

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

Jean-Baptiste NDAMIYEHE NCUTIRAKIZA^{1,2}
Philippe LEJEUNE³
Sylvie GOURLET-FLEURY^{4,5}
Adeline FAYOLLE³
Léopold NDJELE MIANDA-BUNGI⁶
Gauthier LIGOT³

¹ Université de Kisangani
Faculté de gestion des ressources
naturelles renouvelables
Département d'agronomie générale,
option des eaux et forêts
BP 2012, Kisangani
République démocratique du Congo

² Université de Goma
Faculté des sciences agronomiques
BP 204, Goma
République démocratique du Congo

³ Université de Liège,
Gembloux Agro-Bio Tech
Forest is Life
Passage des Déportés, 2
5030 Gembloux
Belgique

⁴ Cirad
Forêts et Sociétés
34398 Montpellier
France

⁵ Forêts et Sociétés
Univ Montpellier, Cirad
Montpellier
France

⁶ Université de Kisangani
Faculté des sciences
Département d'écologie et gestion
des ressources végétales
BP 2012, Kisangani
République démocratique du Congo

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Jean-Baptiste NDAMIYEHE NCUTIRAKIZA –
ncutijean@gmail.com

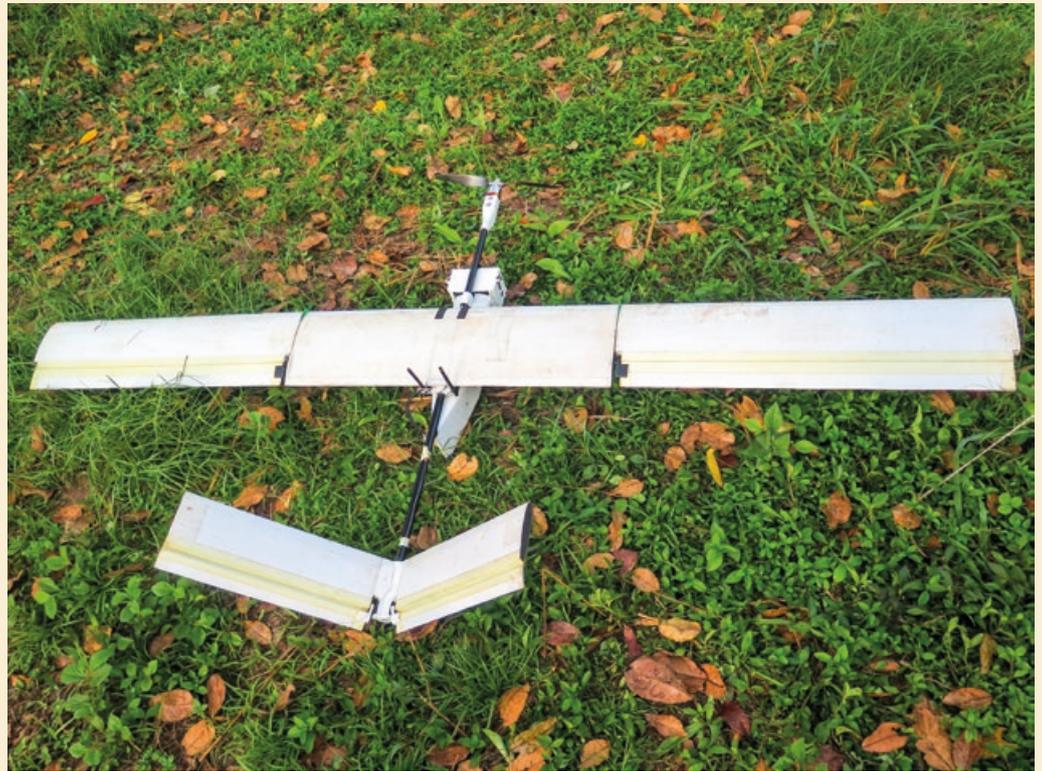


Photo 1.

Photographie du drone utilisé (2,5 m d'envergure et poids de 6 kg) pour l'acquisition des ortho-images 3D à très haute résolution sur la parcelle de 9 ha du dispositif expérimental de Yoko, République démocratique du Congo.
Photo J.-B. Ndamiehe Ncutirakiza.

Doi : 10.19182/bft2020.343.a31848 – Droit d'auteur © 2020, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad –

Date de soumission : 16 juillet 2019 ; date d'acceptation : 10 janvier 2020 ; date de publication : 31 janvier 2020.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Ndamiehe Ncutirakiza J.-B., Lejeune P., Gourlet-Fleury S., Fayolle A., Ndjele Mianda-Bungi 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. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2020.343.a31848>

RÉSUMÉ

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

Caractériser la dynamique d'une forêt est essentiel pour la gestion forestière. Les houppiers des arbres forment un élément clé de cette dynamique ; mais, en forêt tropicale, les mesurer n'est pas simple. Cette étude teste l'utilisation d'images aériennes à haute résolution pour estimer la croissance diamétrique des arbres, en intégrant des mesures fines des houppiers détectés. Des ortho-images de 10 cm/pixel de résolution ont été obtenues à l'aide d'un drone à aile fixe sur une parcelle de 9 ha, installée dans la forêt de Yoko en République démocratique du Congo. Les inventaires menés sur les arbres de DHP ≥ 10 cm en 2008 et en 2016 ont permis d'avoir accès à différentes caractéristiques dendrométriques individuelles, dont le diamètre des arbres et leur tempérament, et de calculer des accroissements diamétriques. Des modèles linéaires mixtes ont été calibrés pour prédire l'accroissement de 163 arbres identifiés à la fois sur le terrain et sur les ortho-images en utilisant les variables quantifiées uniquement sur le terrain et/ou à partir de variables mesurées sur les ortho-images. Les images aériennes ont permis de détecter 23,4 % des arbres de DHP ≥ 10 cm inventoriés au sol, et représentant 75,1 % de la biomasse aérienne du peuplement. La probabilité de détection des arbres a varié en fonction de leur DHP : de 0,09 pour les arbres de DHP < 30 cm à 0,97 pour les arbres de DHP ≥ 60 cm. Les variables quantifiées par télédétection ajoutées aux variables de terrain ont permis d'améliorer significativement la prédiction de l'accroissement diamétrique. Les meilleurs modèles d'estimation des accroissements diamétriques contiennent notamment un terme caractérisant la dimension du houppier des arbres qui n'a pu être mesuré que par télédétection. Parmi les variables déterminées par télédétection, la superficie convexe du houppier est apparue la plus performante dans les modèles, et s'avère ainsi être la mesure la plus intéressante pour décrire la compétition entre les houppiers. Ces résultats ouvrent des perspectives pour construire de nouveaux outils d'acquisition de données au service de l'aménagement forestier.

Mots-clés : structure de la canopée, modèle de croissance, biomasse, drone, photogrammétrie, télédétection, réserve forestière de Yoko, République démocratique du Congo.

ABSTRACT

Quantifying crown dimensions using high-resolution aerial imagery to estimate the diametric growth of trees in central African forests

Characterising forest dynamics of a forest is essential to its management. Tree crowns are a key factor in these dynamics, but measuring them in tropical forests is not an easy matter. This study tested the use of high-resolution aerial imagery to estimate the tree diameter growth by incorporating detailed measurements of the detected tree crowns. Ortho-images at a resolution of 10 cm/pixel were captured by a fixed-wing drone over a 9 ha plot in the Yoko forest in the Democratic Republic of Congo. Inventories conducted on trees ≥ 10 cm diameter at breast height (DBH) in 2008 and 2016 provided access to a variety of tree dendrometric characteristics, including DBH and species temperament, and allowed the calculation of diameter increments. Mixed linear models were calibrated to predict diameter increment of 163 trees identified both on the ground and on the ortho-images, using variables quantified on the ground only and/or from variables measured from the ortho-images. From the aerial images, we were able to detect 23.4% of the trees with DBH ≥ 10 cm listed in the ground inventories, representing 75.1% of the stand's aerial biomass. The probability of detecting the trees varied with their DBH, from 0.09 for trees with DBH < 30 cm to 0.97 for trees with DBH ≥ 60 cm. Predictions of diametric growth improved significantly when the variables quantified by remote sensing were added to the ground variables. The best models for estimating diameter increment include, in particular, a term characterising the size of tree crowns, which can only be measured by remote sensing. Of the variables determined by remote sensing, convex crown area was the most successful in the models and therefore appears to be the most accurate variable to describe competition between tree crowns. These results open up possibilities to build new tools of data acquisition to support forest planning.

Keywords: canopy structure, growth model, biomass, drone, photogrammetry, remote sensing, Yoko Forest Reserve, Democratic Republic of Congo.

RESUMEN

Cuantificación de las dimensiones de las copas utilizando imágenes aéreas de alta resolución para estimar el crecimiento diametral de los árboles en los bosques de África Central

Caracterizar la dinámica de un bosque es esencial para la gestión forestal. Las copas de los árboles forman un elemento clave de esta dinámica, pero en los bosques tropicales no es fácil medirlas. Este estudio es un ensayo de la utilización de imágenes aéreas de alta resolución para estimar el crecimiento diametral de los árboles, integrando medidas finas de las copas detectadas. Se obtuvieron imágenes de 10 cm/pixel de resolución con ayuda de un dron de ala fija sobre una parcela de 9 ha, instalada en el bosque de Yoko, en la República Democrática del Congo. Los inventarios llevados a cabo en los árboles de DHP ≥ 10 cm (diámetro a la altura del pecho) en 2008 y en 2016 permitieron tener acceso a diferentes características dendrométricas individuales, entre las cuales el diámetro de los árboles y su temperamento, y calcular los crecimientos diametrales. Se elaboraron modelos lineales mixtos para predecir el crecimiento de 163 árboles identificados a la vez sobre el terreno y en las ortoimágenes, utilizando las variables cuantificadas únicamente sobre el terreno y/o a partir de variables medidas en las ortoimágenes. Las imágenes aéreas permitieron detectar el 23,4 % de los árboles de DHP ≥ 10 cm inventariados en el suelo, que representan el 75,1 % de la biomasa aérea de la copa. La probabilidad de detección de los árboles varió en función de su DHP: de 0,09 para los árboles de DHP < 30 cm a 0,97 para los árboles de DHP ≥ 60 cm. Las variables cuantificadas por teledetección añadidas a las variables de terreno permitieron mejorar significativamente la predicción del crecimiento diametral. Los mejores modelos de estimación de crecimientos diametrales contienen especialmente un término que caracteriza la dimensión de la copa de los árboles que solo se han podido medir mediante teledetección. Entre las variables determinadas por teledetección, la superficie convexe de la copa resulta ser la más eficaz en los modelos, y por ello se considera la medida más interesante para describir la competición entre las copas. Estos resultados abren perspectivas para construir nuevas herramientas de adquisición de datos al servicio de la ordenación forestal.

Palabras clave: estructura del dosel forestal, modelo de crecimiento, biomasa, dron, fotogrametría, teledetección, reserva forestal de Yoko, República Democrática del Congo.

