



BIODIVERSITE VEGETALE ET GESTION DES ECOSYSTEMES TROPICAUX

Formation de master – Université de Montpellier et AgroParisTech

**Modélisation de l'accroissement diamétrique des arbres d'une forêt du Nord
Congo à l'aide de données de télédétection acquises par drone en apport aux
mesures de terrain**

Ecrit par Amélie CHELIOUT

Stage de master 1

Du 25/03/2019 au 26/06/2019

A Campus International de Baillarguet, 34398 Montpellier, France

Encadrants : Dr Vivien ROSSI

Co-encadrant : Dr Sylvie GOURLET-FLEURY et Ir Eric FORNI

Professeur référent à AgroParisTech : Dr Raphaël MANLAY

Professeur référent à l'Université de Montpellier : Dr Charles DOUMENGE

REMERCIEMENTS

Cette étude a été pour moi un immense honneur. Le pilier de connaissances que j'ai acquises en foresterie me seront profitables dans beaucoup de situations.

Merci à toute l'équipe pédagogique de mon master qui m'ont permis d'approcher cette étude.

Merci à Sylvie pour tout ce qu'elle a fait pour moi. Son temps passé à me faire partager ses connaissances, son investissement personnel dans mon étude, et sa disponibilité sont autant d'apports avantageux qui ont rempli mon stage d'enthousiasme. Je tiens à lui témoigner toute ma reconnaissance pour m'avoir inspiré en tant que chercheuse éminente et m'avoir donné le goût de la précision, de l'acharnement, et de la passion pour ses recherches en foresterie.

Merci à Vivien, qui m'a permis que j'intègre cette étude. Tout au long du stage, il s'est efforcé de nouer le lien avec moi à distance pour mener à bien ce stage. Ses atouts statistiques m'ont été très bénéfiques, et il a su trouver un équilibre avec mes propres capacités pour aboutir à de bons résultats statistiques.

Merci à Guillaume, qui m'a intégré dans l'équipe dès le commencement de ce stage, puis qui, avec ses compétences colossales en informatique et sa gentillesse démesurée, m'a permis de comprendre un logiciel SIG en très peu de temps et a répondu à mes multiples questions sur R.

Merci à Mélaine Aubry-Kientz qui a pris de son temps au début de mon étude pour me présenter les différentes méthodes de segmentation automatique que je pouvais utiliser.

Merci à Fabrice, gardien des données, de m'avoir accueilli dans son bureau et de m'avoir transmis sa bonne humeur chaque jour.

Enfin, un merci tout particulier à Frédéric, qui m'a permis de réaliser ce stage dans des conditions de travail particulièrement bonnes, et qui a su élever mes connaissances statistiques en me proposant de nouvelles approches à la modélisation qui m'ont beaucoup intéressées.

Et pour finir, je remercie Théo, camarade de classe brillant qui a été pour moi un immense soutien tout au long de cette étude ; les stagiaires et doctorants de l'unité de recherche que j'ai fréquentés dont l'aide, même de petit niveau, m'a été très enrichissante ; Hélène pour son soutien administratif précieux ; et tous les chercheuses et chercheurs que j'ai côtoyés, de près ou de loin.

Merci à eux. Je leurs dédie ce rapport.

RESUME

Les ressources forestières dans le monde doivent être protégées, notamment en Afrique centrale qui est une région recouverte d'une immense forêt tropicale dense humide. L'analyse et la modélisation de la croissance des arbres en peuplements est nécessaire pour gérer durablement ses ressources. Les images de télédétection acquises par drone offrent depuis peu aux scientifiques des possibilités d'analyser ces forêts vues du ciel. Dans cette étude, des images de drone ont permis de segmenter les surfaces de couronnes d'arbres d'une forêt du Nord Congo, de manière automatique et manuellement, ainsi que de reconnaître 4 essences présentes en grand nombre dans ce peuplement (*Gilbertiodendron dewevrei*, *Petersianthus macrocarpus*, *Manilkara mabokeensis* et *Celtis tessmannii*). Les mesures de la taille des couronnes prise sur les images se sont révélées significativement plus grandes que celles faites au sol grâce à la mesure des rayons du houppier projeté horizontalement. Cela pourrait être lié à la mauvaise visibilité des limites du houppier des arbres à partir du sol en forêt dense humide, ce qui révélerait le potentiel du drone à caractériser cette mesure. Aussi, ce travail montre qu'en augmentant l'effort de mesure des rayons au sol, on augmente la fiabilité les valeurs de taille des couronnes. Les algorithmes de segmentation automatique testés n'ont pas été convainquant, mais les méthodes *watershed* se sont toutefois révélées prometteuses, et le logiciel Computree aussi. Les analyses statistiques de ce rapport réalisées avec les différentes mesures relevées sur les arbres du site d'étude montrent que les variables issues des images de drone forment toujours de meilleurs modèles expliquant l'accroissement diamétrique que les variables issues des mesures au sol. Cette étude envisage de remplacer les mesures relevées sur le terrain par les mesures pouvant être acquises avec la télédétection de drone.

Mots clés : Modélisation accroissement diamétrique, images drone, méthode de segmentation, forêt tropicale

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
RESUME	3
1. INTRODUCTION	6
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	9
2.1. Site d'étude.....	9
2.2. Données issues des mesures faites au sol	10
2.3. Données issues du drone.....	11
2.3.1. Le matériel de télédétection.....	11
2.3.2. Les données photogrammétriques issues des images de drone.....	11
2.3.3. Méthodes de segmentation automatique.....	12
2.3.4. Méthode de segmentation manuelle.....	13
2.4. Comparaison des surfaces de couronnes mesurées au sol et sur les images de drone	14
2.5. Modèles et tests statistiques	14
2.5.1. Présentation des modèles de régression linéaires.....	14
2.5.2. L'accroissement diamétrique : variable à expliquer	14
3. RESULTATS	15
3.1. Analyse de la segmentation des couronnes sur les images de drone	15
3.1.1 Segmentation des couronnes par les méthodes automatiques.....	15
3.1.2. Segmentation manuelle des couronnes sur tout le dispositif.....	18
3.1.3. Comparaison entre les mesures de la taille des couronnes faites au sol et sur les images	18
a) Relation entre la surface éclairée des couronnes mesurée par photogrammétrie et les mesures faites au sol sur le site de Loundoungou	18
b) Existe-t-il une relation entre les codes de Dawkins et l'écart entre les deux mesures de taille de couronne ?	19
c) Comparaison des relations établies sur les sites de Loundoungou et de Yoko entre les mesures de taille de couronnes issues des images de drone et celles estimées au sol.....	20
3.2. Modélisation de l'accroissement diamétrique	22
3.2.1. Relation entre l'accroissement diamétrique et la surface éclairée des couronnes des arbres estimée à partir d'un drone.....	22

3.2.2. Comparaison des codes de Dawkins et de la surface éclairée des couronnes pour l'explication de l'accroissement diamétrique.....	22
3.2.3. Comparaison de l'explication de l'accroissement par les données de drone <i>surface éclairée</i> et <i>espèces reconnaissables</i> , et par les données du sol <i>Dhp</i> et <i>codes de Dawkins</i>	23
3.2.4. Explication de l'accroissement diamétrique avec la combinaison des variables issues du drone et du sol.....	25
4. DISCUSSION	27
4.1. Remarques et inconvénients sur la segmentation des couronnes sur les images de drone.....	27
4.2. La segmentation automatique : des méthodes qui posent problème	28
4.3. La relation entre les mesures de taille de couronne faites au sol et sur les images de drone n'est pas équivalente à celle établie sur un autre site expérimental.....	28
4.4. Les résultats du modèle de croissance, toutes variables confondues, confirment les résultats des études antérieures	29
4.5. Le remplacement des mesures de terrain par les données de drone : une possibilité à étudier	30
4.6. Comment améliorer la modélisation de l'accroissement diamétrique ?	31
De plus, dans ce travail, les modèles ont été construits sur l'ensemble des observations sans distinction. Or une autre hypothèse serait de supposer que la population appartient à un ensemble de sous-populations, d'accroissements homogènes, et de réponses aux variables explicatives similaires. En effet, (Baker, Swaine, et Burslem 2003) propose une classification fonctionnelle des arbres de son site d'étude selon que leurs croissances soient rapides ou lentes, et il le met en relation avec le tempérament. Ainsi, une extension possible serait les modèles de mélange en régression qui permettent dans une unique procédure de classer les individus dans des groupes selon leurs réponses aux variables explicatives (discussion avec Mortier, 2019).	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	31
ANNEXES.....	36

1. INTRODUCTION

La forêt tropicale est située sur une large bande de surface terrestre répartie autour de l'équateur entre les tropiques du Cancer et du Capricorne. Elle est gardienne d'une biodiversité extraordinaire, (Slik et al. 2015) estiment le nombre minimum d'espèces d'arbres en forêts tropicales à 40000. Grâce à la photosynthèse des plantes qui fixe le carbone, les forêts tropicales renferment 34% du dioxyde de carbone (CO₂) terrestre mondial, principal gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique (Beer et al. 2010 ; Pan et al. 2011). Bien que les forêts tropicales soient un puit potentiel de carbone et un refuge de biodiversité, on observe des pertes de millions d'hectares chaque année (Bellassen et Gitz, 2008). Geist et Lambin (2001) indiquent que les facteurs majeurs impliqués dans la déforestation sont l'expansion de l'agriculture, l'extraction du bois, et l'extension d'infrastructures.

Deuxième plus grand massif forestier du monde, l'Afrique centrale est couverte de 1,68 millions de km² de forêt dense humide de basse altitude (Bayol et al. 2010, source : Verhegghen & Defourny, 2010 – Geodatabases de la RDC ; OFAC). Pour conserver la biodiversité et gérer durablement les forêts, les pays d'Afrique centrale se sont unis pour former la COMIFAC, Commission des forêts d'Afrique centrale (Wasseige et al. 2010). Les actions de la COMIFAC s'appliquent sur les triples plans politiques, scientifiques et socio-économiques (Doumenge et al. 2015 ; Marien et Bassaler, 2016 ; www.comifac.orf).

L'approvisionnement en bois d'œuvre issu de l'exploitation forestière est un atout majeur de l'économie des pays d'Afrique centrale (Atibt, 2007). Les scientifiques se préoccupent de sa gestion depuis les années 1970' et de la manière d'assurer sa durabilité (Fargeot, Forni et Nasi, 2004 ; Durrieu De Madron et al. 2011 ; Gourlet-Fleury *et al.*, 2011). C'est en régénérant les forêts dans leur composition et dans leur structure, et en améliorant leur potentiel de production, que l'exploitation forestière peut être pérenne (Dupuy et al. 1998). D'après Durrieu de Madron et al. (2011), l'aménagement des forêts permettrait de réduire 10% des pertes de carbone liées à l'extraction du bois, par rapport aux forêts exploitées sans gestion prévisionnelle.

L'aménagement durable des forêts tropicales d'Afrique centrale, pour notamment en extraire les ressources forestières comme le bois d'œuvre, nécessite d'étudier finement la dynamique des arbres du peuplement (Fargeot, Forni et Nasi, 2004 ; Durrieu de Madron et al. 2011). Il faut pouvoir connaître et modéliser les processus de croissance, de mortalité et de recrutement, pour établir des règles de gestion durable des ressources forestières à appliquer par les compagnies forestières.

