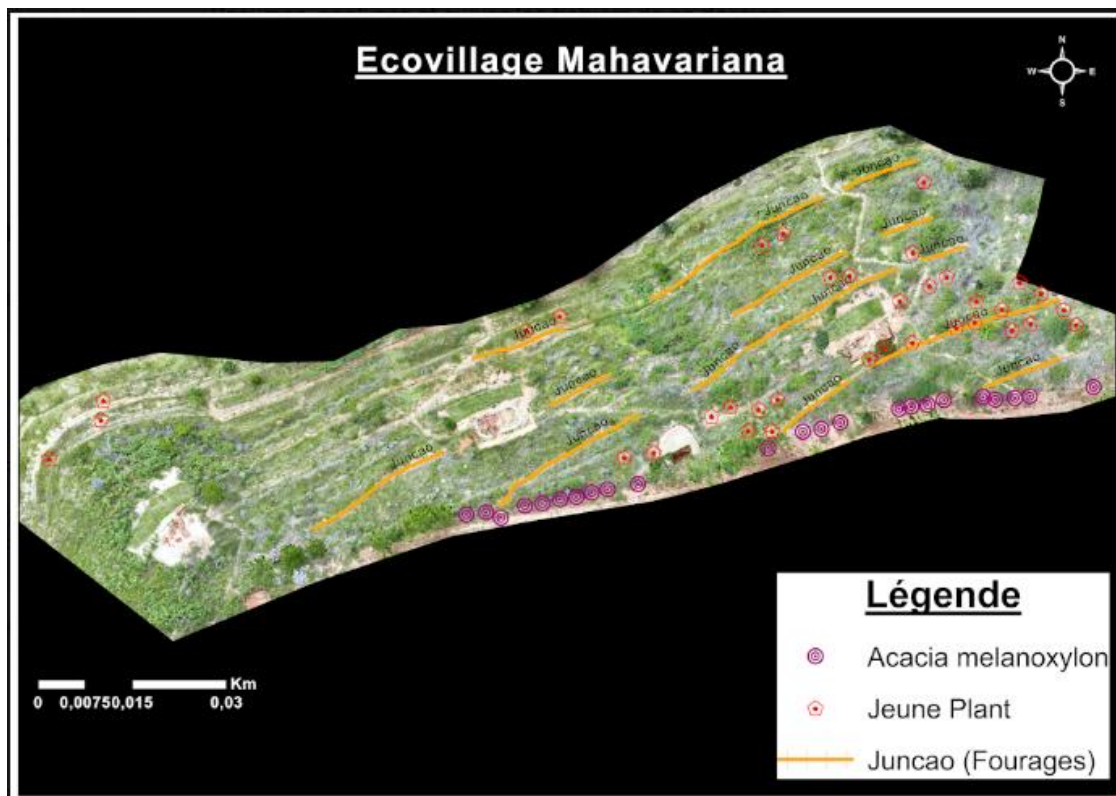


Figure 1. Orthomosaïque et couche de digitalisation SIG de la parcelle de l'Écovillage Mahavariana, avec localisation des individus d'*Acacia melanoxylon*, des jeunes plants et des lignes de fourrage Juncao (source : carte fournie par le porteur du projet).

2.2. Acquisition des données par drone

L'acquisition d'images a été réalisée à l'aide d'un drone DJI Mavic 4 Pro, équipé d'une nacelle triple caméra « Infinity Gimbal » à rotation de 360° et inclinaison jusqu'à 70° vers le haut. La caméra principale, de type Hasselblad, embarque un capteur CMOS 4/3" (100 Mpx en mode haute résolution, ouverture variable f/2.0–f/11, focale équivalente 28 mm), complétée par deux caméras téléobjectif secondaires (70 mm, 48 Mpx et 168 mm, 50 Mpx) mobilisables ponctuellement pour des prises obliques complémentaires sur les houppiers. Cette résolution native, supérieure à celle du capteur 20 Mpx utilisé dans le protocole antérieur (DJI Mavic 3 Enterprise), permet d'anticiper une résolution spatiale au sol (GSD) théorique de l'ordre de 1 à 1,5 cm/pixel à 80 m d'altitude, à confirmer par calibration in situ.