Introduction

Bien comprendre les facteurs qui influencent la croissance diamétrique des arbres et leurs interactions est crucial en écologie forestière, avec des implications en termes d'enjeux économiques et politiques (Baker *et al.*, 2003). C'est notamment un prérequis indispensable pour définir des règles de gestion durable des forêts destinées à la production de bois d'œuvre (Durrieu de Madron *et al.*, 2000) ainsi que pour prédire l'évolution des stocks de biomasse (Rutishauser *et al.*, 2010).

La croissance diamétrique d'un arbre est dépendante de ses caractéristiques intrinsèques : son patrimoine génétique et son stade de développement exprimé en termes d'âge ou de dimension (Prévosto, 2005). Elle est également tributaire des ressources disponibles (lumière, eau et nutriments) et de la concurrence subie pour l'accès à celles-ci (Gourlet-Fleury, 1998). L'accès à la lumière est reconnu comme un des principaux facteurs limitant la croissance des arbres tropicaux (Baker *et al.*, 2003). Cet accès à la lumière ainsi que l'intensité de lumière interceptée par un arbre dépendent des dimensions de son houppier et de sa position dans la structure verticale de la forêt. Ainsi, les caractéristiques du houppier sont considérées comme des déterminants majeurs de la production primaire nette (Sprinz et Burkhart, 1987), et sont donc importantes pour prédire aussi bien la biomasse des arbres (Blanchard *et al.*, 2016 ; Goodman *et al.*, 2014 ; Jucker *et al.*, 2017 ; Ploton *et al.*, 2016) que leur croissance diamétrique (Foli *et al.*, 2003).

En forêt tropicale, les données caractérisant les houppiers sont cependant rarement disponibles (Asner *et al.*, 2002), principalement en raison des difficultés de mesure sur le terrain (Blanchard *et al.*, 2016 ; Gourlet-Fleury, 1998). Elles ont donc été peu utilisées pour modéliser la croissance (Franc *et al.*, 2000). Lorsqu'elles l'ont été, les variables concernées étaient le plus souvent de nature qualitative (Baker *et al.*, 2003). La plus utilisée est sans doute l'indice d'exposition des houppiers à la lumière (« *crown exposure index* » en anglais, ou code de Dawkins), qui décrit cette exposition à l'aide de cinq classes (Dawkins, 1958) et s'est révélé être un bon prédicteur de la croissance (Moravie *et al.*, 1999). Plus récemment, Rutishauser *et al.* (2011) ont proposé une variable qualitative pour caractériser la fragmentation du houppier. Celle-ci traduit la proportion de branches mortes présentes. Elle s'est également révélée être un bon prédicteur de la croissance des arbres de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) supérieur à 40 cm en forêt amazonienne (Rutishauser *et al.*, 2011).

L'évolution récente des techniques de télédétection ouvre de nouvelles possibilités pour la caractérisation géométrique des houppiers ou de la canopée des forêts tropicales. Ces possibilités permettraient de remplacer les mesures de terrain fastidieuses et souvent peu précises.

Des techniques visuelles et automatiques de segmentation des houppiers ont été testées à partir des données LiDAR (*Light and Detection Ranging*) ou d'images satellitaires (IKONOS, 1-4 m/pixel) et ont montré des résultats prometteurs (Asner *et al.*, 2002 ; Palace *et al.*, 2008). L'efficacité de la segmentation automatique reste toutefois limitée à cause de la complexité de la structure des canopées en forêt dense tropicale (Aubry-Kientz *et al.*, 2019 ; Broadbent *et al.*, 2008). La précision de la détection visuelle des houppiers est quant à elle dépendante du niveau de résolution des images utilisées. Ainsi, pour délimiter avec précision les houppiers, surtout pour les arbres de petite taille, l'utilisation de résolutions spatiales plus élevées que celles généralement obtenues à partir d'images satellitaires est souvent recommandée (Clark *et al.*, 2004a ; Read *et al.*, 2003). 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 de « *Structure from motion* » (PhotoScan, 2015) 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).

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.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser la possibilité d'utiliser des images aériennes à haute résolution acquises par drone pour estimer la croissance des arbres en forêt tropicale. Plus spécifiquement, nous proposons, d'une part, d'estimer et de comparer l'efficacité de variables dendrométriques issues du terrain et d'images acquises à l'aide d'un drone dans des modèles de prédiction de l'accroissement diamétrique, et, d'autre part, de quantifier la détectabilité des arbres sur des images en fonction de leur diamètre à hauteur de poitrine. En outre, nous évaluons la proportion de la biomasse aérienne d'arbres détectés sur les images par rapport à la biomasse aérienne totale du peuplement. L'étude est basée sur une parcelle expérimentale installée dans une forêt tropicale semi-caducifoliée en République démocratique du Congo sur laquelle une espèce, *Scorodophloeus zenkeri* Harms, est particulièrement fréquente.

Matériel et méthodes

Site d'étude

L'étude a été réalisée dans la réserve forestière de Yoko (RFY), localisée à 32 km au sud-est (0°17'N, 25°18'E) de la ville de Kisangani en République démocratique du Congo (RDC) (figure 1a, b). La RFY couvre 70 km², situés dans une zone dont l'altitude moyenne est de 450 m. Le climat de la zone est de type Af selon la classification de Köppen-Geiger, marqué par une température moyenne de 25 °C, des précipitations annuelles moyennes de 1 750 mm et par l'absence de mois sec. Les sols sont acides (pH < 6) et typiques des oxisols. La végétation de la RFY est pluristratifiée avec une canopée composée d'arbres atteignant plus de 40 m. Elle comprend des formations phytosociologiques variées. La partie nord est dominée par des forêts mésophiles sempervirentes à *Brachystegia laurentii* (De Wild.) Louis ex Hoyle appartenant à l'alliance *Gilbertiodendro-Scorodophleion* et à l'ordre des *Gilbertiodendretalia dewevrei*. La partie sud est, quant à elle, couverte par des forêts mixtes de type semi-caducifolié à *S. zenkeri*, appartenant à l'alliance *Oxystigmo-Scorodophleion* et à l'ordre des *Piptadeniastro-Celtidetalia* (Lebrun et Gilbert, 1954).

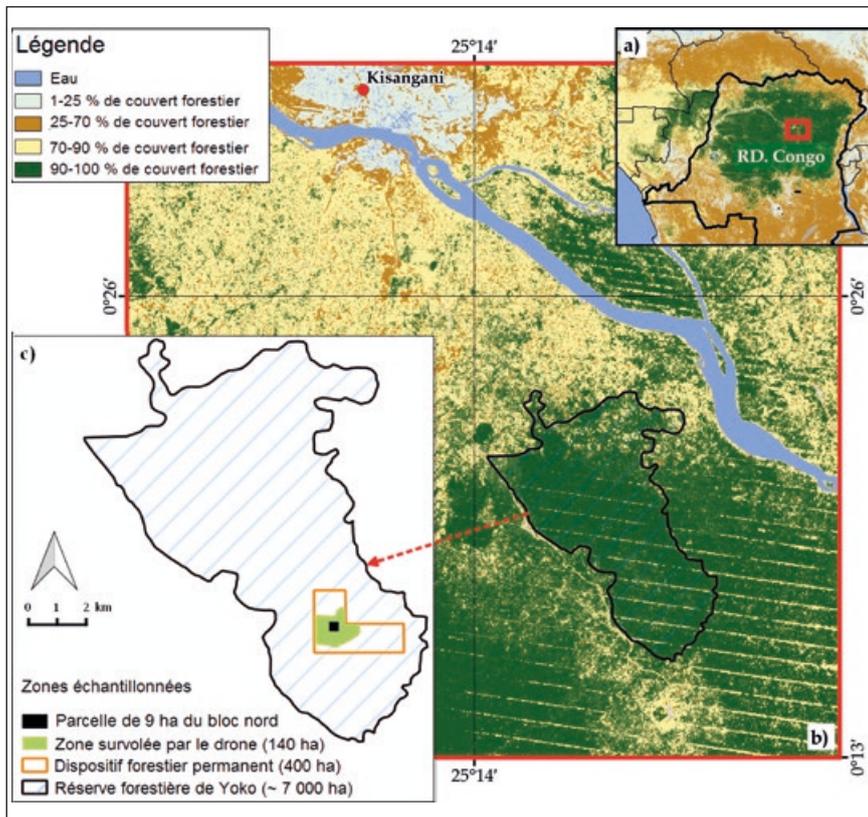


Figure 1. Localisation de la réserve forestière de Yoko : a) République démocratique du Congo ; b) sur un fond de carte représentant le couvert forestier (Hansen *et al.*, 2013) ; c) la zone d'échantillonnage au sein du dispositif forestier de Yoko est présentée.

Inventaires de terrain

Les données ont été acquises dans une parcelle de 9 ha subdivisée en carrés de 1 ha (figure 1 c). Cette parcelle est située au sein d'un dispositif expérimental permanent (400 ha) installé dans la partie sud de la RFY et servant pour le suivi de la dynamique forestière¹ (Picard et Gourlet-Fleury, 2008). Les inventaires forestiers menés sur la parcelle depuis 2008 fournissent des mesures répétées de circonférence des arbres de dhp ≥ 10 cm permettant le calcul de leur accroissement diamétrique (Acd). Ils fournissent également pour chaque arbre son identité botanique. En 2014, la parcelle de 9 ha était constituée de 4 258 arbres appartenant à 199 taxons. Au sein de chacun des neuf carrés de la parcelle, des mesures de hauteur ont été prises avec un *LaserAce™ 1000 Rangefinder*² sur un échantillon constitué d'au moins 40 arbres de DHP ≤ 50 cm et de 10 autres arbres de DHP > 50 cm. En particulier, tous les arbres non inclinés de DHP ≥ 70 cm ont été inclus dans l'échantillon. Dans l'ensemble, la hauteur totale a été mesurée sur 607 arbres de la parcelle. De même, les houppiers de 358 arbres dominants ou codominants ont été identifiés sur des images aériennes (voir ci-après). Celles-ci ont été chargées sur une tablette Microsoft Surface³ pour permettre leur visualisation sur le terrain. L'échantillon d'arbres identifiés sur les images aériennes comprend 163 arbres (38 espèces) pour lesquels des mesures d'accroissement sont disponibles ; 42 d'entre eux appartiennent à l'espèce *S. zenkeri*.

Variables déterminées à partir d'inventaires de terrain

Différentes caractéristiques dendrométriques individuelles, ci-dessous désignées « variables de terrain », ont été évaluées à partir des données d'inventaire. Ces variables ont été évaluées pour l'échantillon de 163 arbres décrit précédemment.

Indice d'exposition du houppier

Le code de Dawkins décrivant la position du houppier dans la canopée et son exposition à la lumière (Dawkins, 1958) a été évalué visuellement en utilisant les cinq classes ci-après. Daw1 correspond au houppier d'un arbre de sous-bois, entièrement ombragé, Daw2 correspond au houppier d'un arbre de sous-bois, peu éclairé latéralement, Daw3 correspond au houppier d'un arbre de canopée, modérément exposé à la lumière, Daw4 correspond au houppier d'un arbre de canopée, entièrement éclairé dans le plan vertical, Daw5 correspond au houppier d'un arbre fortement éclairé latéralement et verticalement.