La croissance des arbres dépend de plusieurs facteurs environnementaux comme la quantité d'eau, de lumière ou de nutriments, mais ce sont les rayonnements lumineux qui l'affectent le plus en forêt

tropicale humide (Baker, Swaine, et Burslem, 2003). Le tempérament des espèces renseigne sur la sensibilité des arbres à la lumière pour leur croissance en diamètre (Favrichon 1994). En effet, Houllier (1995) montre que, en dessous d'une certaine dimension diamétrique, les espèces pionnières ont une vitesse de croissance supérieure aux espèces tolérantes à l'ombrage. Il révèle aussi que la vitesse de croissance des espèces pionnières est décroissante selon les dimensions diamétriques des arbres. Baker, Swaine, et Burslem (2003) font le constat que le taux de croissance des espèces pionnières est rapide comparé au taux de croissance plus lent des espèces tolérantes à l'ombrage.

Au sein d'un peuplement, la quantité de lumière perçue par un houppier est généralement estimée depuis le sol par des variables qualitatives comme le code de Dawkins, qui prend en compte la surface du houppier ayant accès à la lumière (et qui est aussi considéré comme un indice du statut social). Ce code peut être associé à des mesures quantitatives de la dimension des houppiers : largeur et longueur de la couronne, taux de fragmentation du houppier, eux-mêmes reliés au diamètre des arbres. La prise en compte de ces variables améliore généralement la prédiction de la croissance des arbres (Gourlet-Fleury 1992 ; Ndamiyehe 2016). Mesurer au sol les dimensions des couronnes ou des houppiers, et quantifier la quantité de lumière qu'ils reçoivent, est compliqué. Une des techniques utilisées pour faire cela est de mesurer les rayons des houppiers projetées horizontalement sur le sol (Ndamiyehe 2016 ; Panzou 2018). Ce travail est chronophage et compliqué à mener à cause de la mauvaise visibilité en forêt tropicale dense. En plus, lorsque cette technique est utilisée, les auteurs supposent que les couronnes sont approximativement circulaires pour calculer leur surface ou leur diamètre moyen.

La technique de télédétection par drone offre des images de la canopée vues du ciel (Oliveira et al. 2015) qui permettent d'effectuer de bonnes estimations de la quantité de lumière perçue par le houppier qui pourraient permettre de s'affranchir d'un travail de terrain compliqué.

L'objectif de cette étude est d'explorer donc les potentialités des données issues de drones à caractériser la croissance des arbres en forêt tropicale semi-décidue du Nord Congo. Pour cela, nous avons comparé des modèles prédisant la croissance des arbres avec d'un côté des variables mesurées au sol, et d'un autre côté des variables mesurées sur des images de drones.

Premièrement, deux indicateurs de la quantité de lumière perçue par le houppier, estimés au sol et sur des images de drones, à savoir les codes de Dawkins et la surface éclairée des couronnes, ont été comparés dans deux modèles établis pour expliquer l'accroissement diamétrique. Dans un second temps, des modèles utilisant des données de drones et des données de terrain pour expliquer l'accroissement diamétrique sont comparés. Les variables issues des images de drones sont la

surface éclairée de la couronne et le tempérament des quatre espèces reconnaissables sur les photos. Les variables issues des mesures faites au sol sont le diamètre du tronc à hauteur de poitrine (DHP) et le code de Dawkins.

Pour la segmentation des couronnes sur les images de drone, nous avons d'abord testé des méthodes automatiques. Elles se basent sur des algorithmes établis pour délimiter la surface des couronnes des arbres sur des données d'imagerie par télédétection. En 2010, Ke et Quackenbush (2011) indiquent que l'ensemble des études publiées jusque-là appliquaient ces algorithmes sur des images de forêt tempérée, à part deux d'entre eux étant appliqués sur des données d'Australie. Plus récemment, des algorithmes sont testés en forêt tropicale (Ferraz et al. 2016 ; Coomes et al. 2017). Dans ce rapport, les données d'imagerie de forêt tropicale dense humide, issues de vols drone, sont soumises à six algorithmes de segmentation automatique publiés récemment (Dalponte, 2018 ; Roussel et al. 2019). Les résultats de segmentation sont comparés celle produite à la main sur une Système d'information géographique (SIG).

Les questions traitées dans ce rapport sont les suivantes.

- i) Les mesures de surface éclairée des couronnes segmentées sur les images de drone et les mesures de couronne réalisées au sol par la technique de la projection horizontale du houppier sont-elles équivalentes ?
- ii) En raison de la faible visibilité en forêt tropicale dense, la taille des couronnes est-elle davantage sous-estimée au sol lorsque les arbres sont plus hauts dans la canopée ? De même sur les images de drones, la taille des couronnes des arbres non-dominants est-elle sous-évaluée ?
- iii) La relation établie entre les tailles de couronnes des arbres mesurées au sol et sur les images, est-elle équivalente à celles établies sur un autre site expérimental ?
- iv) Les modèles expliquant l'accroissement diamétrique qui incluent les variables établies par l'analyse des images de drone sont-ils aussi bons que ceux utilisant les variables mesurées au sol ?
- v) Le tempérament a-t-il un effet sur l'accroissement qui prouverait les travaux de Baker, Swaine, et Burslem (2003) énonçant que la croissance des espèces pionnières est plus rapide que celle des espèces tolérantes à l'ombrage ?

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un stage de master 1 de la formation BioGET, Biodiversité et gestion des écosystèmes tropicaux. Elle a été réalisée durant trois mois sur le campus du CIRAD

de Baillarguet, menée à distance par Vivien ROSSI et Eric FORNI, et encadrée sur place par Sylvie GOURLET-FLEURY. Les mesures de terrain établies sur le site expérimental de Loundoungou, ainsi que les vols de drone et l'acquisition des données issues de ces vols, n'ont pas été réalisées par l'auteur de ce rapport.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Site d'étude

Le site d'étude est localisé au Nord de la République du Congo près du Parc National de Nouabalé-Ndoki, dans l'Unité Forestière d'Aménagement (UFA) Loundoungou-Toukoulaka dirigée par la Congolaise Industrielle des Bois (CIB) (Figure 1). La pluviométrie est de 1670mm en moyenne par an, il y a une saison sèche durant trois mois, et la température moyenne est de 25°C (Fayolle et al. 2014). L'altitude varie entre 395 et 470m, et le sol est argilo-sableux composé d'alluvions datant du Cénozoïque (Freycon et al. 2014 ; Forni et al. 2019). La forêt est de type semi-décidu avec une canopée dominée par des espèces à tendance héliophile, marquée par l'abondance de *Celtis spp* (Fayolle et al. 2014).

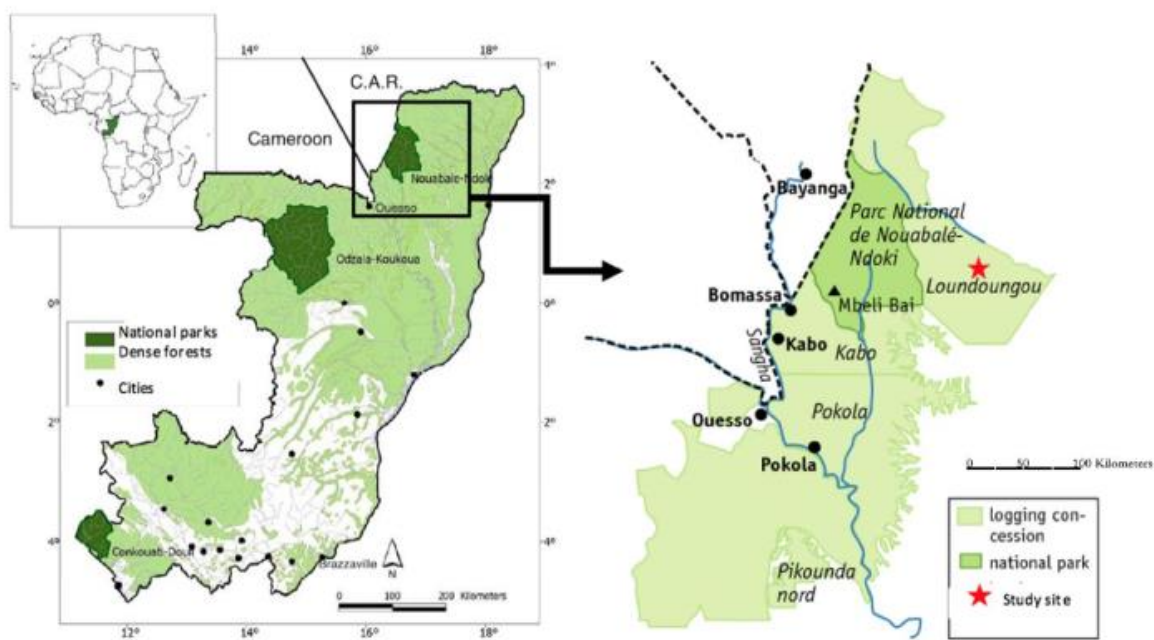


Figure 1. Carte du site d'étude (Stephen 2014 ; Meder 2014), tirée de Kaçamak (2018)

Le site d'étude a été installé dans le cadre des projets DynAffor et P3FAC (www.atibt.org/fr/projet/p3fac/). Il s'agit d'un dispositif permanent constitué de deux blocs de 400ha sur lesquels des inventaires d'espèces végétales sont relevés. Les données de cette étude

proviennent de quatre parcelles de 9ha (totalisant 36ha) installées deux par deux dans chaque bloc (Figure 2).

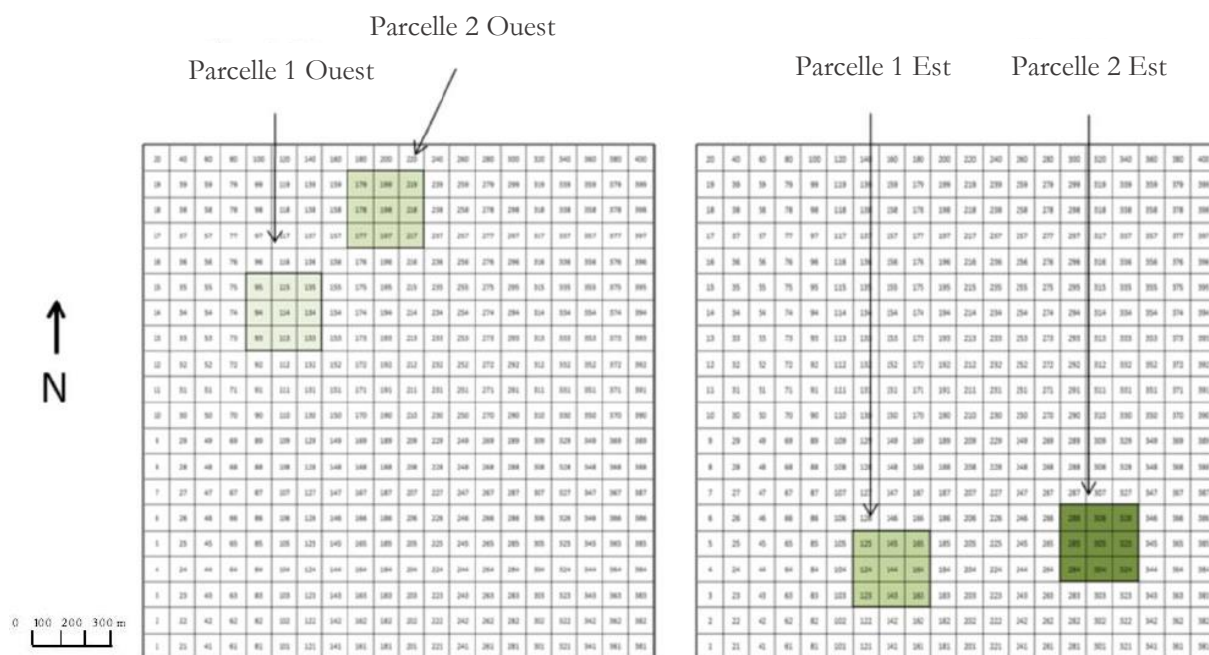


Figure 2. Plan des blocs ouest (à gauche) et est (à droite) de 400ha avec leurs parcelles de 9ha sur le site d'expérimentation de Loundoungou au Nord Congo. Chaque carré correspond à 1ha. Tirée de Kaçamak (2018)

2.2. Données issues des mesures faites au sol

Dans les quatre parcelles, tous les arbres de plus de 10cm de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) ont été géoréférencés, identifiés par un botaniste, et leur DHP a été mesuré au cours de trois campagnes de mesures en 2015, 2016 et 2017. 347 arbres/ha en moyenne, de 240 espèces différentes, ont été inventoriés (Forni et al. 2019).