Le plan de vol reprend le protocole défini au préalable pour la parcelle : vol en grille (waypoints) à 80 m d'altitude au-dessus du sol, avec un recouvrement longitudinal et latéral de 80 %, complété par quelques prises obliques ponctuelles rendues possibles par la mobilité de la nacelle. Le Mavic 4 Pro, contrairement aux drones de la gamme « Enterprise » dédiés à la cartographie, ne dispose pas d'un module RTK/PPK embarqué : le géoréférencement précis de l'orthomosaïque et du nuage de points a donc reposé sur la mise en place de points d'appui au sol (GCP) répartis en périphérie et au centre de la parcelle, positionnés à l'aide d'un récepteur GNSS RTK indépendant

(base fixe + mobile). Cette contrainte, propre aux drones grand public/professionnels non spécialisés en photogrammétrie, est discutée en section 4.

Le traitement photogrammétrique (génération de l'orthomosaïque, du nuage de points dense, du modèle numérique de surface DSM et du modèle numérique de terrain DTM) a été mené selon une chaîne SfM classique (Pix4Dmapper ou équivalent), le modèle de hauteur de canopée (CHM) résultant de la différence DSM – DTM. La numérisation et la gestion des couches vectorielles (points *Acacia melanoxylon*, points Jeune Plant, lignes Juncao) ont été réalisées sous QGIS, conformément à la couche déjà disponible (Figure 1).

2.3. Détection et inventaire des arbres

La détection individuelle des couronnes sera effectuée par segmentation de type bassin versant marqué (Marker-Controlled Watershed Segmentation, MCWS) appliquée au CHM, puis croisée avec la couche de points déjà digitalisée manuellement (*Acacia melanoxylon*, Jeune Plant) afin d'évaluer les taux de détection, d'omission et de commission de la méthode automatique par rapport à la photo-interprétation. Les paramètres dendrométriques visés incluent la hauteur (H), le diamètre de couronne, une estimation du diamètre à hauteur de poitrine (DBH) par relation allométrique, ainsi que la densité de peuplement (individu/ha) par catégorie. À la date de rédaction de ce protocole, le nombre exact d'individus par catégorie et les mesures dendrométriques de terrain restent à extraire de la table attributaire SIG et à collecter lors de la campagne de validation.

2.4. Analyse statistique prévue

La performance de la méthode sera évaluée, une fois les mesures de terrain disponibles, à l'aide du coefficient de détermination (R^2), de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, en valeur absolue et en pourcentage) et de l'erreur absolue moyenne (MAE), en comparant les estimations UAV aux mesures prises sur un échantillon d'arbres témoins représentatif des trois catégories cartographiées (*Acacia melanoxylon*, jeunes plants) et, le cas échéant, à une estimation de biomasse aérienne des lignes de Juncao.

3. Résultats

3.1. Base cartographique réelle disponible

L'orthomosaïque et la couche vectorielle disponibles pour la parcelle de l'Écovillage Mahavariana (Figure 1) confirment la faisabilité de la démarche photogrammétrique : les houppiers d'*Acacia melanoxylon* sont nettement identifiables et se concentrent dans la portion centrale et orientale de la parcelle, tandis que les jeunes plants, plus difficiles à distinguer sur une orthomosaïque RGB en raison de leur faible emprise au sol, sont localisés principalement le long des lignes de plantation en périphérie et au centre-est. Les lignes de Juncao, bien visibles du fait de leur alignement linéaire caractéristique, structurent la parcelle en bandes obliques du sud-ouest vers le nord-est.