1 www.dynaffor.org

2 www.trimble.com

3 www.microsoftsurface.com

Fragmentation du houppier (FH)

Le degré de fragmentation du houppier a été évalué visuellement en forêt en estimant la proportion des branches primaires et secondaires mortes, par comparaison à un houppier intègre. La fragmentation a été évaluée d'abord sur les branches primaires (BP), celles directement rattachées au tronc de l'arbre, puis sur les branches secondaires (BS) constituant les ramifications des BP. En référence au protocole de Rutishauser *et al.* (2011), les houppiers ont été regroupés en quatre classes selon que les branches mortes représentaient 0-5 %, 5-25 %, 25-50 % ou plus de 50 % des branches totales. Les observations sur les BP et BS ont ensuite été synthétisées pour obtenir la variable « fragmentation du houppier (FH) » avec deux modalités : houppier fragmenté et houppier intègre. Les arbres dont la fragmentation des branches primaires et secondaires était importante (BP > 5 % et BS > 5 %) ont été considérés comme ayant un « houppier fragmenté », tous les autres arbres ayant un « houppier intègre ».

Tempérament des espèces (TE)

Les espèces ont été regroupées sur la base de leur tempérament, renseigné dans la base de données CoForTraits (Bénédet *et al.*, 2013 ; Doucet, comm. pers.). Afin d'obtenir suffisamment d'individus par classe (minimum 30 observations), deux groupes d'espèces ont été considérés dans l'étude de la croissance : les espèces tolérantes à l'ombrage et les espèces héliophiles. Cette dernière classe regroupe les espèces pionnières et héliophiles non pionnières.

Images aériennes

Les images aériennes ont été acquises le 5 juin 2014 et le 7 juin 2016 sur le dispositif de Yoko à l'aide d'un drone Falcon à aile fixe (photo 1) équipé d'une caméra RGB Sony Nex7 (résolution : 24,1 mégapixels, objectif : 16 mm). Le plan de vol a été préparé et exécuté avec le logiciel *Mission Planner* version 1.3.31. Les vols ont été réalisés à une hauteur de 350 m au-dessus du sol. Les images ont été acquises avec un recouvrement de 75 % aussi bien dans les bandes de vol (« *overlap* ») qu'entre les bandes de vol (« *sidelap* »). Les images obtenues ont été traitées dans l'environnement *Agisoft Photoscan* version 1.1.2 (PhotoScan, 2015) pour créer une ortho-image mosaïquée. Le processus comprend trois étapes principales : la calibration de la caméra permettant notamment d'atténuer les erreurs de positionnement du drone au moment de la prise d'images ; l'alignement des images à partir des points communs détectés sur les images voisines ; la reconstruction du modèle 3D (Lisein *et al.*, 2013). Ce traitement a permis de générer un modèle numérique de surface (MNS) et une ortho-image pour chaque vol (2014 et 2016), avec des résolutions respectives de 7 cm/pixel et de 30 cm/pixel sur la zone couverte par le vol qui comprend notamment la parcelle d'étude. Les MNS et les ortho-images obtenus ont ensuite été géoréférencés en UTM zone 35N basé sur l'ellipsoïde WGS84 (code EPSG : 32635) en utilisant comme référence une image IKONOS-2 (1 m/pixel) acquise le 1^{er} mai 2009.

Détection des arbres sur les ortho-images

Co-registation des données de terrain avec les ortho-images

Afin d'apparier les données de terrain avec les ortho-images, une méthode de co-registation des positions des arbres au sol et des positions de centroïdes de leurs houppiers sur les ortho-images a été développée. Cette méthode est décrite dans l'annexe A.

Déteçtabilité des arbres

Après la co-registation des données de terrain avec les ortho-images, les arbres de la parcelle étudiée ont été répartis en trois classes traduisant leur niveau de détection sur l'ortho-image : (c_1) *surcîmé* pour les arbres complètement cachés par leurs voisins de plus grande taille ; (c_2) *discernable* pour les arbres détectés sur l'ortho-image mais dont la délimitation précise du houppier nécessite sa visualisation sur les ortho-images des deux dates ; et (c_3) *délimitable* pour les arbres dont le houppier est distinguable de ses voisins sans ambiguïté. Les arbres considérés comme détectables correspondent aux deux dernières classes (c_2 et c_3). La répartition des arbres dans les classes de déteçtabilité a été évaluée à la fois en termes d'effectif et de biomasse aérienne, en considérant des classes de diamètre de 10 cm d'amplitude. La biomasse (en Mg) a été calculée à partir de l'équation allométrique pantropicale la plus récente (Chave *et al.*, 2014) qui prend en compte la hauteur des arbres. Les hauteurs ont été estimées à l'aide de modèles allométriques hauteur-diamètre établis à partir de l'échantillon des mesures prises dans la parcelle d'étude (annexe B).

Variables calculées à partir des ortho-images

Les variables de télédétection ont été déterminées à l'échelle de l'arbre. Elles sont liées aux dimensions du houppier et à la forme de celui-ci ainsi qu'à sa position relative dans la canopée.

Dimensions du houppier

La délimitation des houppiers a été réalisée manuellement dans QGIS version 2.18 (QGIS Development Team, 2017). Afin de réduire les risques de confusion, les houppiers ont été observés sur les ortho-images acquises en 2014 et 2016. La surface (SHp), correspondant à la projection orthogonale du houppier, et le périmètre du houppier (PeriH) sont les variables de base qui ont été calculées. Le diamètre et le rayon du houppier ont ensuite été déduits de SHp en considérant une forme circulaire.

Enveloppe supérieure du houppier

La surface convexe (SHc) correspondant à l'enveloppe supérieure du houppier a été calculée en multipliant la surface des pixels constituant les houppiers par le cosinus de leur pente (Dorner *et al.*, 2002) :

$$SHc = \sum_{i=1}^n s_i / \min(\cos(\text{pente}_i), 0.5) \text{ (équation 1)}$$

où n est le nombre de pixels présents dans le houppier, s_i la surface du pixel i, pente_i la pente du pixel i. La pente est dérivée du MNS et plafonnée à 60° (soit un cosinus de 0,5).

Forme du houppier

Le coefficient de circularité (CircuH) et le rapport périmètre/surface (PS) du houppier ont été calculés à partir des équations 2 et 3 :

$$\text{CircuH} = 4n * \text{SHp} / \text{PeriH}^2 \text{ (équation 2)}$$

$$\text{PS} = \text{PeriH} / \text{SHp} \text{ (équation 3)}$$

où SHp correspond à la projection orthogonale du houppier, et PeriH au périmètre du houppier, variables de base calculées. CircuH varie de zéro à un. Les valeurs proches de zéro désignent une couronne étirée alors que la valeur de un correspond à un cercle parfait (Getzin *et al.*, 2012).

Différence d'altitude entre l'arbre sujet et son voisinage (ΔAltm)

Cette variable représente une mesure indirecte de la compétition que subit un arbre pour l'accès à la lumière. Elle est susceptible de traduire le caractère dominant ou dominé d'un arbre sujet vis-à-vis de ses voisins.

Le principe du calcul de ΔAltm est illustré dans la figure 2. À partir du MNS, l'altitude moyenne a été calculée séparément pour (a) la surface de projection orthogonale correspondant au houppier du sujet et (b) la surface correspondant à la zone tampon qui entoure le houppier du sujet. ΔAltm correspond alors à la différence entre l'altitude moyenne de (a) et celle de (b). Plusieurs largeurs ont été testées pour la zone tampon : 3 m, 5 m et 10 m.

Variables hybrides

Des variables hybrides, combinant des mesures issues des données de terrain et des ortho-images, ont été calculées pour chaque arbre. Ces variables correspondent au rapport entre la surface du houppier résultant des mesures photogrammétriques et la surface terrière déterminée à partir du diamètre du tronc relevé sur le terrain (Wyckoff et Clark, 2005). Plusieurs expressions de la surface du houppier ont été testées, la surface orthogonale (SHp) ou la surface convexe (SHc) permettant ainsi de générer deux variables hybrides notées respectivement : RHpT, RHcT. Ces

variables permettaient de tester si des effets multiplicatifs, et pas seulement additifs, des deux types de variables pouvaient expliquer la croissance des arbres échantillonnés.

Modélisation de la croissance

Afin d'évaluer l'apport des variables de télédétection pour la prédiction de l'accroissement diamétrique, cinq modèles ont été calibrés. Il s'agit de modèles linéaires mixtes ajustés sur l'ensemble des données (N = 163) avec un effet aléatoire « espèce » (38 espèces) ou des modèles linéaires sans effet aléatoire ajustés uniquement sur les 42 arbres de *S. zenkeri*. Bien que la croissance des arbres présente généralement un mode, ou optimum pour un certain diamètre (Hérault *et al.*, 2011), les modèles linéaires se sont révélés appropriés sur ces données ne comportant pas ou peu de petits arbres :

$$\text{Acd}_{is} = b_1 + b_2 \text{DHP}_{is} + b_3 \text{Dawkins}_{is} + b_4 \text{FH}_{is} + b_5 \text{TE}_{is} + b_6 \text{SHp}_{is} + b_7 \text{SHc}_{is} + b_8 \Delta\text{Altm}_{is} + b_9 \text{CircuH}_{is} + b_{10} \text{RHpT}_{is} + b_{11} \text{RHcT}_{is} + \alpha_s + \epsilon_{is} \text{ (équation 4)}$$

avec $b_{1, \dots, 11}$ les paramètres fixes à estimer, α_s l'effet aléatoire « espèce » et ϵ_{is} l'erreur résiduelle. α_s et ϵ_{is} suivent des distributions normales de moyenne nulle et de variance ajustée.

Un modèle (M1) indiqué par l'équation 4 a été ajusté en utilisant l'ensemble des variables de terrain, de télédétection et les variables hybrides. D'autres modèles ont été ajustés en considérant le mélange des variables de terrain et de télédétection (M2) ou uniquement les variables de terrain (M3), les variables de télédétection (M4) ou les variables hybrides (M5). Étant donné la forte corrélation entre les variables $\Delta\text{Altm}3$, $\Delta\text{Altm}5$ et $\Delta\text{Altm}10$, celles-ci ont été introduites alternativement dans les modèles. Il en est de même pour les deux variantes de la surface du houppier (SHp et SHc) et des variables hybrides (RHcT et RHpT). Les modèles retenus sont ceux qui ont permis d'obtenir le meilleur compromis en termes de critère d'information d'Akaike (AIC), d'erreur quadratique moyenne (RMSE) et de nombre de paramètres. Lorsque les différences d'AIC ou de RMSE étaient faibles,

nous avons retenu les modèles contenant le moins de paramètres (principe de parcimonie) en ne sélectionnant pas les modèles pour lesquels au moins un paramètre n'était pas significativement différent de zéro. De plus, un test du rapport de vraisemblance (« *likelihood ratio test* ») a été réalisé pour comparer (au seuil $\alpha = 0,05$) la performance des différents modèles. Les tests statistiques ont été réalisés à l'aide de lme4 version 1.1.18.1 (Bates *et al.*, 2015), lmerTest version 3.0.1 (Kuznetsova *et al.*, 2017) et BIOMASS version 2.0 (Réjou-Méchain *et al.*, 2017). La co-registation des données de terrain avec les ortho-images a été réalisée à l'aide de vec2dtransf version 1.1 (Carrillo, 2015) et lawn version 0.5.0 (Chamberlain *et al.*, 2019). Tous les tests statistiques ont été effectués dans l'environnement R version 3.5.1 (R Core Team, 2018).