Un travail de thèse a été mené en 2018 par Grace Loubota Panzou pour étudier les stocks de carbone et la biomasse sur le site. La taille des couronnes et les codes de Dawkins ont été évalués sur tous les arbres du carré central des parcelles 1 ouest et 1 est, et sur un arbre de chaque carré restant de ces parcelles. Il y a cinq codes de Dawkins, ils sont utilisés pour connaître la position des arbres dans la canopée et estimer la part de lumière directe que leur houppier reçoit. Les codes 1 et 2 correspondent aux arbres de bas étages dont la couronne ne reçoit pas ou très peu de lumière directe, le code 3 correspond aux couronnes partiellement ensoleillées, et les codes 4 et 5 aux couronnes complètement ensoleillées (Dawkins 1963) (Figure 3). La taille des couronnes a été

estimée par G. Loubota Panzou au sol par la technique de la projection horizontale des rayons du houppier dans les quatre directions cardinales (nord, sud, est, ouest).

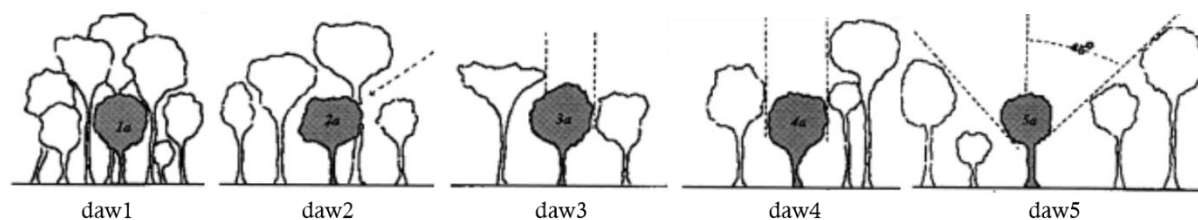


Figure 3. Caractéristiques des cinq codes de Dawkins, tirés de (Fétéké et al. 2015; Moravie, Durand, et Houllier 1999 ; Ndamiyehe 2016)

2.3. Données issues du drone

2.3.1. Le matériel de télédétection

Les drones civils, ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle), sont de petits engins volants pilotés à distance, et équipés de caméras ou autres capteurs. Des vols de drones civils ont été réalisés au-dessus de notre site d'étude, les caractéristiques des images issues de ces vols sont affichées dans le Tableau 1 pour chaque bloc. Dans les deux cas une caméra S.O.D.A._10.6_5472x3648 (RGB) a été utilisée, avec un capteur de taille 13.133 [mm] x 8.755 [mm] (+/- 0.001mm).

Tableau 1. Caractéristiques des images issues des vols de drone pour chaque bloc

Description	Bloc ouest	Bloc est
Date d'acquisition	18/06/2018	22/06/2018
Résolution spatiale	0.5 m.pixel ⁻¹	1.0 m.pixel ⁻¹
Aire couverte	86 ha	1293 ha

2.3.2. Les données photogrammétriques issues des images de drone

Deux orthophotographies, deux modèles numériques de surface (MNS) et deux nuages de points ont été générés à partir de ces images grâce au logiciel Pix4Dmapper version 4.3.12 sur le principe de *Structure from motion* (SfM) (Quality report DynAffFor vol 9ha, 2018, et vol 400ha, 2018). Ce principe permet de créer des images 3D à partir du chevauchement de plusieurs images 2D et de l'ajustement de leurs points avec des points de référence placés au sol, dont les coordonnées dans l'espace ont été référencées (Lisein et al. 2013; Michez et al. 2016; Mlambo et al. 2017). Le nuage

de points créé est exporté au format LAS et reprojeté dans le référentiel UTM33N WGS84. D'après (Mlambo et al. 2017), un nuage de points généré dans ces conditions peut retransmettre jusqu'à 50% du couvert de la forêt.

2.3.3. Méthodes de segmentation automatique

Pour obtenir une estimation de la surface éclairée des couronnes des arbres dans les parcelles, par le biais de ces données photogrammétriques, et pour que ce processus aille plus vite qu'en le faisant manuellement, j'ai testé les six algorithmes de segmentation automatique implémentés dans R (voir Tableau 2), ainsi que le logiciel Computree version 4.0. Ce logiciel a été développé par Alexandre PIBOULE de l'ONF en 2010 pour répondre à des problématiques de traitement de données LiDAR issues d'inventaires forestiers. Malheureusement le temps nécessaire à la compréhension de ce logiciel, ne m'a pas permis d'aller au bout du travail de segmentation avec ce logiciel. La suite du travail de segmentation automatique est donc concentrée sur les méthodes implémentées dans R.

Tableau 2. Description des fonctions fournies dans R pour délimiter de manière automatique les couronnes des arbres sur des données issues de la télédétection. CHM correspond au Modèle Numérique de Surface (ou *Crown Height Model*). RVB correspond à une orthophotographie en couleur (RVB pour *Rouge Vert Bleu*).

Nom de la fonction	<i>itcIMG</i>	<i>dalponte2016</i>	<i>li2012</i>	<i>silva2016</i>	<i>watershed</i>	<i>mcwatershed</i>
Auteur(s) de l'algorithme	(Dalponte et al. 2015)	(Dalponte et Coomes 2016)	(Li et al. 2012)	(Silva et al. 2016)		(Meyer et Beucher 1990)
Méthode de segmentation	Region growing	Region growing	Region growing	Region growing	Watershed	MCwatershed
Package R	itcSegment (Dalponte 2018)	lidR (Roussel et al. 2019)	lidR (Roussel et al. 2019)	lidR (Roussel et al. 2019)	lidR (Roussel et al. 2019)	lidR (Roussel et al. 2019)
Fichier(s) d'entrée						
CHM (.tif)	✓ ou	✓		✓	✓	✓
RVB (.tif)	✓					
Nuage de points (.las)		✓	✓	✓	✓	✓
Emplacement des troncs (.shp)		✓		✓		✓

Le principe de la méthode de segmentation *region growing* est de laisser s'étendre une zone autour des troncs, sommets, ou maxima locaux, puis d'arrêter l'extension lorsqu'une différence de hauteur significative est trouvée, qui correspond alors à la limite du houppier d'un arbre. La méthode *watershed* est basée sur un principe similaire à celui de la méthode *region growing*. Son algorithme modélise l'écoulement d'un liquide dans les niveaux de gris de sa topographie inversée (le haut des arbres formant des creux et les limites des houppiers formant des lignes de niveaux plus hauts). Et pour finir la méthode *MCwatershed* (pour *Marker-Controlled watershed*) est développée autour du même algorithme agrémenté par le fichier d'emplacement des troncs des arbres à segmenter. Pour distinguer les couronnes des arbres à segmenter sans utiliser de fichiers contenant l'emplacement des troncs, les algorithmes recherchent des maxima locaux situés dans des fenêtres de recherche de taille spécifiée.

Les six algorithmes implémentés dans R ont été évalués sur le carré central de la parcelle 1 ouest, en testant à chaque fois tous les paramètres de leur fonction afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles. Ensuite les résultats de segmentation ont été comparés visuellement à la segmentation du même carré réalisée à la main sur QGIS.

Les orthophotographies et les MNS ont été traités sur le système d'information géographique (SIG) QGIS versions 3.4.4-Madeira sur Windows et 3.6.3-Noosa sur Linux, et les nuages de points sont affichés sur Quick Terrain Reader version 8.0.7.2 et Displaz version 0.4.0-7. R avec l'interface Rstudio version 1.2.1268 sous Linux a été utilisé pour réaliser les segmentations automatiques, avec les packages *itcSegment* (Dalponte, 2018), *lidR* (Roussel et al. 2019), *rlas* (Roussel et al. 2019), *raster* (Hijmans et al., 2019), *maptools*, *rgeos*, et *rgdal* (Roger et al., 2019).

2.3.4. Méthode de segmentation manuelle

Les méthodes de segmentation automatique des couronnes des arbres n'ont pas abouti à de bons résultats, la délimitation manuelle de 754 arbres a donc été effectuée à travers les 36ha sur QGIS. Les nuages de points et les MNS produits avec les données d'imagerie de ces parcelles ont aidé à la réalisation de ce travail, et la position relative des troncs par rapport aux couronnes visibles sur les images en a soutenu l'aboutissement. Seules les couronnes bien distinctes les unes des autres ont pu être segmentées.

2.4. Comparaison des surfaces de couronnes mesurées au sol et sur les images de drone

172 arbres dont les couronnes ont été segmentées comme décrit précédemment, ont été sélectionnés par Grace Loubota Panzou en 2018 pour être évalués au sol. La technique de la projection horizontale au sol des houppiers de ces arbres a permis d'estimer la longueur de quatre rayons de leur couronne suivant les directions cardinales nord, sud, est, ouest (Panzou 2018). Les codes de Dawkins ont également été évalués sur ces arbres par Grace Loubota Panzou comme unique opérateur des estimations. Les mesures de la taille des couronnes de ces arbres prises au sol et sur les images de drone ont donc pu être comparées. Par ailleurs, ce travail a été comparé à une étude similaire réalisée en 2016 sur les données du site expérimental de Yoko en République Démocratique du Congo.

2.5. Modèles et tests statistiques

2.5.1. Présentation des modèles de régression linéaires

Les modèles linéaires tentent d'expliquer la variation d'une variable par une combinaison linéaire de variables explicatives qualitatives ou quantitatives. Pour comparer les modèles statistiques, j'ai choisi d'utiliser le critère d'information bayésien (BIC) car il dépend à la fois de la vraisemblance du modèle (ce que ne fait pas le coefficient de détermination multiple R^2), du nombre de paramètres du modèle, et du nombre d'observations (ce que ne fait pas le critère d'information d'Akaike AIC). Il permet aussi de sélectionner les variables explicatives statistiquement significatives (Ripley 2003). Un modèle sera préférable à un autre lorsque son BIC sera plus petit (Bertrand et Maumy 2008). Les modèles linéaires sont adaptés lorsque la variable à expliquer et les variables qui l'expliquent présentent une relation linéaire constante, et si les erreurs résiduelles sont *identiquement et indépendamment distribuée* (i.i.d.). Pour être en mesure d'effectuer les tests statistiques usuels de significativité des variables explicatives, il faut de plus que les erreurs résiduelles suivent une loi gaussienne de moyenne nulle et de variance constante.