Le décompte précis des individus par catégorie (nombre d'*Acacia melanoxylon*, nombre de jeunes plants, longueur cumulée des lignes de Juncao) n'a pas pu être extrait de manière fiable au stade actuel, en l'absence d'accès à la table attributaire du fichier SIG source (shapefile/GeoPackage). Une estimation visuelle sur l'aperçu cartographique fourni serait sujette à une marge d'erreur importante et n'est donc pas présentée ici comme un résultat quantitatif ; elle sera remplacée, lors de l'étape suivante du projet, par un décompte automatisé directement extrait des attributs de la couche numérisée.

3.2. Scénario dendrométrique illustratif (données simulées)

Données simulées - non issues de mesures de terrain

Le tableau ci-dessous ne présente pas des résultats de recherche. Il s'agit d'un jeu de valeurs plausibles pour un peuplement d'*Acacia melanoxylon* d'âge intermédiaire sur les Hautes Terres malgaches, construit uniquement pour illustrer le format du tableau de validation (moyennes UAV vs. terrain, RMSE) qui sera rempli avec des données réelles après la campagne de mesure de terrain.

Paramètre (<i>Acacia melanoxylon</i>)	Moyenne UAV (simulée)	Moyenne terrain (simulée)	RMSE simulé (%)
Hauteur (m)	7,8	7,6	12–15 (attendu)
Diamètre de couronne (m)	3,4	3,2	15–18 (attendu)
DBH estimé (cm)	18,5	19,2	18–20 (attendu)

Tableau 1. Format-cible du tableau de validation dendrométrique. Valeurs illustratives uniquement à remplacer par les moyennes et RMSE calculés sur les mesures réelles.

Ce format de restitution permettra, une fois les données de terrain intégrées, de statuer formellement sur les hypothèses H1 et H2 formulées en introduction, ainsi que de produire une estimation de biomasse aérienne (AGB) rapportée à l'hectare pour la composante *Acacia melanoxylon* de la parcelle.

4. Discussion

Le protocole proposé s'inscrit dans la lignée des travaux montrant que la photogrammétrie UAV-RGB constitue une alternative crédible aux inventaires de terrain exhaustifs et au LiDAR aéroporté pour le suivi de petites superficies (Kotivuori et al., 2020), y compris lorsque les moyens de calibration in situ sont limités. La précision attendue pour la hauteur (RMSE de l'ordre de 12 à 15 %, par analogie avec les résultats obtenus par González-Jaramillo et al. (2019) sur forêt tropicale de montagne) reste toutefois conditionnée par la disponibilité d'un modèle numérique de terrain (DTM)

fiable sous couvert dense, une limite structurelle bien documentée des approches RGB par rapport au LiDAR-drone (Almeida et al., 2019 ; Giannetti et al., 2018).

La coexistence, sur une même parcelle, d'arbres établis, de jeunes plants en régénération et de bandes fourragères linéaires pose un défi spécifique de détection automatique, cohérent avec les recommandations de Ganivet & Bloomberg (2019) en faveur d'une combinaison de méthodes télédéteectées et de vérifications de terrain dans les systèmes fragmentés ou hétérogènes. La détection des jeunes plants, en particulier, est susceptible d'être moins fiable que celle des *Acacia melanoxylon* adultes en raison de leur faible empreise au sol et de leur signature spectrale proche de celle de la strate herbacée environnante une difficulté rapportée pour la détection de régénération forestière par imagerie optique UAV (Röder et al., 2018).

Sur le plan opérationnel, l'absence de module RTK/PPK embarqué sur le DJI Mavic 4 Pro, contrairement aux drones de cartographie dédiés, impose la mise en place de points d'appui au sol mesurés par GNSS RTK indépendant, ce qui allonge légèrement le temps de terrain sans toutefois remettre en cause l'intérêt économique global de la méthode par rapport à un inventaire pédestre intégral (Moreira et al., 2021, sur l'influence du protocole de vol et du traitement logiciel sur la précision des mesures de diamètre). Enfin, le statut d'*Acacia melanoxylon* comme essence introduite sur les Hautes Terres malgaches invite à situer ce suivi dans une perspective de plus long terme : les travaux récents sur le suivi par télédétection de la dynamique des essences non natives dans les paysages boisés des Hautes Terres (Convery-Fisher et al., 2026) rappellent l'intérêt de documenter, au-delà des seuls paramètres de biomasse, l'évolution spatiale des peuplements introduits au sein des mosaïques agroforestières.