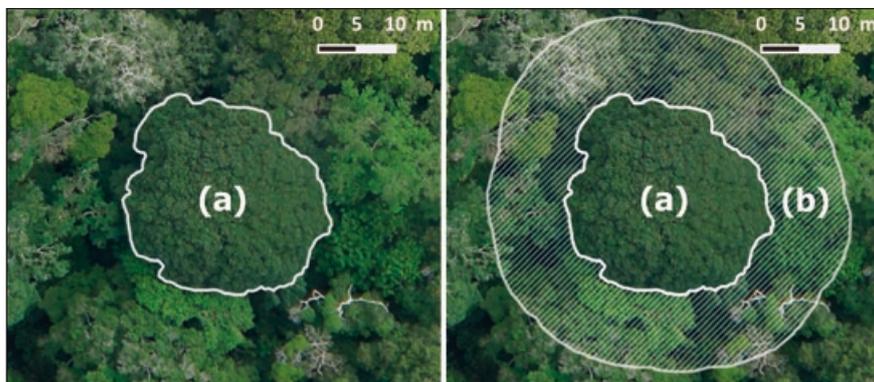


Figure 2. Houppier d'un arbre de l'espèce *Brachystegia laurentii* et largeur du tampon permettant le calcul de ΔAltm . La surface (a) correspond au houppier de l'arbre sujet. La surface (b) constitue la surface occupée par les arbres situés dans le voisinage de l'arbre sujet.

Résultats

DéTECTABILITÉ DES ARBRES SUR LES ORTHO-IMAGES

L'effectif des arbres de DHP ≥ 10 cm inventoriés dans les 9 carrés de la parcelle étudiée varie de 391 à 463 tiges/ha. Ces arbres se répartissent dans les classes de diamètre suivant une distribution en « J » inversé typique des peuplements naturels (figure 3a). Les arbres qui sont détectables sur les ortho-images correspondent respectivement à 23,4 % de l'effectif total mais à 75,1 % de la biomasse totale, qui varie de 359 t/ha à 460 t/ha. La détectabilité

varie fortement en fonction du diamètre des arbres. Ainsi, la probabilité de détecter un arbre est de 0,09 pour les DHP < 30 cm, de 0,61 pour les DHP compris entre 30-60 cm et de 0,97 pour les DHP ≥ 60 cm (figure 3a, b).

Modélisation de la croissance

Les 163 arbres constituant l'échantillon présentent des caractéristiques morphologiques très variables (tableau I). Ces arbres ont un accroissement diamétrique moyen de $0,549 \pm 0,5$ cm/an (moyenne \pm erreur standard). Cet accroissement est toutefois variable en fonction des espèces et de leur tempérament. L'accroissement des héliophiles ($0,699 \pm 0,626$ cm/an ; N = 74) est significativement plus élevé (test de Welch, $t = -3,353$; $P < 0,002$) que celui des arbres tolérants à l'ombrage ($0,427 \pm 0,327$ cm/an ; N = 89). L'accroissement moyen de *S. zenkeri* est de $0,422 \pm 0,348$ cm/an (N = 42). Les accroissements sont corrélés négativement au diamètre initial du tronc (figure 4a, d). Ces relations linéaires négatives sont significatives ($P < 0,001$) pour toutes les espèces et pour *S. zenkeri*. Les relations entre l'accroissement et le rapport de la surface de houppier-surface terrière (RHpT ou RHcT) sont linéaires positives et significatives ($P < 0,001$) pour toutes les espèces (figure 4b, c) et pour *S. zenkeri* (figure 4e, f).

Les modèles combinant les deux types de variables (terrain et télédétection) se sont avérés meilleurs que les modèles utilisant uniquement les variables de terrain, à la fois pour prédire les accroissements toutes espèces confondues ($\chi^2 = 25,45$; $P < 0,001$)

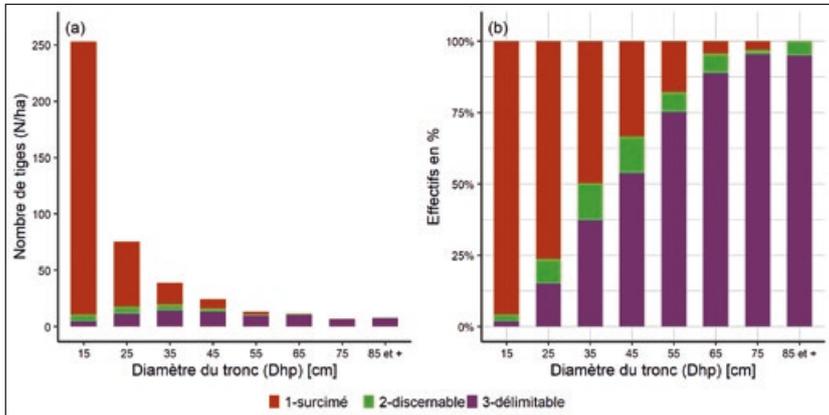


Figure 3. Variation des effectifs d'arbres suivant trois niveaux de détection dans les classes de diamètre : arbre dont le houppier est surcimé ; arbre repérable depuis la canopée ; arbre dont le houppier est délimitable. (a) Les effectifs sont présentés en nombre de tiges par hectare, et (b) la proportion des tiges détectées est exprimée en pourcentage par classe de diamètre de 10 cm.

Tableau I.

Statistiques des variables dendrométriques déterminées par photogrammètrie à l'échelle de l'arbre (N = 163) dans la forêt de Yoko. Moy. et Err. Std. représentent respectivement la moyenne et l'écart-type standard associés à chaque variable de télédétection, Min. et Max. représentant respectivement le minimum et le maximum.

Variable	Notation	Min.	Max.	Moy.	Err. Std.	
Circularité du houppier	CircuH	0,325	0,878	0,570	0,124	
Diamètre du houppier (m)	DiamH	3,641	25,912	11,310	3,951	
Différence entre l'altitude moyenne de l'arbre et l'altitude moyenne de son voisinage sur une largeur de 3 m, 5 m et 10 m	Δ Alt3	-3,149	13,106	3,793	3,143	
	Δ Alt5	-4,470	13,327	3,802	3,410	
	Δ Alt10	-5,403	13,443	3,465	3,631	
Rapport périmètre/surface (m/m ²)	PS	0,175	1,417	0,537	0,194	
Surface de la projection orthogonale du houppier (m ²)	SHp	12,585	527,35	112,796	76,516	
Surface convexe du houppier (m ²)	SHc	15,848	710,339	144,699	99,965	
Rapport entre la surface du houppier et la surface terrière (m ² /m ²)	Sur base de SHp	RHpT	99,545	2897,277	482,775	384,119
	Sur base de SHc	RHcT	137,503	3036,838	610,472	444,833

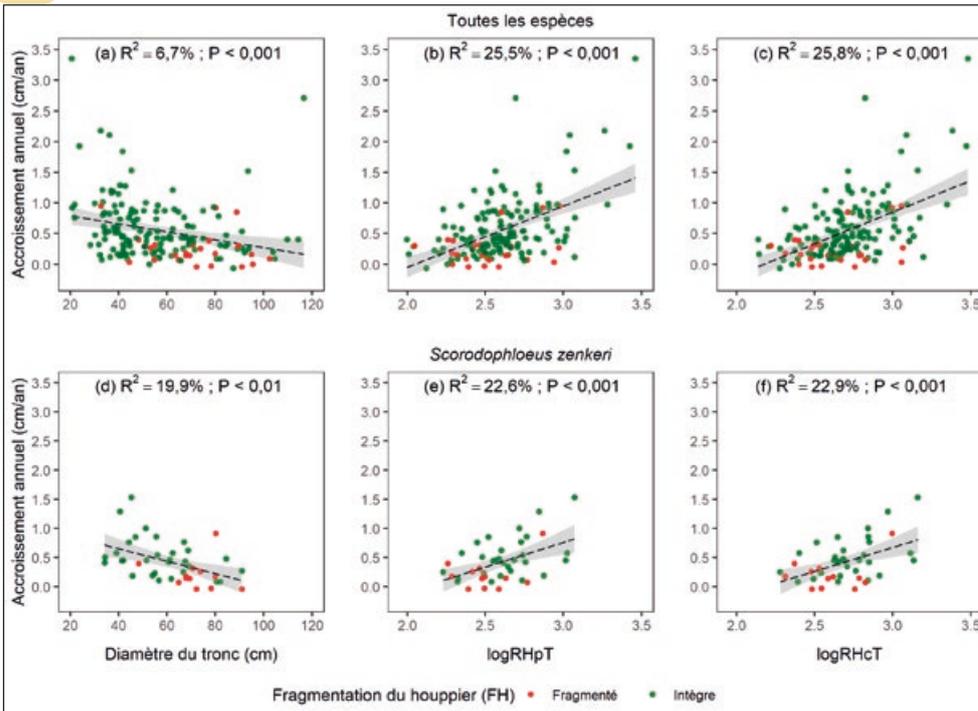


Figure 4.

Accroissement diamétrique moyen annuel : en (a), (b) et (c) des arbres toutes espèces confondues (N = 163) et en (d), (e) et (f) de l'espèce *Scorodophloeus zenkeri* Harms (N = 42), étudié en fonction du diamètre initial du tronc mesuré au sol et de la variable hybride RHpT ou RHcT. Les régressions sont complétées d'un intervalle de confiance des prédictions calculé avec un seuil $(1 - \alpha)$ de 95 %.

et pour *S. zenkeri* ($F = 7,57$; $P < 0,01$). Les deux types de variables apportent donc de l'information complémentaire dans les modèles (tableau II).

et permet de réduire sensiblement la variabilité du facteur aléatoire « espèce ». L'écart-type associé au facteur aléatoire d'un modèle est réduit de 28,2 % en ajoutant la variable

Dans les deux cas (prédiction toutes espèces confondues et prédiction pour *S. zenkeri*), le meilleur modèle contient une variable relative à la surface du houppier, présentée sous sa forme classique ou intégrée dans la variable hybride. La surface convexe du houppier (SHc) s'est avérée plus performante que la surface de la projection orthogonale du houppier (SHp) dans les modèles de prédiction des accroissements toutes espèces confondues.

La variable hybride (RHpT ou RHcT) correspondant au rapport entre la surface du houppier et la surface terrière permet d'expliquer, à elle seule, plus de 22 % de la variabilité des accroissements diamétriques. L'ajoutement des modèles M5 contenant uniquement les variables hybrides montre que la variable RHcT formée à partir de la surface convexe du houppier est plus efficace (tableau II) que RHpT formée à partir de la surface de projection orthogonale du houppier. L'ajout des variables DHP, SHp ne s'est pas avéré significatif dans un modèle qui contenait déjà la variable RHcT.