Le seuil de significativité des p-values des tests statistiques est fixé à 5 %.

2.5.2. L'accroissement diamétrique : variable à expliquer

La variable à expliquer dans cette étude est l'accroissement diamétrique. Il est calculé en cm/an grâce aux données d'inventaires des DHP de 2015 et de 2017, et transformés en $\log(x+1)$ pour

avoir des valeurs plus homogènes et non négatives. Les modèles linéaires expliquant cette variable sont de la forme :

$$Y \approx \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_n * X_n + \varepsilon$$

avec : Y , la variable expliquée, l'accroissement diamétrique

β_0 , l'intercept des modèles

β_1 à β_n , les coefficients de pente des variables explicatives

X_1 à X_n , les variables explicatives

ε , l'erreur résiduelle des modèles

La surface éclairée des couronnes segmentée sur les images de drone ainsi que les codes de Dawkins évalués au sol sont comparés en tant que variables explicatives de l'accroissement diamétrique dans deux modèles. Ces modèles sont formés à partir du jeu de données de 172 arbres dont les couronnes ont été segmentées par photogrammétrie et dont les codes de Dawkins ont été relevés au sol par Grace Loubota Panzou.

Ensuite, les variables mesurées sur le terrain de diamètre du tronc et de code de Dawkins sont comparées à la surface éclairée segmentée et aux espèces reconnaissables sur les images de drone, dans deux modèles expliquant l'accroissement, avec 32 individus.

Et pour finir, des modèles de croissance impliquant les variables explicatives de surface éclairée segmentée, DHP, et tempérament (héliophile, héliophile non-pionnière, ou sciaphile) sont créés avec les données de 724 arbres.

Le logiciel utilisé pour les modèles et tests statistiques est R avec l'interface Rstudio version 1.2.1268 sous Linux et version 1.1.463 sous Windows. Les packages utilisés sont *sf* (Edzer et al., 2019) pour créer mes tableaux de données, *lmtree* (Torsten et al., 2019) pour les modèles linéaires, *multcomp* (Torsten et al., 2019) pour certains tests, *ggplot2* (Hadley et al., 2019) pour les graphiques, et *GGally* (Barret et al., 2019) pour vérifier graphiquement quelques conditions des modèles.

3. RESULTATS

3.1. Analyse de la segmentation des couronnes sur les images de drone

3.1.1 Segmentation des couronnes par les méthodes automatiques

La figure 4 montre les résultats de segmentation issus des six algorithmes de segmentation automatique implémentés dans R. Ils ont tous été exécutés sur le carré central de 1ha de la parcelle

1 du bloc ouest, et ils sont comparés au même carré dont la segmentation a été réalisée à la main sur QGIS (Figure 5).

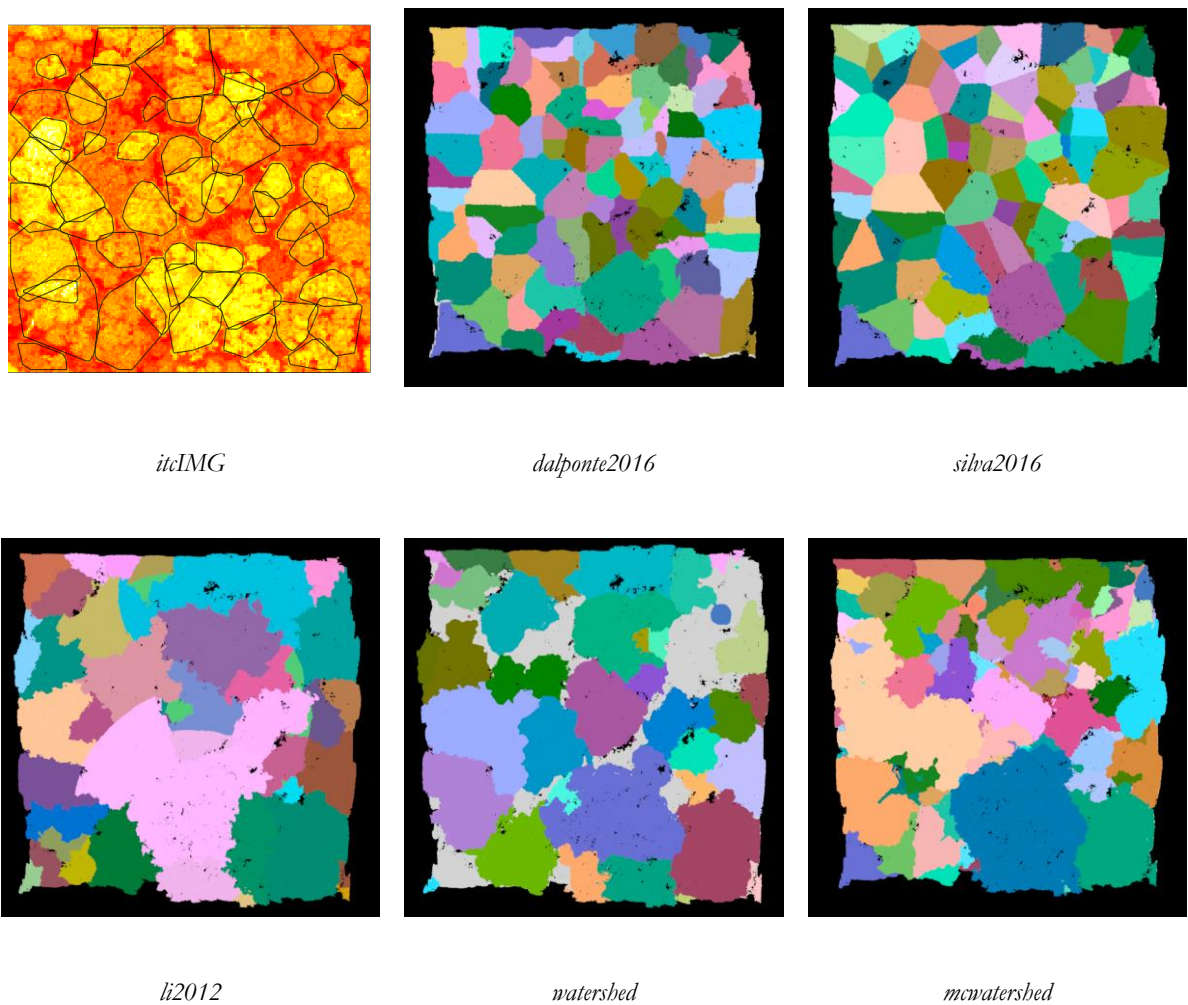


Figure 4 : Représentation des segmentations réalisées par les algorithmes implémentés dans les packages R *itcSegment* (première photo en haut à gauche) utilisant l'orthophotographie et *lidR* (cinq autres photos) utilisant le nuage de points. La résolution de la première photographie est de 0.5m, les autres photos sont des captures d'écran des nuages de points issus des algorithmes de segmentation, la taille de leurs points est de 0.05m. Chaque méthode est nommée par le nom de la fonction qui la définit dans R.

D'une part, les méthodes *itcIMG*, *dalponte2016* et *silva2016* montrées sur le haut de la figure 4, révèlent des polygones représentant les couronnes segmentées qui ont des côtés relativement lisses. Sur ces premiers résultats, la taille de certaines couronnes de petite taille est bien estimée. D'un autre côté, les méthodes *li2012*, *watershed* et *mcwatershed* délimitent des polygones dont les côtés épousent bien la forme du feuillage des arbres, mais qui sont trop grands par rapport à la taille normale des couronnes, sauf pour certaines couronnes de grande taille.

La méthode *watershed* est celle qui génère les polygones les plus similaires aux couronnes segmentées à la main sur QGIS, suivie de la méthode *mcwatershed*. Malheureusement elles ne sont pas assez fiables pour que je les utilise dans la suite de mes analyses car elles délimitent un nombre d'arbres trop inférieur à ceux visibles sur les images, et car les couronnes ne sont pas tout à fait bien délimitées.

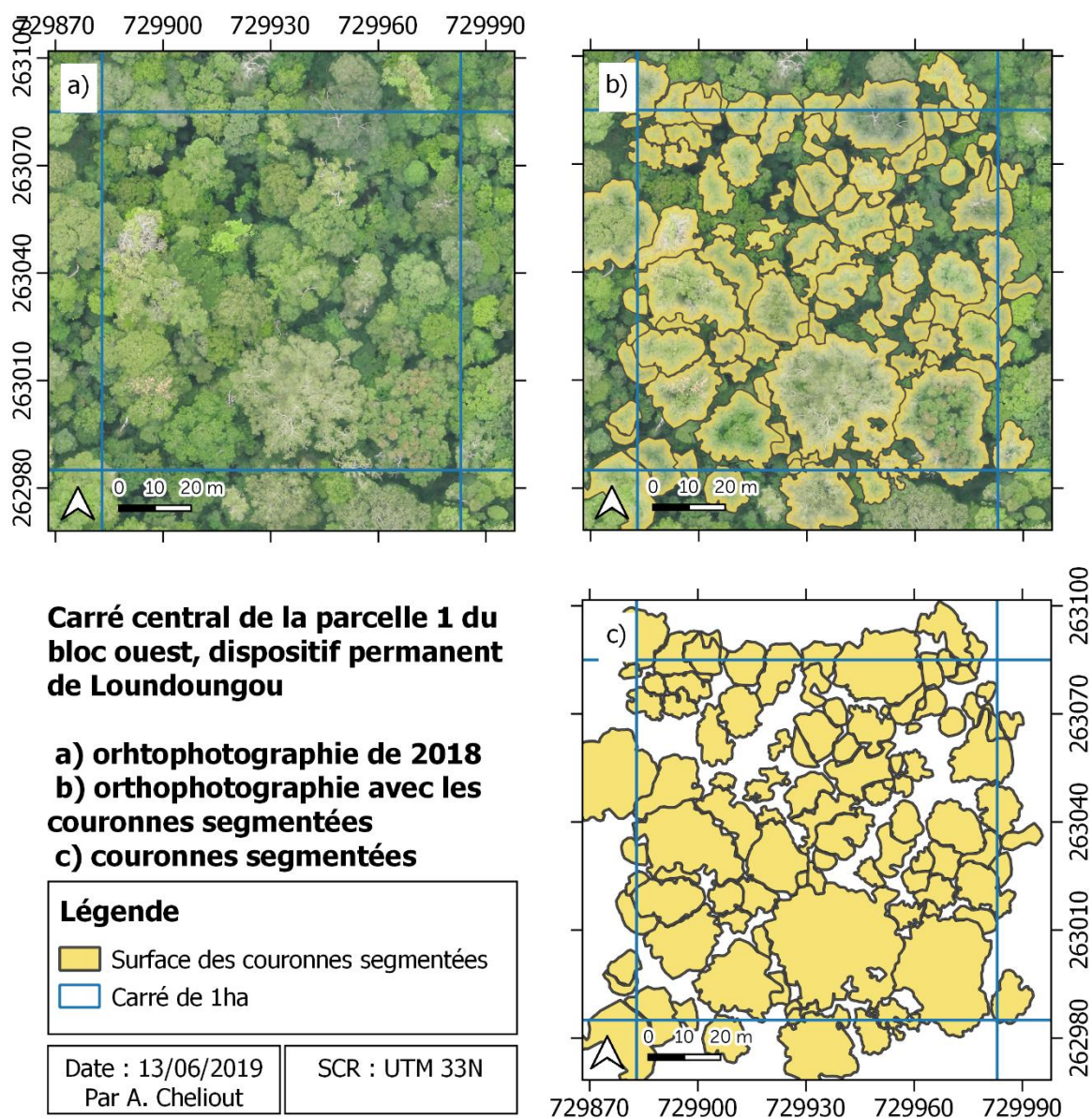


Figure 5 : Représentation de l'orthophotographie de 2018 du bloc 1 (a et b) centré sur le carré central de la parcelle 1 du bloc ouest, avec les couronnes segmentées à la main sur QGIS (b et c)