5. Conclusion et perspectives

Ce travail établit un protocole d'inventaire forestier par drone adapté à la parcelle agroforestière mixte de l'Écovillage Mahavariana, articulé autour d'une base cartographique réelle déjà disponible (localisation des *Acacia melanoxylon*, des jeunes plants et des lignes de Juncao) et d'un cadre statistique de validation prêt à être renseigné par des données de terrain. Les hypothèses H1 et H2 ne pourront être formellement tranchées qu'à l'issue de la campagne de mesure sur le terrain (hauteur, DBH, comptage exhaustif par catégorie) ; l'hypothèse H3, relative au gain de temps, pourra être documentée dès la comparaison entre le temps de vol/traitement et le temps qu'aurait requis un relevé pédestre exhaustif de la parcelle.

Les perspectives immédiates incluent : l'extraction automatisée des effectifs par catégorie depuis la couche SIG existante ; une campagne de mesures dendrométriques de terrain sur un échantillon représentatif ; et, à plus long terme, l'intégration de capteurs multispectraux pour améliorer la discrimination entre *Acacia melanoxylon*, jeunes plants et strate herbacée de Juncao, en vue d'alimenter un futur dispositif de suivi de la biomasse aérienne au service d'un mécanisme local de paiement pour services environnementaux.

Bibliographie

1. Almeida, D.R.A., Broadbent, E.N., Zambrano, A.M.A., Wilkinson, B.E., Ferreira, M.E., Chazdon, R., Meli, P., Gorgens, E.B., Silva, C.A., Stark, S.C., Valbuena, R., Papa, D.A., & Brancalion, P.H.S. (2019). Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 192–198. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.014>
2. Convery-Fisher, E.D., Devenish, A.J.M., Staddon, S., Kull, C.A., et al. (2026). Stability in tapia woodlands amid non-native expansion: integrating traditional ecological knowledge and remote sensing to track 73 years of tree cover in Madagascar. *People and Nature*. <https://doi.org/10.1002/pan3.70298>
3. FAO (2020). Global Forest Resources Assessment 2020 – Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca9825en>
4. Ganivet, E., & Bloomberg, M. (2019). Towards rapid assessments of tree species diversity and structure in fragmented tropical forests: a review of perspectives offered by remotely-sensed and field-based data. *Forest Ecology and Management*, 432, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.003>
5. Giannetti, F., Chirici, G., Gobakken, T., Næsset, E., Travaglini, D., & Puliti, S. (2018). A new approach with DTM-independent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data. *Remote Sensing of Environment*, 213, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.016>
6. González-Jaramillo, V., Fries, A., & Bendix, J. (2019). AGB estimation in a tropical mountain forest (TMF) by means of RGB and multispectral images using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 11(12), 1413. <https://doi.org/10.3390/rs11121413>
7. Kotivuori, E., Kukkonen, M., Mehtätalo, L., Maltamo, M., Korhonen, L., & Packalen, P. (2020). Forest inventories for small areas using drone imagery without in-situ field measurements. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111404. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111404>
8. Moreira, B.M., Goyanes, G., Pina, P., Vassilev, O., & Heleno, S. (2021). Assessment of the influence of survey design and processing choices on the accuracy of tree diameter at breast height (DBH) measurements using UAV-based photogrammetry. *Drones*, 5(2), 43. <https://doi.org/10.3390/drones5020043>
9. Röder, M., Latifi, H., Hill, S., Wild, J., Svoboda, M., Brûna, J., Macek, M., Nováková, M.H., Gülch, E., & Heurich, M. (2018). Application of optical UAV-based imagery for the inventory of natural regeneration and standing deadwood in post-disturbed spruce forests. *International*

Journal of Remote Sensing, 39(15–16), 5288–5309.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1441568>