Par ailleurs, le tempérament est apparu comme une variable significative ($P < 0,05$) dans les modèles

Tableau II.

Paramètres estimés des meilleurs modèles mixtes de prédiction de l'accroissement diamétrique des arbres de la forêt de Yoko. La significativité des paramètres est indiquée au seuil statistique de 0,05 : « * » ; 0,01 : « ** » ; 0,001 : « *** ». Les variables non retenues dans les modèles définitifs sont soit absentes du tableau, soit marquées par le signe « - ». La modalité de référence pour la variable fragmentation du houppier (FH) est celle pour un « houppier intègre ». La modalité de référence pour la variable tempérament (TE) est celle pour un arbre « tolérant à l'ombrage ». σ_{sp} et σ_r sont les écarts-types standards associés respectivement au facteur aléatoire et à l'erreur résiduelle.

Modèles d'accroissement	Ordonnée à l'origine	Coefficients et significativité associés aux variables explicatives										AIC	RMSE (cm/an)	σ_{sp}	σ_r
		FH	Terrain logDhp	TE	CircuH	Télé-détection			Hybride						
						PS	SHp	SHc	logRHpT	logRHcT					
Toutes espèces (N = 163 ; 38 espèces)	M1	-2,4990***	-	-	0,3926**	0,7352**	0,5509*	-	0,0009*	0,8109***	-	159,883	0,2676	0,3657	0,2979
	M2	2,7910***	-0,1494*	-1,5030***	0,3633*	-	-	-	0,0021***	-	-	155,315	0,2662	0,3577	0,2953
	M3	1,4180***	-0,2026*	-0,5371*	0,4182*	-	-	-	-	-	-	166,271	0,2777	0,4570	0,3099
	M4	-0,1882	-	-	-	0,6618*	-	-	0,0008*	-	-	189,006	0,2880	0,4982	0,3218
	M5	-1,2230***	-	-	-	-	-	-	-	0,6987***	-	151,480	0,2717	0,4433	0,3018
<i>Scorodophloeus zenkeri</i> Harms (N = 42)	M1 = M2	3,3586***	-	-2,2917***	-	1,0483*	-	0,0026**	-	-	-	15,368	0,2579		
	M3	2,9512***	-	-1,4251**	-	-	-	-	-	-	-	25,455	0,3050		
	M4	-0,2815	-	-	-	1,2853*	-	-	-	-	-	31,054	0,3260		
	M5	-1,7821**	-	-	-	-	-	-	-	0,8186***	-	23,758	0,2983		
	M5	-1,7821**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23,758	0,2983		

tempérament (tableau II). En revanche, l'erreur résiduelle varie peu suite à l'ajout de cette variable. Elle est néanmoins plus faible dans les modèles contenant à la fois des variables de télédétection et des variables de terrain. Il ressort de même un effet négatif et significatif ($P < 0,05$) du taux de fragmentation des branches (FH) sur l'accroissement individuel dans le modèle utilisant les variables de terrain. Par contre, les variables caractérisant le statut social ou la position de l'arbre dans la structure verticale de la forêt, à savoir l'indice de Dawkins évalué sur le terrain ou ΔAlt_m mesuré par télédétection, n'ont pas montré d'effet sur l'accroissement diamétrique des arbres constituant l'échantillon.

Discussion

Cette étude montre que l'utilisation d'images aériennes à très haute résolution permet de caractériser avec une grande précision le houppier des arbres non surcimés en forêt tropicale. Dans le dispositif étudié, à Yoko en RDC, les houppiers détectés sur les images représentaient seulement 23 % des effectifs d'arbres mais 75 % de la biomasse totale. L'étude montre également que de nouveaux déterminants de la croissance des arbres en forêt tropicale sont mesurables sur ces images. Les variables déterminées par photogrammétrie, liées à la surface du houppier et à sa forme, se sont révélées être complémentaires aux variables mesurables sur le terrain : l'information qu'elles apportent permet de mieux évaluer, de manière indirecte, la quantité de lumière interceptée par les arbres non surcimés et de mieux prédire leur accroissement diamétrique.

Croissance diamétrique des arbres de la canopée

De nouveaux déterminants de la croissance des arbres sont mesurables par télédétection

Dans cette étude, nous avons testé si des variables dendrométriques mesurées à partir de photographies acquises par drone pouvaient améliorer l'estimation de l'accroissement d'arbres dominants en forêt tropicale. Les variables d'ortho-images les plus intéressantes pour prédire l'accroissement diamétrique sont celles décrivant la taille (surface) et la forme (coefficient de circularité, rapport périmètre-surface) des houppiers. Ces variables ont un potentiel prédictif complémentaire à celui des variables de terrain incluant le DHP. À titre d'exemple, la surface du houppier et le diamètre du tronc (DHP) sont deux variables apparues comme complémentaires, l'ajout de l'une d'entre elles permettant d'améliorer significativement le modèle contenant l'autre. En outre, les variables combinant à la fois des données de terrain et de télédétection se sont avérées très intéressantes. Bien que n'ayant pas semblé pertinentes pour prédire l'accroissement de différentes essences en forêt tempérée (Wyckoff et Clark, 2005), ces variables ont permis d'expliquer plus de 22 % de la variabilité des accroissements à Yoko, aussi bien pour l'ensemble des espèces étudiées que pour *S. zenkeri*.

La taille des houppiers paraît donc être une caractéristique importante pour prédire l'accroissement diamétrique, résultat relativement courant en forêt tempérée. Plusieurs

variables peuvent être utilisées pour quantifier cette taille. La surface convexe du houppier (SHc) est apparue être un meilleur prédicteur que la surface de la projection orthogonale du houppier (SHp). Cette variable est probablement un meilleur indicateur de la surface foliaire la plus exposée aux rayons du soleil, et donc du potentiel photosynthétique de l'arbre (Sprinz et Burkhart, 1987). Cole et Lorimer (1994) ont ainsi montré que le pourcentage de la surface du houppier non surcimé, c'est-à-dire exposé à la lumière, était un important prédicteur de la croissance des arbres au Wisconsin. Augusto Da Cunha *et al.* (2016) ont également trouvé que l'indice de profondeur du houppier, correspondant à la différence entre la hauteur totale de l'arbre et la hauteur depuis la base du tronc jusqu'à la première grosse branche, était un bon prédicteur de la croissance de quatre espèces coexistantes en Amazonie. Dans notre étude, il n'était pas possible de mesurer cet indice à partir des ortho-images, mais des relations allométriques utilisant un échantillon des mesures de cet indice sur le terrain permettraient son évaluation indirecte sur des images aériennes. Ce type de relations allométriques s'avère nécessaire.

Excepté l'indice de Dawkins, les variables mesurées sur le terrain sont de bons prédicteurs de l'accroissement des arbres non surcimés

L'accroissement diamétrique diminue généralement avec la taille des arbres. Les arbres de grand diamètre ont un accroissement diamétrique plus faible que les arbres de petit diamètre (figure 4, tableau II). Cette observation est fréquente en forêt tropicale (Gourlet-Fleury et Houllier, 2000 ; Iida *et al.*, 2014) surtout pour les arbres de DHP ≥ 40 cm (Hérault *et al.*, 2011). Elle peut s'expliquer par plusieurs mécanismes : les grands arbres investiraient davantage d'énergie pour la respiration et pour la fructification et ils disposeraient de moins de surface foliaire par unité de biomasse vivante (Ryan et Yoder, 1997). En outre, en phase de sénescence, ils perdraient leur aptitude à remplacer les branches mortes pour maintenir un taux de croissance optimal (Genet *et al.*, 2010).

La variable fragmentation du houppier (FH) que nous avons évaluée sur le terrain a en particulier permis de prendre en considération le taux de branches mortes pour chaque arbre étudié. Près de 25 % des arbres de DHP ≥ 50 cm étaient dépourvus de 50 % de leurs branches. Avec un effet significativement négatif dans les modèles testés, FH s'est avérée être un indicateur important de l'accroissement diamétrique des arbres de la canopée et ce résultat est similaire à celui de Rutishauser *et al.* (2011) en forêt amazonienne. Quantifier par télédétection des variables caractérisant la mortalité des branches dans le houppier semble dès lors une piste intéressante pour affiner encore les modèles de croissance, en particulier pour les arbres de grande taille.

Nos résultats montrent également que les espèces héliophiles ont en moyenne un accroissement diamétrique plus élevé que celui des espèces tolérantes à l'ombrage. Ce constat est fréquent en forêt tropicale (Kariuki *et al.*, 2006) et s'explique par des stratégies de croissance différentes entre ces groupes d'espèces (Baker *et al.*, 2003).

Lorsque l'on veut prédire l'accroissement des arbres de canopée qui, en général, ont un DHP ≥ 30 cm, nos résultats montrent que le statut social n'est pas une variable explicative pertinente. En effet, ni le code de Dawkins évalué depuis le sol, ni Δ Altm déterminé par télédétection n'ont montré d'influence significative sur l'accroissement des arbres étudiés. Dawkins (1958) a conclu de manière similaire sur des arbres de la strate intermédiaire ou émergente en Ouganda. Le statut social ne paraît vraiment pertinent que pour une évaluation de l'accroissement des arbres appartenant à toutes les strates, du sous-bois à la canopée (Moravie *et al.*, 1999).

Des drones et des ortho-images en forêt tropicale

La proportion d'arbres détectés sur l'ortho-image augmente en fonction de leur taille

Dans notre étude, la détectabilité des arbres augmente avec leur taille. Ce résultat était attendu étant donné que les arbres de grande taille ne sont généralement pas surcimés alors que la plupart des arbres de petite taille le sont (Broadbent *et al.*, 2008). Il est parfois admis que les arbres qui atteignent l'étage supérieur de la canopée sont généralement des arbres de plus de 30 cm de diamètre (Clark et Clark, 1992 ; Gourlet-Fleury, 1998). Nos résultats permettent d'approfondir ce constat. Pour la forêt étudiée, la moitié des arbres de 30-40 cm de diamètre étaient détectables et donc non surcimés. La détectabilité augmente ensuite rapidement avec le diamètre des arbres. Pour notre site d'étude, elle est devenue proche de 1 (0,97) pour des arbres de 60 cm de diamètre. En Afrique centrale, c'est essentiellement cette catégorie d'arbres (DHP ≥ 60 cm) qui est concernée par l'exploitation forestière (Sépulchre *et al.*, 2008). Les drones peuvent donc permettre d'améliorer l'inventaire et la planification de l'aménagement des forêts destinées à la production, dans la mesure où les espèces exploitables sont reconnaissables sur les images aériennes de haute résolution.