3.1.2. Segmentation manuelle des couronnes sur tout le dispositif

Au total, 754 couronnes ont été segmentées sur les 36ha. Elles représentent 8% de l'effectif total des arbres de ce site d'étude, 37% de la surface du couvert, et 42% de la surface terrière qui est la surface latérale des troncs estimée par les mesures de diamètre. Les arbres dont la couronne a été délimitée, ont pour 6.7% d'entre eux des diamètres de tronc inférieurs à 30cm. Ces arbres appartiennent à 113 espèces différentes, ce qui représente 47% de la diversité spécifique du site. Dans ces 113 espèces, 42% sont tolérantes à l'ombrage, 41% sont héliophiles non-pionnières, et 17% sont pionnières (Annexe 2). Les espèces les plus représentées sont *Gilbertiodendron deweveri* (DE WILD.) J. LEONARD (n = 69), *Petersianthus macrocarpus* (P. BEAUV.) LIBEN (n = 63) et *Manilkara mabokeensis* AUBREV. (n = 45). Avec *Celtis tessmannii* RENDLE (n = 22), ce sont les quatre espèces que l'on peut facilement différencier sur les photos.

3.1.3. Comparaison entre les mesures de la taille des couronnes faites au sol et sur les images

a) Relation entre la surface éclairée des couronnes mesurée par photogrammétrie et les mesures faites au sol sur le site de Loundoungou

Les surfaces éclairées des couronnes mesurées sur les images de drone sont significativement différentes de celles estimées à partir du sol (test des moyennes : p-value = 6.78e-3), avec des couronnes en moyenne plus grandes sur les images qu'au sol. La relation entre ces deux mesures de surface de couronnes est montrée sur la figure 6. Son équation est :

$$Sfc = 1.041 * Sfc.S + 18.393$$

avec Sfc , la surface segmentée sur QGIS en 2019 sur les images de 2018 par moi-même, en m²

$Sfc.S$, la surface estimée par la projection des rayons dans les quatre directions cardinales pris au sol en 2018 par G. Loubota Panzou, en m²

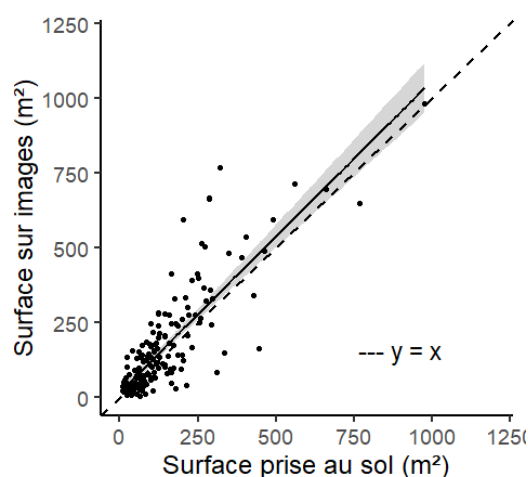


Figure 6 : Relation entre les surfaces des couronnes segmentées par photogrammétrie sur les images de 2018 et celles issues des mesures au sol de quatre rayons en 2018

Cette équation a un intercept non significativement différent de 0 ($p\text{-value} = 0,0605$), mais le coefficient de pente est significativement différent de 1 ($p\text{-value} = 9,44\text{e-}7$). Cela nous indique que la relation entre les deux mesures de surfaces des couronnes est différente de la droite $y = x$, et donc qu'elles sont significativement différentes.

b) Existe-t-il une relation entre les codes de Dawkins et l'écart entre les deux mesures de taille de couronne ?

La position des arbres dans la canopée a une influence probable sur l'écart entre les mesures de surface de couronnes issues des données de drone et celles des données du sol. En effet, les arbres les plus hauts doivent être difficilement visibles du sol, comme le postulent (Gourlet-Fleury 1998 ; Ndamiyehe 2016), donc leur couronne doit être sous-estimée au sol. En revanche sur les images seule la partie éclairée des couronnes est visible, donc les arbres dont la couronne n'est pas totalement émergente auront des surfaces sous-estimées. Le code de Dawkins qui reflète la position des arbres dans la canopée a alors été comparé à cet écart de mesure (Figure 7). Cet écart a été calculé de façon à ce qu'il soit positif lorsque les surfaces des données de drone sont plus grandes que celles des données de terrain.

Les différents niveaux du code de Dawkins ne présentent pas d'effet sur cet écart (analyse de variance : $p\text{-value} = 0.0714$). Néanmoins un test des moyennes par paire nous indique qu'il y a une différence significative d'écart entre les arbres de code 3 et 5 ($p\text{-value} = 0.019$) avec des écarts en moyenne de $-1,502 \text{ m}^2$ pour les arbres de code 3 et de $43,418 \text{ m}^2$ pour les arbres de code 5.

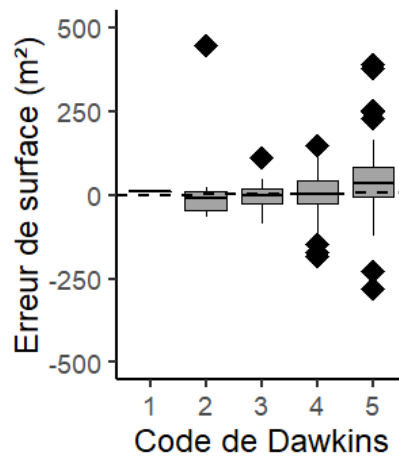


Figure 7 : Relation entre les écarts de mesures des surfaces de couronnes (surface segmentée sur les images de drone – surface estimée par les mesures de terrain) et les codes de Dawkins.

La couronne d'un arbre de code de Dawkins 2 a été estimée à 768.9m² alors qu'au sol elle est de 320.3m², cette observation représente l'écart le plus important entre les deux mesures de surfaces des couronnes. Sans cet individu, le code de Dawkins a un effet sur l'écart entre les deux mesures de la surface des couronnes (analyse de variance : p-value = 0.0202).

c) Comparaison des relations établies sur les sites de Loundoungou et de Yoko entre les mesures de taille de couronnes issues des images de drone et celles estimées au sol

La relation entre les mesures de taille des couronnes segmentées sur les images de drone et celles issues du terrain est comparée à la relation similaire réalisée avec les données du site de Yoko en République Démocratique du Congo. Ce travail a abouti aux relations suivantes concernant les mesures de terrain de 2008 et les images de 2014 (première équation) et les mesures de terrain et les images de 2016 (deuxième équation) :

$$y_{Y14} = 0.77099 * x_{Y14} + 5.99365$$

$$y_{Y16} = 0.7664 * x_{Y16} + 6.67424$$

avec y , le diamètre des couronnes mesuré sur le terrain à Yoko en 2008 et de 2016

x , le diamètre des couronnes mesuré sur les images de Yoko de 2014 et de 2016

Pour le site de Loundoungou, les couronnes segmentées sur les images de 2018 et les mesures prises au sol en 2018 montrent la relation :

$$y_L = 0.72019 * x_L + 2.74662$$

avec y , le diamètre des couronnes mesuré sur le terrain à Loundoungou en 2018

x , le diamètre des couronnes mesuré sur les images de Loundoungou de 2018

Ces relations sont représentées dans les graphiques de la Figure 8.

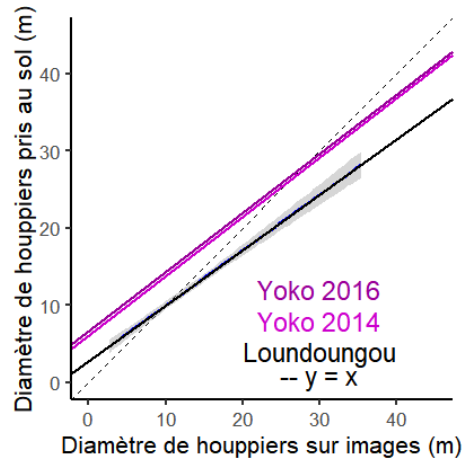


Figure 8 : Représentation des relations entre les diamètres des houppiers issus des mesures faites au sol sur le terrain et ceux issus des mesures faites sur les images par photogrammétrie pour les sites de Loundoungou (images et mesures de 2018) et Yoko (images de 2014 et 2016 et mesures de terrain de 2008 et 2016).

Les deux sites montrent des mesures de taille de couronnes plus grandes sur les images qu'au sol (intercept positif pour les trois relations). Par ailleurs, la corrélation entre les mesures prises sur les images et les mesures faites au sol est moins forte à Loundoungou ($\rho = 0.80$) qu'à Yoko pour les données de 2008 et 2014 ($\rho = 0.87$) et pour celles de 2016 ($\rho = 0.91$).

Pour savoir si les relations des deux sites sont équivalentes, en possédant les données du site de Loundoungou, le pouvoir prédictif des modèles de Yoko est testé avec les données de Loundoungou. Pour cela, la variable prédictive *diamètre sur image de Loundoungou* est transposée aux modèles de Yoko pour trouver les valeurs prédites par ces modèles du diamètre au sol :

$$\hat{y}_{Y14} = 0.77099 * x_L + 5.99365$$

$$\hat{y}_{Y16} = 0.7664 * x_L + 6.67424$$

Les valeurs prédites par les modèles de Yoko sont significativement différentes des valeurs observées à Loundoungou (tests des moyennes : p-value = 4.463e-12 pour le modèle de 2014 et p-value = 3.921e-15 pour le modèle de 2016).

3.2. Modélisation de l'accroissement diamétrique

3.2.1. Relation entre l'accroissement diamétrique et la surface éclairée des couronnes des arbres estimée à partir d'un drone

Il existe une relation positive entre l'accroissement diamétrique et la surface éclairée des couronnes des arbres pour toutes les espèces sélectionnées ($\rho = 0,248$; $p\text{-value} = 4.912e-12$) (figure 9a). En ce qui concerne les trois espèces dont on a plus de 30 individus, ce lien est significatif et plus fort pour *M. maboakeensis* ($\rho = 0,352$; $p\text{-value}=0,0182$) (figure 9b), mais il n'est pas significatif pour *G. demevrei* ($\rho = 0,138$; $p\text{-value}=0,259$), ni pour *P. macrocarpus* ($\rho = 0,212$; $p\text{-value}=0,0957$).