Les arbres détectés représentent 75 % de la biomasse aérienne

Seulement 23 % des arbres présents dans le peuplement ont pu être détectés sur les ortho-images, mais les arbres détectés, qui atteignent la canopée, représentent 75 % de la biomasse aérienne. La probabilité de détection des arbres augmente avec leur diamètre, tout comme leur contribution à la biomasse (Bastin *et al.*, 2018 ; Slik *et al.*, 2013) avec des implications pratiques pour les programmes de monitoring forestier à grande échelle (Jucker *et al.*, 2017). L'utilisation d'ortho-images à haute résolution s'avère prometteuse pour quantifier et spatialiser la biomasse stockée en forêt tropicale, ce qui constitue un prérequis essentiel pour mettre en œuvre des politiques environnementales comme le mécanisme REDD+ (Réduction des effets dus à la déforestation et à la dégradation des forêts) (Birdsey *et al.*, 2013). Bien que cet aspect n'ait pas été testé dans cette étude, il a déjà été montré à plusieurs reprises que la taille des houppiers est un bon prédicteur de la biomasse, à l'échelle de l'arbre (Goodman *et al.*, 2014 ; Jucker *et al.*, 2017 ; Ploton *et al.*, 2016) ou de la parcelle (Meyer *et al.*, 2018).

L'usage conjoint des drones et d'autres outils de télédétection classiques constitue une piste prometteuse pour mieux étudier les forêts tropicales

Notre méthode d'acquisition d'images par drone pour l'étude de la forêt tropicale est peu onéreuse, le drone présentant, de plus, une meilleure flexibilité opérationnelle comparé à de nombreuses techniques d'acquisition d'images satellitaires ou LiDAR (Vaglio *et al.*, 2014). 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 (Asner *et al.*, 2002). L'utilisation du drone soulève néanmoins deux principales faiblesses liées, d'une part, à l'incapacité à détecter les arbres surcimés et, d'autre part, à sa limite pour couvrir de grandes surfaces du fait d'une autonomie de vol réduite. Combiner les outils drone, LiDAR et satellite paraît alors l'approche idéale pour étudier les forêts tropicales à grande échelle, à moindre coût et à très haute résolution. Une étude de Bourgoïn *et al.* (2020) sur l'utilisation combinée d'images drones et satellitaires (Landsat) pour la caractérisation des forêts dégradées grâce à l'analyse de la texture des canopées par l'approche FOTO (*Fourier Transform Textural Ordination* ; Couteron *et al.*, 2006) a montré des résultats et des perspectives prometteurs sur ce sujet.

Conclusion

L'utilisation d'images aériennes à très haute résolution acquises à l'aide d'un drone et de techniques de photogrammétrie a permis de mesurer les dimensions des houppiers d'arbres non surcimés en forêt tropicale. Bien que seule une minorité d'arbres (23 % dans notre étude) soient visibles sur les ortho-images, ce sont essentiellement des arbres de grande taille et donc ceux qui stockent la majorité de la biomasse totale (75 %). Pour prédire la croissance, les approches classiques utilisent des variables mesurables sur le terrain. Notre étude montre que des relations aussi précises peuvent être obtenues à partir de variables issues d'images aériennes à haute résolution, ou améliorées en utilisant à la fois les deux types de variables.

Remerciements

Les auteurs remercient aussi bien le projet FORETS (Formation, Recherche, Environnement dans la Tshopo) de l'Union européenne mis en œuvre par le Cifor (Centre for International Forestry Research) que l'IRSNB (Institut royal des Sciences naturelles de Belgique) pour l'appui financier à la recherche menée. Ils remercient également R&SD (Resources and Synergies Development) pour son appui logistique. Gembloux Agro-Bio Tech de l'Université de Liège a mis à disposition les images aériennes acquises par drone, le Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement), le Cifor et l'Unikis (Université de Kisangani) ont partagé les données d'inventaire du dispositif expérimental de Yoko. Ce dispositif a été suivi dans le cadre du projet DynAffor, cofinancé par le Fonds français pour l'environnement mondial et l'Agence française de développement (n° CZZ.1636).

Annexe A.

La co-registration des données de terrain avec les ortho-images

A1-Méthode

La co-registration des données de terrain avec les ortho-images, schématisée à la figure A1, est une opération importante dans la perspective d'une utilisation combinée de ces deux sources d'information. La position des arbres sur le terrain est assimilée à des points localisés dans un référentiel cartésien local. Les houppiers des arbres observés sur l'ortho-image peuvent être assimilés à des polygones. Les centroïdes de ces derniers constituent un estimateur de la position de l'apex des arbres bien que des décalages puissent exister entre ces deux positions. Ces décalages combinent les erreurs de positionnement sur le terrain

et les effets liés à la morphologie des arbres, l'apex d'un arbre n'étant pas nécessairement à l'aplomb de son pied. Afin de prendre ces éléments en compte, la co-registration a comporté deux étapes : la transformation des positions des arbres définies dans un repère local en coordonnées exprimées dans le système de coordonnées WGS84 UTM-35N ; la rectification des positions des arbres par rapport aux centroïdes de leur houppier sur l'ortho-image. La première étape a été réalisée en considérant un échantillon ($n = 16$) d'arbres dominants non inclinés et bien répartis sur la parcelle étudiée. Les contours de leur houppier ont été digitalisés manuellement (figure 2a) dans l'environnement QGIS version 2.18 (QGIS Development Team, 2017) et les centroïdes définis avec la commande « centroïdes de polygones » du même logiciel. Une transformation affine a été établie par appariement des positions de ces 16 arbres dans les deux systèmes de coordonnées locales et UTM-35N. Elle a ensuite été appliquée à l'ensemble des arbres de la parcelle.

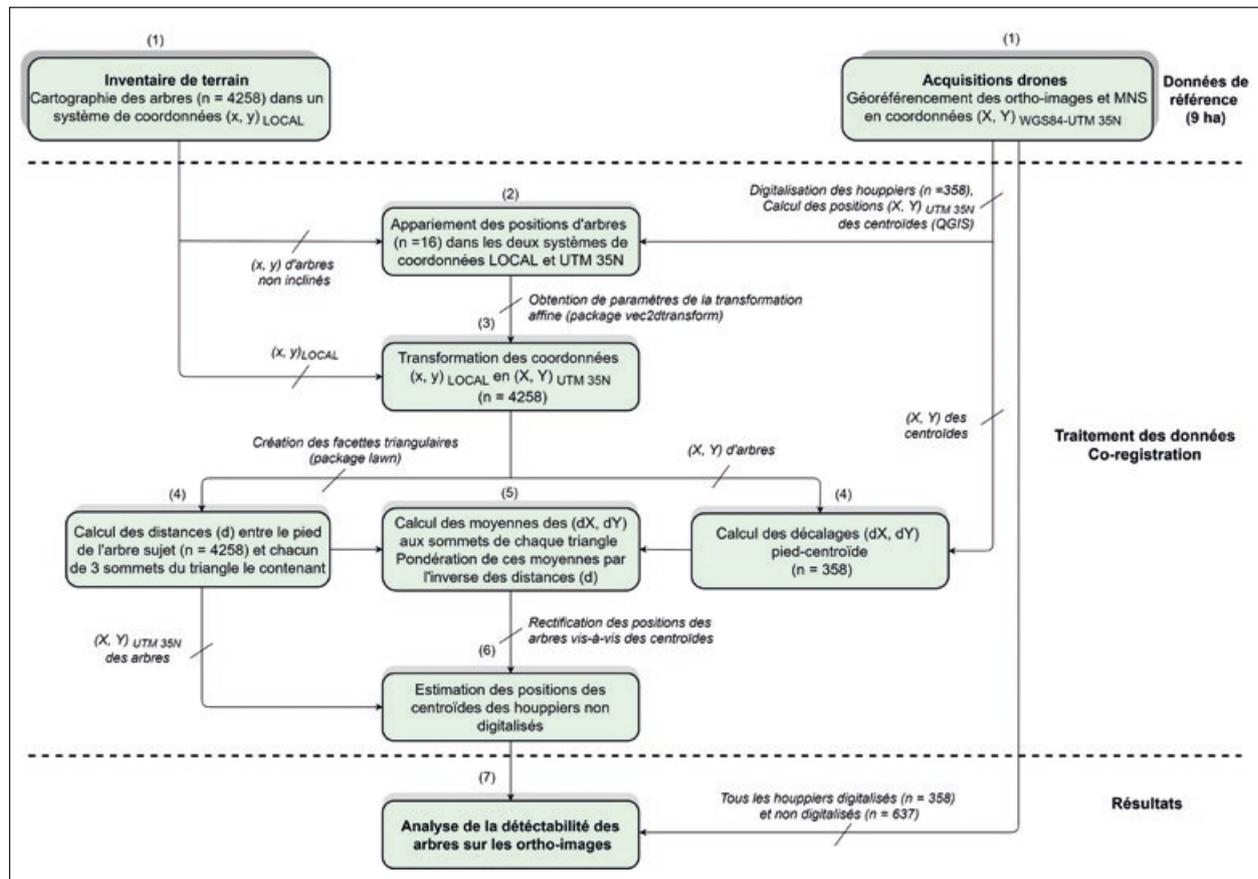


Figure A1.

Schéma explicatif de la méthode de co-registration utilisée pour appairer les données de terrain avec les ortho-images drones et analyser la détectabilité des arbres sur la parcelle expérimentale de Yoko (République démocratique du Congo). Les phases suivies sont numérotées de (1) à (7) dans leur ordre chronologique. Les phases identifiées par le même numéro ont été réalisées simultanément.

Annexe A (suite).

La seconde étape a été réalisée en considérant un second échantillon d'arbres ($n = 358$) dont les contours des houppiers ont été digitalisés et les centroïdes définis comme précédemment. Pour ces arbres, les décalages entre les positions du pied de l'arbre et celle du centroïde ont été exprimés à la fois en termes de distance (d) et de différences de coordonnées X et Y (notées dx et dy). Un réseau de facettes triangulaires ayant comme sommets les positions des pieds d'arbre de ce second échantillon a ensuite été produit (figure A2).

Pour les arbres dont le contour du houppier n'a pas été digitalisé ($n = 637$), la position du centroïde a été estimée en considérant le décalage moyen « pied-centroïde » observé sur les trois sommets de la facette triangulaire contenant l'arbre sujet et pondéré par l'inverse de la distance entre le sujet et chacun des trois sommets de la facette triangulaire (figure B2).

A2. Résultats et discussion

La co-registation des données de terrain avec les ortho-images était efficace en raison du décalage relativement faible entre les positions des arbres et le centroïde de leur houppier. Ce décalage était de $3,38 \pm 2,06$ m (moyenne \pm erreur standard). Il est inférieur au rayon du houppier moyen des arbres de la canopée en forêt tropicale (Asner *et al.*, 2002), soit $5,31 \pm 2,28$ m dans cette étude. Ce décalage est plus faible comparé à celui trouvé par Clark *et al.* (2004b) ($5,3 \pm 2,3$ m

lorsqu'ils ont co-enregistré les positions d'arbres émergents ($N = 15$) en forêt amazonienne à partir d'images IKONOS géorectifiées. La rémanence des décalages arbre-centroïde, malgré la rectification effectuée sur les positions des arbres, montre cependant la limite pour les réduire complètement. Ces décalages sont en effet distribués aléatoirement, ce qui empêche de les corriger de manière systématique.