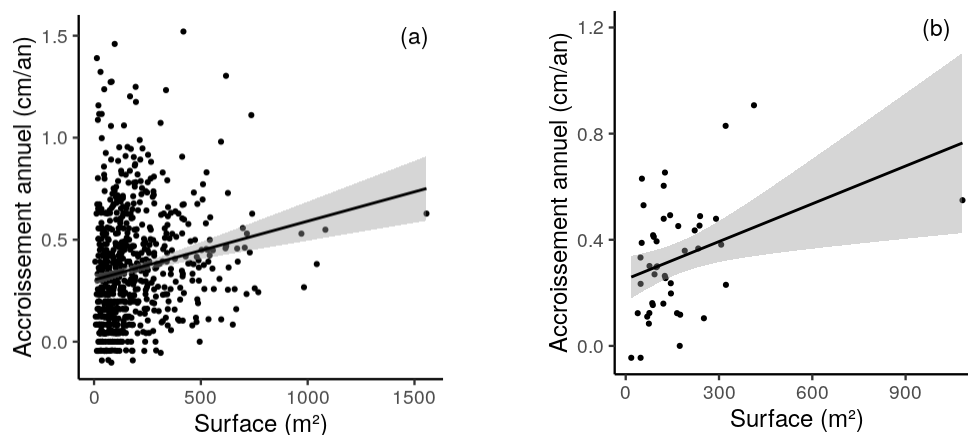


Figure 9. Accroissement diamétrique moyen des arbres étudiés entre 2015 et 2017 en fonction de la surface éclairée de la couronne calculée par photogrammétrie sur les images de drone de 2018. Les données en (a) concernent 754 individus toutes espèces confondues et les données en (b) concernent les 45 individus de l'espèce *M. maboakeensis*.

3.2.2. Comparaison des codes de Dawkins et de la surface éclairée des couronnes pour l'explication de l'accroissement diamétrique

La croissance des arbres en forêt tropicale humide est majoritairement liée à la quantité de lumière perçue par le houppier (Baker, Swaine, et Burslem 2003 ; Herwitz, Slye, et Turton 2000). Le code de Dawkins est un bon indicateur de cette quantité au sol, et la surface éclairée de la couronne permet d'estimer cette quantité par le biais d'images de télédétection par drone. Nous voulons savoir si la surface éclairée des couronnes explique mieux l'accroissement diamétrique que le code de Dawkins. Deux modèles expliquant l'accroissement diamétrique avec d'une part le DHP et le code de Dawkins, et d'autre part avec le DHP et la surface éclairée des couronnes ont donc été

comparés (Tableau 3). Le meilleur modèle pour expliquer l'accroissement diamétrique suivant le BIC est celui se basant sur la surface éclairée des couronnes segmentée sur les images de drone.

Tableau 3. Synthèse des paramètres des modèles expliquant le logarithme de l'accroissement diamétrique (Acc) en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (Dhp) et du code de Dawkins ($Code$) en première ligne, et en fonction du DHP et de la surface éclairée des couronnes segmentées sur les images (Sfc) en seconde ligne. Les codes de Dawkins 1 et 2 ont été rassemblés en *daw12* car leurs effectifs étaient trop faibles. L'intercept n'est pas présent dans le premier modèle car en soustrayant de 1 l'écriture du modèle, l'effet de la première modalité de la variable explicative qualitative apparaît et le remplace. "---" : absence de variable dans le modèle concerné. Significativité statistique aux risques : 0,05 : "*", 0,01 : "**", 0,001 : "***", non significativité : "ns".

	Intercept	Dhp	Sfc	daw12	daw3	daw4	daw5	BIC	n
<i>Acc vs Dhp + Code</i>	---	-0,00197*	---	0,400***	0,486***	0,430***	0,485***	92,6	172
<i>Acc vs Dhp + Sfc</i>	0,601***	-0,00733***	0,00110***	---	---	---	---	61,3	172

3.2.3. Comparaison de l'explication de l'accroissement par les données de drone *surface éclairée et espèces reconnaissables*, et par les données du sol *Dhp et codes de Dawkins*

Les images de drone ont permis de mesurer la surface des couronnes en contact avec la lumière, et la détermination botanique de quatre espèces présentées dans le Tableau 4.

Pour ces arbres, l'accroissement diamétrique est expliqué par un effet espèce (p-value = 0.0237), il y a une différence d'accroissement entre les espèces *G. deweveri* et *C. tessmannii* (p-value = 0.0120). Dans la suite, j'ai alors regroupé les espèces *G. deweveri* et *M. maboensis*, toutes les deux tolérantes à l'ombrage, dans un premier groupe d'espèces, et les espèces *C. tessmannii* et *P. macrocarpus*, héliophiles, dans un second groupe.

Le meilleur modèle pour expliquer l'accroissement est celui généré par les variables issues des images de drone (Tableau 5).

Tableau 4. Informations et photographies des quatre espèces reconnaissables sur les images de drone à une résolution de 0.051m pixel⁻¹. Les photographies sont issues de l'orthophotographie du bloc ouest de 2018.

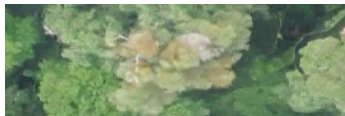
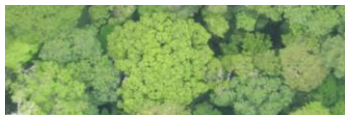
Nom latin	Tempérament	Effectif	Photographie
<i>Gilbertiodendron dewevrei</i> (DE WILD.) J. LEONARD	Tolérante à l'ombrage	n = 69	
<i>Petersianthus macrocarpus</i> (P. BEAUV.) LIBEN	Très héliophile non-pionnière	n = 63	
<i>Manilkara mabokeensis</i> AUBREV.	Tolérante à l'ombrage	n = 45	
<i>Celtis tessmannii</i> RENDLE	Héliophile non-pionnière	n = 22	

Tableau 5. Synthèse des paramètres des modèles expliquant l'accroissement avec les variables issues des données de drone (*Sfc* pour la surface éclairée, *Gd-Mm* pour le premier groupe d'espèces tolérantes à l'ombrage, et *Ct-Pm* pour le deuxième groupe d'espèces héliophiles non-pionnières), et avec les variables issues des mesures de terrain (*Dhp* pour le diamètre à hauteur de poitrine, *daw123* pour les codes de Dawkins 1, 2 et 3 regroupés car en trop faible effectif, *daw4* pour le code 4 et *daw5* pour le code 5). Les intercepts ne sont pas présents car en soustrayant de 1 l'écriture des modèles, l'effet de la première modalité de la variable explicative qualitative apparait et remplace l'intercept. "---" : absence de variable dans le modèle concerné. Significativité statistique aux risques : 0,05 : "*", 0,01 : "**", 0,001 : "***", non significativité : "ns".

	Variables issues des images de drone			Variables issues des mesures de terrain				BIC	n
	Sfc	Gd-Mm	Ct-Pm	Dhp	daw123	daw4	daw5		
<i>Acc vs variables du drone</i>	ns	ns	0,334***	---	---	---	---	25,1	32
<i>Acc vs variables de terrain</i>	---	---	---	ns	0,543*	0,360*	0,426*	29,8	32

3.2.4. Explication de l'accroissement diamétrique avec la combinaison des variables issues du drone et du sol

Les modèles créés expliquent l'accroissement diamétrique en fonction des variables quantitatives *surface éclairée de la couronne* issues de la segmentation par photogrammétrie et *diamètre à hauteur de poitrine* ; et qualitative *tempérament* : héliophile non-pionnière (NPLD de l'anglais *non-pioneer light-demanding*), pionnière (*P*), et tolérante à l'ombrage (*SB* pour *shade bearer*) (Tableau 5). Le modèle qui a les meilleures variables explicatives est le modèle M4, il est de la forme :

$$Acc = 6.25e^{(-4)} * Sfc - 4.16e^{(-3)} * Dhp + 0,513 * NPLD + 1.076 * P + 0,257 * SB - 6.44e^{(-3)} * Dhp:P + 3.04e^{(-3)} * Dhp:SB$$

avec : *Acc*, le logarithme de l'accroissement diamétrique calculé avec les DHP de 2015 et 2017

Sfc, la surface des couronnes segmentées sur les images de drone

Dhp, le DHP mesuré en 2017

NPLD, *P* et *SB* les trois tempéraments : héliophile non-pionnière, héliophile, et tolérante à l'ombrage

L'accroissement diamétrique des arbres de notre site d'étude est légèrement corrélé positivement à la surface de la couronne éclairée, et légèrement corrélé négativement au DHP. Par rapport au tempérament, l'accroissement diamétrique est en moyenne le plus élevé pour les espèces pionnières (*P*), un peu moins élevé pour les espèces héliophiles non-pionnières (*NPLD*), et encore moins élevé pour les espèces tolérantes à l'ombrage (*SB*). Concernant les interactions entre le DHP et le tempérament, l'accroissement diamétrique diminue quand le DHP des espèces pionnières augmente et il augmente avec le DHP des espèces tolérantes à l'ombrage (*SB*).

Tableau 5. Synthèse des paramètres des modèles expliquant le logarithme de l'accroissement diamétrique en fonction de deux variables quantitatives (*Sfc* pour la surface éclairée mesurée par photogrammétrie et *Dhp* pour le diamètre à hauteur de poitrine) et d'une variable qualitative (tempérament *NPLD* pour *non-pionneer light-demanding*, *P* pour *pionneer*, et *SB* pour *shade bearer*). M1 est le modèle de base avec les trois variables. M2 intègre les variables du M1 avec l'interaction entre la surface et de DHP. M3 intègre le DHP, les tempéraments et les interactions entre la surface et les tempéraments. Et M4 est le meilleur modèle, il intègre les variables du M1 avec les interactions entre le DHP et les tempéraments.

	Sfc	Dhp	NPLD	P	SB	Sfc:Dhp	Sfc:NPLD	Sfc:P	Sfc:SB	Dhp:P	Dhp:SB	BIC	n
M1	6.24e-4***	-3.51e-3***	0,469***	0,697***	0,404***	---	---	---	---	---	---	74,2	754
M2	1.04e-3***	---	0,268***	0,523***	0,209***	-6.92e-6***	---	---	---	---	---	98,9	754
M3	---	-3.62e-3***	0,510***	0,794***	0,354***	---	4.71e-4***	ns	9.88e-4***	---	---	60,5	754
M4	6.25e-4***	-4.16e-3***	0,513***	1.076***	0,257***	---	---	---	---	-6.44e-3***	3.04e-3***	28,9	754

4. DISCUSSION

4.1. Remarques et inconvénients sur la segmentation des couronnes sur les images de drone

On a vu que les surfaces de couronnes segmentées de façon manuelle sur les images de drone étaient différentes et supérieures à celles estimées sur le terrain par la technique de projection horizontale du houppier.

Nos résultats ont montré que 93% des arbres qui ont atteint la canopée et qui ont été étudiés sur les images ont un diamètre de tronc supérieur à 30cm. Ce constat est corrélé à celui de l'étude de (Ndamiyehe 2016) qui prédit que seul les arbres de plus de 30cm de DHP sont visibles sur les images.

La reconnaissance des espèces sur les images de la canopée est un enjeu actuel des études forestières réalisées avec les drones. Lors de cette étude, quatre espèces ont pu être discernées directement sur les images : *Gilbertiodendron dewevrei*, *Petersianthus macrocarpus*, *Manilkara mabokeensis* et *Celtis tessmannii*. C'est un faible effectif par rapport au nombre total d'espèces présentes sur le site dont la couronne a atteint la canopée et a été segmentée ($n/n_{\text{tot}} = 4/113$), mais cela représente tout de même 10.5% des espèces qui ont plus de cinq individus.