Par ailleurs, l'appariement automatique des données aurait été plus rapide que notre approche manuelle. La co-registation automatique est en effet facilitée par un appariement des données de terrain et sur une image en utilisant à la fois les positions des arbres et d'autres attributs dendrométriques comme la hauteur ou la dimension du houppier déterminées à partir d'un modèle numérique de hauteur (MNH). L'application de la co-registation automatique en forêt tropicale rencontrerait cependant une double contrainte, d'une part liée à la difficulté d'acquisition de MNH de bonne précision, d'autre part à cause des techniques de segmentation d'images qui présentent encore des limites dans ce type d'écosystème (Aubry-Kientz *et al.*, 2019). Notre approche d'appariement manuel des données de terrain avec les ortho-images après rectification des positions des arbres par rapport aux centroïdes de leur houppier représente dès lors une alternative intéressante applicable à des parcelles expérimentales où l'on dispose, a priori, des coordonnées des arbres dans un système de référence local.

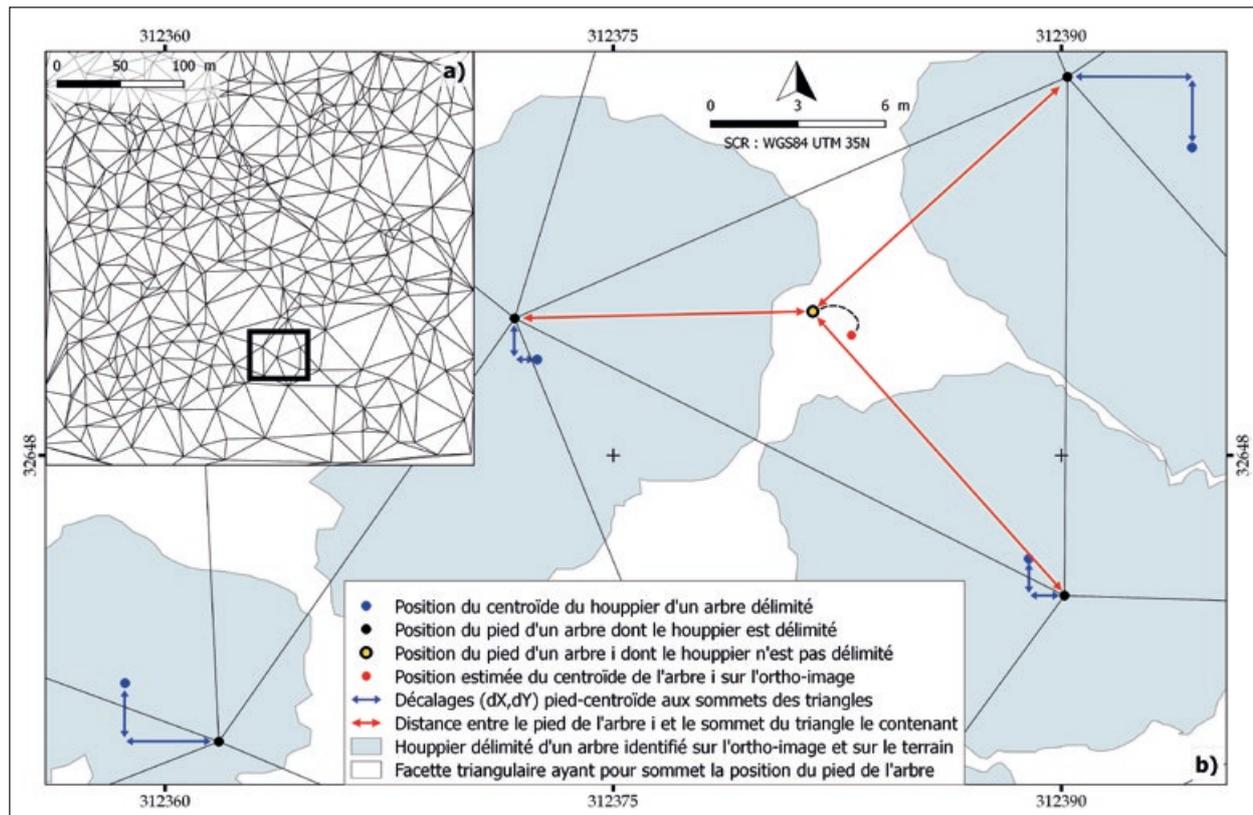
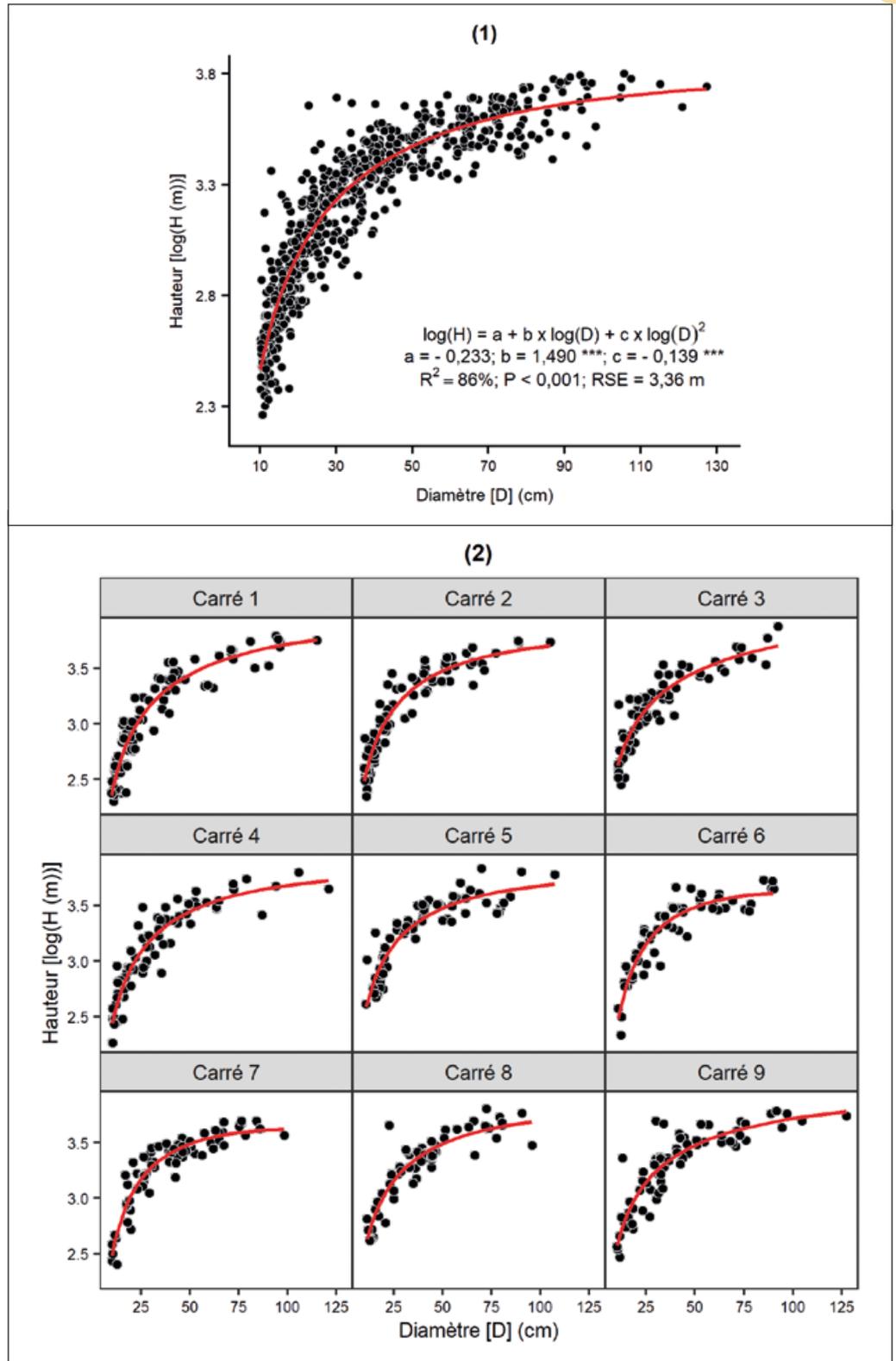


Figure A2.

(a) Illustration du réseau des facettes triangulaires produites sur la parcelle d'étude permettant l'estimation de la position des centroïdes d'arbre. (b) Les facettes triangulaires ont pour sommet la position du tronc de 358 arbres répartis sur l'ensemble de la parcelle, et dont l'identification du houppier a été vérifiée sur le terrain. Pour un arbre i contenu dans un triangle donné, sa position a été corrigée en tenant compte des écarts observés aux sommets du triangle.

Annexe B.

Relations allométriques hauteur-diamètre



Figures B1.

Relation hauteur-diamètre (1) établie à l'échelle de la parcelle d'étude à Yoko, RDC (9 ha) et (2) dans chaque carré (9 x 1 ha) permettant de générer des valeurs de hauteur sur l'ensemble des arbres étudiés et de calculer la biomasse aérienne individuelle. L'équation ajustée est de la forme $\log(H) = a + b \times \log(D) + c \times \log(D)^2$, log étant le logarithme népérien. Le signe « *** » désigne la significativité des paramètres de l'équation au seuil $\alpha < 0,001$.