Les erreurs de géolocalisation des ortho-images et des fichiers contenant l'emplacement des troncs constituent la principale difficulté pour segmenter les couronnes des arbres sur les images de drone. Ce décalage a pu atteindre 15m dans notre étude entre le centre approximatif des couronnes et la localisation du tronc.

De plus, la présence de lianes représente un biais important pour la mesure de la surface des couronnes sur les images de drone. En effet, les arbres que j'ai segmentés sont plus sujets à porter des lianes car ils ont des troncs en majorité supérieurs à 20cm de diamètre (Cox et al. 2019). Certaines lianes n'étaient pas prises en compte dans la surface des couronnes, mais celles dont le feuillage était entremêlé aux branchages des arbres ne pouvaient pas être dissociées.

De plus, les surfaces segmentées sur les images de drone reflètent la part éclairée des couronnes, mais ce n'est pas une mesure de la surface totale de celles-ci pour les arbres qui ne sont pas totalement dominants.

Aussi, seuls les arbres de code de Dawkins 3, 4 et 5 peuvent être visibles sur les images de drones car ce sont ceux qui ont atteint la canopée, la télédétection de drone ne peut donc pas donner d'informations sur les arbres de code 1 et 2. Il est vraisemblable que les neuf couronnes segmentées

par photogrammétrie qui ont été attribuées à des arbres de code 1 et 2 n'ont donc pas été correctement attribuées, ou que leurs codes n'ont pas été correctement évalués sur le terrain.

4.2. La segmentation automatique : des méthodes qui posent problème

Les six méthodes de segmentation automatiques basées sur des algorithmes implémentés dans R n'ont pas donné de résultats convenables. Celles qui utilisent l'emplacement des troncs pour différencier les arbres ne sont pas pertinentes pour segmenter les couronnes d'arbres de forêts naturelles car leurs polygones sont centrés sur ces points alors les troncs des arbres sont rarement placés au centre des couronnes. Les autres ont du mal à différencier les couronnes adjacentes.

Le logiciel Computree de traitement de nuages de points pour les analyses forestières est très prometteur pour segmenter les couronnes des arbres en forêt tropicale, car en plus de proposer différents algorithmes de segmentation déjà disponibles sur R, il possède des méthodes de segmentation basées sur l'analyse de texture et de couleur. Ce logiciel mutualise plusieurs travaux sur les forêts, il est libre et gratuit (Piboule et al. 2013). Je l'ai expérimenté en début de stage, mais ayant rencontré certaines difficultés dans son utilisation, j'ai fait le choix de poursuivre le travail manuellement.

4.3. La relation entre les mesures de taille de couronne faites au sol et sur les images de drone n'est pas équivalente à celle établie sur un autre site expérimental

Pur estimer la quantité de lumière perçue par les houppiers, qui est un facteur important pour la croissance des arbres de forêts tropicales (Baker, Swaine, et Burslem 2003 ; Herwitz, Slye, et Turton 2000), des estimations de la taille des couronnes ont été effectuées, au sol et sur les images de drones, sur deux sites différents (Loundoungou en République du Congo, et Yoko en République Démocratique du Congo). Au sol, la projection horizontale des houppiers a permis de calculer les rayons des couronnes, quatre à Loundoungou et huit à Yoko. Sur les images, c'est la partie éclairée des couronnes qui a été segmentée. Les personnes ayant pris des mesures au sol ont appuyé l'intérêt des drones à remplacer ses mesures chronophages et compliquées à acquérir dues à une mauvaise vision des couronnes depuis le sol (Ndamiyehe, 2016 ; Panzou 2018).

A Loundoungou comme à Yoko, les mesures de la taille des couronnes issues des images de drone sont plus grandes que les mesures estimées au sol. Ce résultat est sûrement dû à plusieurs facteurs.

Les mesures de taille des couronnes au sol sont issues de la projection des rayons des couronnes supposant qu'elles sont circulaires. Aussi, il faut dire que les conditions de travail de terrain en forêt tropicale sont assez compliquées à cause de la densité de tiges, ce qui a probablement entraîné les mesures de taille de couronne à être sous-estimées.

Néanmoins l'estimation du diamètre moyen des couronnes est meilleure à Yoko qu'à Loundougou. Cela peut être lié au fait que les diamètres moyens des couronnes à Yoko pris au sol sont issus des mesures de la projection de huit rayons, alors qu'à Loundougou seulement quatre rayons ont été mesurés. Cela montre que l'effort de mesure d'un nombre élevé de rayons de couronnes pris au sol semble efficace pour mieux estimer la taille des couronnes.

4.4. Les résultats du modèle de croissance, toutes variables confondues, confirment les résultats des études antérieures

Le meilleur modèle créé pour expliquer l'accroissement diamétrique des arbres du site de Loundougou au Nord Congo utilise les données de surface éclairée des couronnes segmentée par photogrammétrie, le diamètre du tronc à hauteur de poitrine (DHP), les tempéraments des espèces (pionnières, héliophiles non-pionnières, et tolérantes à l'ombrage), et l'interaction entre le DHP et les tempéraments. Il est de la forme :

$$\text{Accroissement} = a + b0 * \text{Surface} + b1 * \text{Dhp} + b2 * \text{Tempérament} + b3 * \text{Dhp:Tempérament}$$

Les résultats montrent que l'accroissement diamétrique est faiblement lié à la surface éclairée des couronnes et au diamètre du tronc, de manière négative pour ce dernier. Par rapport aux tempéraments, l'accroissement diamétrique est le plus élevé chez les espèces pionnières, puis il est moins bon chez les espèces héliophiles non-pionnières, et encore moins bon chez les espèces tolérantes à l'ombrage.

Ces résultats s'accordent totalement avec ceux de Baker, Swaine, et Burslem (2003) établis sur des mesures réalisées au Ghana en forêt tropicale « asaisonnière » semi-décidu. Ces auteurs révèlent également que le taux de croissance des espèces pionnières est rapide comparé au taux de croissance plus lent des espèces tolérantes à l'ombrage. Concernant les interactions entre le DHP et le tempérament, les résultats confirment les travaux de Houllier (1995) pour les espèces pionnières : leur vitesse de croissance diminue quand leur diamètre augmente.

4.5. Le remplacement des mesures de terrain par les données de drone : une possibilité à étudier

Les inventaires forestiers en forêts tropicales sont réalisés au sol dans des conditions particulières dues à la densité de végétation et au climat humide (Ndamiyehe, 2016). L'enjeu actuel de la possession des drones pour s'affranchir des mesures de terrain est donc une possibilité qu'il faut étudier.

La quantité de lumière perçue par le houppier est un facteur important pour la croissance des arbres de forêts tropicales (Baker, Swaine, et Burslem 2003 ; Herwitz, Slye, et Turton 2000). Plusieurs manières de l'estimer sont établies, en passant par des mesures au sol, ou plus récemment grâce aux images de télédétection acquises par drone. Nous avons comparé les modèles expliquant l'accroissement diamétrique par les mesures de surface éclairée des couronnes et par l'évaluation des codes de Dawkins, deux indicateurs de la quantité de lumière perçue par les arbres, estimé sur des images de drone pour le premier et au sol pour le deuxième. Nos analyses ont révélé que les modèles créés avec les mesures issues de drone étaient meilleurs que ceux utilisant les mesures évaluées au sol. Cette information nous est donnée par le critère d'information bayésien. Ces modèles comportent toutefois certaines limites. Initialement, les conditions du modèle reliant l'accroissement aux codes de Dawkins n'étaient pas validées pour les 172 arbres qui ont servi aux modèles car les codes n'avaient pas d'effet sur l'accroissement (analyse de variance : $p\text{-value} = 0.587$). De plus les effectifs dans chaque classe de code n'étaient pas homogènes (Annexe 2).

D'autre part, la surface éclairée des couronnes et les espèces reconnaissables regroupées par groupe de tempéraments, variables issues des images de drone, permettent de réaliser de meilleurs modèles de l'accroissement diamétrique que les variables diamètre du tronc et code de Dawkins, issues des mesures de terrain. Néanmoins il faut noter que les modèles produits pour établir cette observation ont été réalisés avec peu d'individus ($n = 32$) et que plusieurs variables n'avaient pas d'effet sur l'accroissement diamétrique, comme la surface éclairée des couronnes, le premier groupe d'espèces, ou le DHP.

Par ailleurs, pour s'affranchir des mesures de terrain, il faudrait considérer une variable à expliquer issue de la photogrammétrie et non issue des relevés au sol comme l'est l'accroissement diamétrique, tiré des mesures de diamètre du tronc. Cette variable pourrait s'appuyer sur le Modèle Numérique de Surface créé à partir des images de drone qui peut procurer une bonne estimation de la hauteur des houppiers dominants.

Toujours est-il que les drones restent des engins chers et fragiles. Leur utilisation pour s'affranchir des mesures de terrain compliquées en forêt tropicale n'est pas à dissocier de cette réalité.

4.6. Comment améliorer la modélisation de l'accroissement diamétrique ?

Lors de cette étude, j'ai utilisé des modèles linéaires pour quantifier l'influence de certaines variables explicatives sur la croissance individuelle. Différentes alternatives de modélisation peuvent être envisagées. La première consisterait à considérer des modèles non linéaires, permettant ainsi de modéliser une relation plus complexe entre l'accroissement et les variables explicatives. Par exemple, les liens non-linéaires de Korf, logistic ou de Gompertz ont été largement employés (Gourlet-Fleury 1992 ; Gourlet-Fleury et Montpied, 1995).

De plus, dans ce travail, les modèles ont été construits sur l'ensemble des observations sans distinction. Or une autre hypothèse serait de supposer que la population appartient à un ensemble de sous-populations, d'accroissements homogènes, et de réponses aux variables explicatives similaires. En effet, (Baker, Swaine, et Burslem 2003) propose une classification fonctionnelle des arbres de son site d'étude selon que leurs croissances soient rapides ou lentes, et il le met en relation avec le tempérament. Ainsi, une extension possible serait les modèles de mélange en régression qui permettent dans une unique procédure de classer les individus dans des groupes selon leurs réponses aux variables explicatives (discussion avec Mortier, 2019).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

www.atibt.org/fr/projet/p3fac/. Consulté le 21/06/2019.

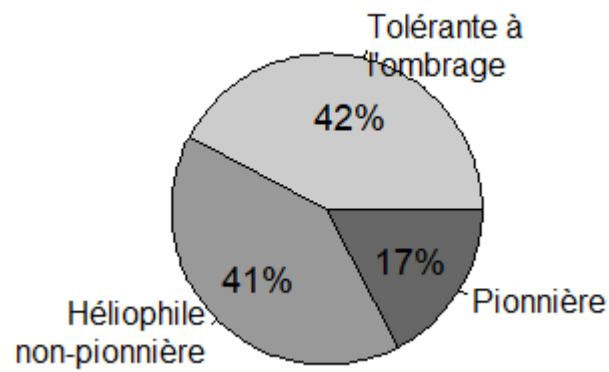
- Baker, Timothy R., Michael D. Swaine, et David F.R.P. Burslem. 2003. « Variation in Tropical Forest Growth Rates: Combined Effects of Functional Group Composition and Resource Availability ». *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 6(1-2): 21-36.
- Bayol, Nicolas et al. « La gestion des forêts et la filière bois en Afrique centrale ». : 20.
- Beer, C. et al. « Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate ». *Science* 329(5993): 834-38.
- Bellassen, Valentin, et Vincent Gitz. 2008. « Reducing Emissions from Deforestation and Degradation in Cameroon — Assessing Costs and Benefits ». *Ecological Economics* 68(1-2): 336-44.
- Bertrand, F. Maumy, M. 2008. « Choix du modèle »
- www.comifac.orf. Consulté le 21/06/2019.
- Coomes, David A. et al. 2017. « Area-Based vs Tree-Centric Approaches to Mapping Forest Carbon in Southeast Asian Forests from Airborne Laser Scanning Data ». *Remote Sensing of Environment* 194: 77-88.
- Cox, Casey J. et al. 2019. « Liana Cover in the Canopies of Rainforest Trees Is Not Predicted by Local Ground-Based Measures ». *Austral Ecology*. <http://doi.wiley.com/10.1111/aec.12746> (19 juin 2019).
- Dalponte, Michele, et David A. Coomes. 2016. « Tree-Centric Mapping of Forest Carbon Density from Airborne Laser Scanning and Hyperspectral Data » éd. David Murrell. *Methods in Ecology and Evolution* 7(10): 1236-45.
- Dalponte, Michele, Francesco Reyes, Kaja Kandare, et Damiano Gianelle. 2015. « Delineation of Individual Tree Crowns from ALS and Hyperspectral Data: A Comparison among Four Methods ». *European Journal of Remote Sensing* 48(1): 365-82.
- Dawkins, H. C. 1963. « The Productivity of Tropical High-Forest Trees and Their Reaction to Controllable Environment ». Ph.D. University of Oxford. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.671389> (21 juin 2019).
- Doumenge, C. Palla, F. Scholte, P. Hiol Hiol, F. Larzillière, A. Bonnet H. Consigny, T. Antonio, M. Bongui L. De Marcken, P. Goussard, JJ. Mamang-Kanga, JB. et al. 2015. « Etat des Aires Protégées 2015 » Aires protégées d'Afrique centrale, état 2015.
- Dupuy, P. Durrieu de Madron, L. Petrucci, Y. 1998. « Sylviculture des peuplements naturels en forêt dense humide africaine ». *BOIS & FORETS DES TROPIQUES* 308(308): 75.
- Durrieu De Madron, Luc et al. 2011. « Estimation de l'impact de différents modes d'exploitation forestière sur les stocks de carbone en Afrique centrale ». *BOIS & FORETS DES TROPIQUES* 308(308): 75.

- Fargeot, C. Forni, E. Nasi, R. « Réflexions sur l'aménagement des forêts de production dans le bassin du Congo. » *BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES*, 2004, N° 281 (3).
- FAVRICHON, Vincent. 1994. « Classification of Guiana forest tree species into functional groups for a model of vegetation dynamic ». <http://hdl.handle.net/2042/54782>.
- Fayolle, Adeline et al. 2014. « A New Insight in the Structure, Composition and Functioning of Central African Moist Forests ». *Forest Ecology and Management* 329: 195-205.
- Ferraz, António, Sassan Saatchi, Clément Mallet, et Victoria Meyer. 2016. « Lidar detection of individual tree size in tropical forests ». *Remote Sensing of Environment* 183: 318-33.
- Fétéké, Fousseni et al. 2015. « MODÉLISER LA CROISSANCE DE QUATRE ESSENCES POUR AMÉLIORER LA GESTION FORESTIÈRE AU CAMEROUN ». *BOIS & FORETS DES TROPIQUES* 325(325): 5.
- Forni E., Rossi V., Gillet J. F., Bénédet F., Cornu G., Freycon V., Zombo I., Mazengue M., Alberny E., Mayinga M., Istace V, Gourlet-Fleury S. 2019. Dispositifs permanents de nouvelle génération pour le suivi de la dynamique forestière 1 en Afrique centrale : bilan en République du Congo
- Freycon, V. 2014. « Caractérisation des sols de Loundoungou et de Mokabi (Congo). Rapport de mission DynAffFor, 2 au 24 avril 2014 ».
- Geist, H. J., & Lambin, E.F. 2001. « What Drives Tropical Deforestation. A meta-analysis of approximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence ». *LUCC International Project Office 2001*.
- « GGally.pdf ». Consulté le 21 juin 2019. <https://cran.r-project.org/web/packages/GGally/GGally.pdf>
- « ggplot2.pdf ». Consulté le 21 juin 2019. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/ggplot2.pdf>.
- Gourlet-Fleury, Sylvie. 1992. « Origines de la structuration spatiale des communautés d'arbres en forêt tropicale : approches multi-échelles en Afrique centrale ». Consulté le 21 juin 2019. <http://www.theses.fr/052509664>.
- Gourlet-Fleury, Sylvie. 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): 623-54.
- Gourlet-Fleury, S. Montpied, P. 1995. « DYNAMIQUE DES PEUPELEMENTS DENSES FORESTIERS EN ZONE TROPICALE HUMIDE : ÉBAUCHE D'UN MODÈLE D'ARBRE À PARACOU (GUYANE FRANÇAISE) ».
- Herwitz, Stanley R., Robert E. Slye, et Stephen M. Turton. 2000. « LONG-TERM SURVIVORSHIP AND CROWN AREA DYNAMICS OF TROPICAL RAIN FOREST CANOPY TREES ». *Ecology* 81(2): 585-97.
- Houllier, F. 1995. « A PROPOS DES MODÈLES DE LA DYNAMIQUE DES PEUPELEMENTS HÉTÉROGÈNES : STRUCTURES, PROCESSUS DÉMOGRAPHIQUES ET MÉCANISMES DE RÉGULATION ». *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, vol. 50, 1995 .

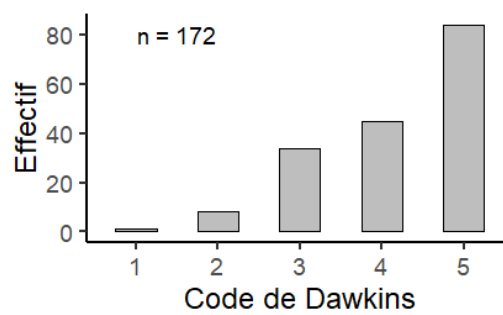
- « itcSegment.pdf ». Consulté le 21 juin 2019. <https://cran.r-project.org/web/packages/itcSegment/itcSegment.pdf>.
- Ke, Yinghai, et Lindi J. Quackenbush. 2011. « A Review of Methods for Automatic Individual Tree-Crown Detection and Delineation from Passive Remote Sensing ». *International Journal of Remote Sensing* 32(17): 4725-47.
- Li, Wenkai, Qinghua Guo, Marek K. Jakubowski, et Maggi Kelly. 2012. « A New Method for Segmenting Individual Trees from the Lidar Point Cloud ». *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 78(1): 75-84.
- « lmtest.pdf ». Consulté le 21 juin 2019. <https://cran.r-project.org/web/packages/lmtest/lmtest.pdf>.
- « lidR.pdf ». Consulté le 21 juin 2019. <https://cran.r-project.org/web/packages/lidR/lidR.pdf>.
- Lisein, Jonathan, Marc Pierrot-Deseilligny, Stéphanie Bonnet, et Philippe Lejeune. 2013. « A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery ». *Forests* 4(4): 922-44.
- Manlay, Dr Raphaël. « Kaçamak 2018 ». : 47.
- « maptools.pdf ». Consulté le 21 juin 2019. <https://cran.r-project.org/web/packages/maptools/maptools.pdf>.
- Marien, JN. Bassaler, N. 2016. « ELEMENTS DE PROSPECTIVE A L'HORIZON 2040 POUR LES ECOSYSTEMES FORESTIERS D'AFRIQUE CENTRALE (EFBC 2040) ».
- Meyer, F., et S. Beucher. 1990. « Morphological segmentation ». *Journal of Visual Communication and Image Representation* 1(1): 21-46.
- Michez, Adrien et al. 2016. « Classification of Riparian Forest Species and Health Condition Using Multi-Temporal and Hyperspatial Imagery from Unmanned Aerial System ». *Environmental Monitoring and Assessment* 188(3). <http://link.springer.com/10.1007/s10661-015-4996-2> (21 juin 2019).
- Mlambo, Reason, Iain Woodhouse, France Gerard, et Karen Anderson. 2017. « Structure from Motion (SfM) Photogrammetry with Drone Data: A Low Cost Method for Monitoring Greenhouse Gas Emissions from Forests in Developing Countries ». *Forests* 8(3): 68.
- Moravie, M. -A, M Durand, et F Houllier. 1999. « Ecological meaning and predictive ability of social status, vigour and competition indices in a tropical rain forest (India) ». *Forest Ecology and Management* 117(1): 221-40.
- « multcomp.pdf ». Consulté le 21 juin 2019. <https://cran.r-project.org/web/packages/multcomp/multcomp.pdf>.
- Ndamiyehe Ncutirakitza, JB. 2016. « Utilisation de données de télédétection 3D acquises par drone pour la caractérisation des conditions de croissance dans un dispositif de suivi de la dynamique forestière (Yoko) en République démocratique du Congo ».
- Oliveira, Raquel A, Adilson Bervegliieri, Antonio M G Tommaselli, et Eija Honkavaara. « Potential of Dense Matching for DSM Generation in Tropical Forests Using UAV Images ». : 4.

- Pan, Y. et al. 2011. « A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests ». *Science* 333(6045): 988-93.
- Panzou, Grace Jopaul Loubota. « Biomasse et stocks de carbone en Afrique centrale : importance de l'allométrie des arbres ». : 161.
- Piboule, A., Krebs, M., Esclatine, L., Hervé, J.-C., 2013. Computree: a collaborative platform for use of terrestrial lidar in dendrometry. Presented at the International IUFRO Conference MeMoWood, Nancy, France.
- R Core Team (2018). R : A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Repéré sur URL <https://www.R-project.org/>.
- « rgdal.pdf ». Consulté le 21 juin 2019. <https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/rgdal.pdf>.
- « rgeos.pdf ». Consulté le 21 juin 2019. <https://cran.rstudio.com/web/packages/rgeos/rgeos.pdf>.
- Ripley, Brian D. « Model Selection in Complex Classes of Models ». : 29.
- « sf.pdf ». Consulté le 21 juin 2019. <https://cran.r-project.org/web/packages/sf/sf.pdf>.
- Silva, Carlos A. et al. 2016. « Imputation of Individual Longleaf Pine (*Pinus Palustris* Mill.) Tree Attributes from Field and LiDAR Data ». *Canadian Journal of Remote Sensing* 42(5): 554-73.
- Slik, J. W. Ferry et al. 2015. « An Estimate of the Number of Tropical Tree Species ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(24): 7472-77.
- Wasseige, C. Abermethy, K. Angu, K. Assembe, S. Bassaler, N. Bayol, N. Beck, P.J. et al. 2010. « Forest management and the timber sector in Central Africa. ». *The forests of the Congo basin. State of the Forest 2010*.

ANNEXES



Annexe 1. Diagramme des pourcentages d'espèces selon leur tempérament qui ont atteint la canopée et dont la couronne a été segmentée sur les images de drone (n = 655).



Annexe 2. Barplot des codes de Dawkins pour les 172 arbres dont les couronnes ont été segmentées par photogrammétrie