Références bibliographiques

- Asner G. P., Palace M., Keller M., Pereira Jr. R., Silva J. N. M., Zweede J. C., 2002. Estimating Canopy Structure in an Amazon Forest from Laser Range Finder and IKONOS Satellite Observations. *Biotropica*, 34 (4): 483-492. [https://doi.org/10.1646/0006-3606\(2002\)034\[0483:ECSIAA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1646/0006-3606(2002)034[0483:ECSIAA]2.0.CO;2)
- Aubry-Kientz M., Dutrieux R., Ferraz A., Saatchi S., Hamraz H., Williams J., *et al.*, 2019. A comparative assessment of the performance of individual tree crowns delineation algorithms from ALS data in tropical forests. *Remote Sensing*, 11 (9): 1086. <https://doi.org/10.3390/rs11091086>
- Augusto Da Cunha T., Guimarães Finger C. A., Hasenauer H., 2016. Tree basal area increment models for *Cedrela*, *Amburana*, *Copaifera* and *Swietenia* growing in the Amazon rain forests. *Forest Ecology and Management*, 365: 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.031>
- Baker T. R., Swaine M. D., Burslem D. F. R. P., 2003. Variation in tropical forest growth rates: combined effects of functional group composition and resource availability. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6: 21-36. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00040>
- Bastin J. F., Rutishauser E., Kellner J. R., Saatchi S., Pélissier R., Hérault B., *et al.*, 2018. Pan-tropical prediction of forest structure from the largest trees. *Global Ecology and Biogeography*, 27: 1366-1383. <https://doi.org/10.1111/geb.12803>
- Bates D., Mächler M., Bolker B., Walker S., 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67 (1): 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bénédict F., Doucet J.-L., Fayolle A., Gillet J.-F., Gourlet-Fleury S., Vincke D., 2013. CoForTraits, base de données d'information sur les traits des espèces d'arbres africaines. Version 1.0. 2018.
- Birdsey R., Angeles-Perez G., Kurz W. A., Lister A., Olguin M., Pan Y., *et al.*, 2013. Approaches to monitoring changes in carbon stocks for REDD+. *Carbon Management*, 4 (5): 519-537. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.49>
- Blanchard E., Birnbaum P., Ibanez T., Boutreux T., Antin C., Ploton P., *et al.*, 2016. Contrasted allometries between stem diameter, crown area, and tree height in five tropical biogeographic areas. *Trees - Structure and Function*, 30 (6): 1953-1968. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1424-3>
- Bourgoin C., Betbeder J., Coueron P., Blanc L., Le Roux R., Cornu G., *et al.*, 2020. UAV-based canopy textures assess degraded structures in human-modified Amazonian forest. *Ecological Indicators*, 1-29. (in press)
- Broadbent E. N., Asner G. P., Peña-Claros M., Palace M., Soriano M., 2008. Spatial partitioning of biomass and diversity in a lowland Bolivian forest: Linking field and remote sensing measurements. *Forest Ecology and Management*, 255: 2602-2616. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.044>
- Carrillo G., 2015. vec2dtransf: 2D Cartesian Coordinate Transformation. R package version 1.1. <https://rdr.io/cran/vec2dtransf/man/vec2dtransf-package.html>
- Chamberlain M. S., Hollister J., Herlocker M., 2019. lawn: Client for "Turfs" for "Geospatial" Analysis. R package version 0.5.0. <https://cran.r-project.org/package=lawn>
- Chave J., Réjou-Méchain M., Burquez A., Chidumayo E., Colgan M. S., Delitti W. B. C., *et al.*, 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20 (10): 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Clark D. A., Clark D. B., 1992. Life history diversity of canopy and emergent trees in a neotropical rain forest. *Ecological Monographs*, 62 (3): 315-344. <https://doi.org/10.2307/2937114>
- Clark D. B., Castro C. S., Alvarado L. D. A., Read J. M., 2004a. 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>
- Clark D. B., Read J. M., Clark M. L., Cruz A. M., Dotti M. F., Clark D. A., 2004b. Application of 1-m and 4-m resolution satellite data to ecological studies of tropical rain forests. *Ecological Applications*, 14 (1): 61-74. <https://doi.org/10.1890/02-5120>
- Cole W. G., Lorimer C. G., 1994. Predicting tree growth from crown variables in managed northern hardwood stands. *Forest Ecology and Management*, 67: 159-175. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)90014-0)
- Coueron P., Barbier N., Gautier D., 2006. Textural ordination based on Fourier spectral decomposition: A method to analyze and compare landscape patterns. *Landscape Ecology*, 21 (4): 555-567. <https://doi.org/10.1007/s10980-005-2166-6>
- Dawkins H. C., 1958. The management of natural tropical high-forest with special reference to Uganda. Imperial Forestry Institute, University of Oxford, Institute Paper 34, 155 p.
- Dorner B., Lertzman K., Fall J., 2002. Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis. *Landscape Ecology*, 17 (8): 729-743. <https://doi.org/10.1023/a:1022944019665>
- Durrieu de Madron L., Nasi R., Détienne P., 2000. Accroissements diamétriques de quelques essences en forêt dense africaine. *Bois et Forêts des Tropiques*, 263 : 63-73. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20062>
- Foli E. G., Alder D., Miller H. G., Swaine M. D., 2003. Modelling growing space requirements for some tropical forest tree species. *Forest Ecology and Management*, 173: 79-88. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00815-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00815-5)
- Franc A., Gourlet-Fleury S., Picard N., 2000. Une introduction à la modélisation des forêts hétérogènes. Nancy, France, Engref, 292 p.
- Genet H., Bréda N., Dufrêne E., 2010. Age-related variation in carbon allocation at tree and stand scales in beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) using a chronosequence approach. *Tree Physiology*, 30 (2): 177-192. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpp105>
- Getzin S., Wiegand K., Schöning I., 2012. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods in Ecology and Evolution*, 3 (2): 397-404. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2011.00158.x>
- Goodman R. C., Phillips O. L., Baker T. R., 2014. The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates. *Ecological Applications*, 24 (4): 680-698. <https://doi.org/10.1890/13-0070.1>
- Gourlet-Fleury S., 1998. Indices de compétition en forêt dense tropicale humide: étude de cas sur le dispositif sylvicole expérimental de Paracou (Guyane française). *Annales des Sciences Forestières*, 55 (6) : 623-654. <https://doi.org/10.1051/forest:19980601>
- Gourlet-Fleury S., Houllier F., 2000. Modelling diameter increment in a lowland evergreen rain forest in French Guiana. *Forest Ecology and Management*, 131: 269-289. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00212-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00212-1)
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., *et al.*, 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342 (6160): 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hérault B., Bachelot B., Poorter L., Rossi V., Bongers F., Chave J., *et al.*, 2011. Functional traits shape ontogenetic growth trajectories of rain forest tree species. *Journal of Ecology*, 99 (6): 1431-1440. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01883.x>
- Iida Y., Poorter L., Sterck F., Kassim A. R., 2014. Linking size-dependent growth and mortality with architectural traits across 145 co-occurring tropical tree species. *Ecology*, 95 (2): 353-363. <https://doi.org/10.1890/11-2173.1>
- Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F., *et al.*, 2017. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Global Change Biology*, 23 (1): 177-190. <https://doi.org/10.1111/gcb.13388>

Kariuki M., Rolfe M., Smith R. G. B., Vanclay J. K., Kooyman R. M., 2006. Diameter growth performance varies with species functional-group and habitat characteristics in subtropical rainforests. *Forest Ecology and Management*, 225: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.07.016>

Kuznetsova A., Brockhoff P. B., Bojesen R. H., 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82 (13): 1-26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>

Lebrun J., Gilbert G., 1954. Une classification écologique des forêts du Congo. Bruxelles, Belgique, Publications de l'INEAC, Série scientifique, n° 63, 89 p.

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>

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>

Meyer V., Saatchi S., Clark D. B., Keller M., Vincent G., Ferraz A., *et al.*, 2018. Canopy area of large trees explains aboveground biomass variations across neotropical forest landscapes. *Biogeosciences*, 15: 3377-3390. <https://doi.org/10.5194/bg-15-3377-2018>

Moravie M.-A., Durand M., Houllier F., 1999. Ecological meaning and predictive ability of social status, vigour and competition indices in a tropical rain forest (India). *Forest Ecology and Management*, 117: 221-240. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00480-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00480-0)

Ota T., Ogawa M., Shimizu K., Kajisa T., Mizoue N., Yoshida S., *et al.*, 2015. Aboveground biomass estimation using structure from motion approach with aerial photographs in a seasonal tropical forest. *Forests*, 6: 3882-3898. <https://doi.org/10.3390/f6113882>

Palace M., Keller M., Asner G. P., Hagen S., Braswell B., 2008. Amazon forest structure from IKONOS satellite data and the automated characterization of forest canopy properties. *Biotropica*, 40 (2): 141-150. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2007.00353.x>

PhotoScan, 2015. Agisoft PhotoScan : Manuel de l'utilisateur. Professional Edition, version 1.1.

Picard N., Gourlet-Fleury S., 2008. Manuel de référence pour l'installation de dispositifs permanents en forêt de production dans le Bassin du Congo. Cirad-Comifac, 270 p.

Ploton P., Barbier N., Momo S. T., Réjou-Méchain M., Boyemba B. F., Chuyong G., *et al.*, 2016. Closing a gap in tropical forest biomass estimation: Taking crown mass variation into account in pantropical allometries. *Biogeosciences*, 13 (5): 1571-1585. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1571-2016>

Prévosto B., 2005. Les indices de compétition en foresterie : exemples d'utilisation, intérêts et limites. *Revue Forestière Française*, 57 (5) : 413-430. <https://doi.org/10.4267/2042/5062>

QGIS Development Team, 2017. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. <http://www.qgis.org>

R Core Team, 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

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: 592-600. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2003.00814.x>

Réjou-Méchain M., Tanguy A., Piponiot C., Chave J., Hérault B., 2017. BIOMASS: an R package for estimating above-ground biomass and its uncertainty in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 8 (9): 1163-1167. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12753>

Rutishauser E., Barthélémy D., Blanc L., Nicolini E.-A., 2011. Crown fragmentation assessment in tropical trees: Method, insights and perspectives. *Forest Ecology and Management*, 261 (3): 400-407. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.025>

Rutishauser E., Wagner F., Hérault B., Nicolini E.-A., Blanc L., 2010. Contrasting above-ground biomass balance in a Neotropical rain forest. *Journal of Vegetation Science*, 21 (4): 672-682. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2010.01175.x>

Ryan M. G., Yoder B. J., 1997. Hydraulic limits to tree height and tree growth. *Bioscience*, 47 (4): 235-242. <https://doi.org/10.2307/1313077>

Sépulchre F., Daïnou K., Doucet J.-L., 2008. Étude de la vulnérabilité de 18 essences ligneuses commerciales d'Afrique centrale reprises sur la liste rouge IUCN. Nature+, ATIBT, Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, 51 p.

Slik J. W. F., Paoli G., McGuire K., Amaral I., Barroso J., Bastian M., *et al.*, 2013. Large trees drive forest aboveground biomass variation in moist lowland forests across the tropics. *Global Ecology & Biogeography*, 22: 1261-1271. <https://doi.org/10.1111/geb.12092>

Sprinz P. T., Burkhardt H. E., 1987. Relationships between tree crown, stem, and stand characteristics in unthinned loblolly pine plantations. *Revue Canadienne de Recherche Forestière*, 17 (6): 534-538. <https://doi.org/10.1139/x87-089>

Vaglio G., Chen Q., Lindsell J. A., Coomes D. A., Del Frate F., Guerriero L., *et al.*, 2014. Above ground biomass estimation in an African tropical forest with lidar and hyperspectral data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 89: 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.01.001>

Wyckoff P. H., Clark J. S., 2005. Tree growth prediction using size and exposed crown area. *Revue Canadienne de Recherche Forestière*, 35 (1): 13-20. <https://doi.org/10.1139/x04-142>

Ndamiyehe *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	J.-B. N. Ndamiyehe, P. Lejeune, S. Gourlet-Fleury, A. Fayolle, G. Ligot
Gestion des données	J.-B. N. Ndamiyehe
Analyse formelle	J.-B. N. Ndamiyehe, P. Lejeune, G. Ligot
Acquisition du financement	J.-B. N. Ndamiyehe, P. Lejeune, S. Gourlet-Fleury, L. Ndjele
Enquête et investigation	J.-B. N. Ndamiyehe
Méthodologie	J.-B. N. Ndamiyehe, P. Lejeune, S. Gourlet-Fleury, G. Ligot
Gestion de projet	J.-B. N. Ndamiyehe, P. Lejeune, S. Gourlet-Fleury, L. Ndjele
Ressources	P. Lejeune, S. Gourlet-Fleury
Logiciels	J.-B. N. Ndamiyehe, P. Lejeune, G. Ligot
Supervision	P. Lejeune, S. Gourlet-Fleury, L. Ndjele
Validation	P. Lejeune, S. Gourlet-Fleury, A. Fayolle, G. Ligot
Visualisation	J.-B. N. Ndamiyehe, G. Ligot
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	J.-B. N. Ndamiyehe
Écriture – Révision et édition	J.-B. N. Ndamiyehe, P. Lejeune, S. Gourlet-Fleury, A. Fayolle, G. Ligot

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier Cedex 5, France - Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X