

COMPARAISON DE MODÈLES NUMÉRIQUES DE SURFACE PHOTOGRAMMÉTRIQUES DE DIFFÉRENTES RÉOLUTIONS EN FORÊT MIXTE. ESTIMATION D'UNE VARIABLE DENDROMÉTRIQUE SIMPLE : LA HAUTEUR DOMINANTE

Xavier Lucie¹, Sylvie Durrieu¹, Anne Jolly², Sylvain Labbé¹, Jean-Pierre Renaud²

1: UMR TETIS, Montpellier, xavier.lucie@teledetection.fr

2: ONF Département R&D, Nancy

Résumé

Le renouveau de la photogrammétrie et le développement de moyens aéroportés légers tels que les drones permettent de nouvelles applications dans le domaine de l'aménagement et la gestion forestière.

L'estimation de variables forestières se fait dans le cadre de processus longs et fastidieux sur le terrain. Dans l'idée d'automatiser l'extraction de variables dendrométriques, nous mettons en place une méthodologie pour générer les modèles numériques de surfaces (MNS) par photogrammétrie multi-vues les plus précis possibles compte-tenu des limites imposées par les algorithmes de calcul. Nous utilisons pour ce faire la suite photogrammétrique libre de l'IGN MicMac.

Notre zone d'étude se situe dans la forêt domaniale du Ventouret (région PACA) qui est une forêt mixte de moyenne montagne. Pour qualifier la précision de ces MNS, nous disposons de relevés dendrométriques sur des placettes d'analyse de 700 m² représentatives des peuplements les plus fréquents à l'échelle de la forêt. Ces zones ont été survolées par un drone multi-rotors équipé d'un appareil photo numérique à focale fixe. Les clichés ont une résolution spatiale de 2,5 cm contre 25 cm pour les prises de vues standardisées de l'IGN.

Afin d'étudier l'impact de la résolution sur la qualité des MNS générés, nous dégradons la résolution des prises de vues du drone jusqu'à obtenir un pixel terrain d'une quarantaine de centimètres. Nous comparons ensuite les altitudes de chaque MNS avec des pointés stéréoscopiques de référence réalisés manuellement sur les prises de vues originales.

En soustrayant à chaque MNS un modèle numérique de terrain (MNT) LiDAR, nous calculons ensuite un modèle de hauteur de couvert (MHC). L'étude de la distribution des hauteurs sur chaque placette et d'un modèle statistique de hauteur dominante (H_0) nous permettent de conclure sur l'intérêt de l'approche photogrammétrique et de déterminer des résolutions spatiales optimales pour appuyer le travail des gestionnaires et aménagistes forestiers.

Mots-clés : drone, MNS photogrammétrique, résolution spatiale, variable dendrométrique

Abstract

Renewed interest in photogrammetry and recent developments of unmanned aerial vehicles (UAVs) open new possibilities in the field of forest planning and management.

As the assessment of forest dendrometric parameters is usually a costly task, involving intensive field measurements, we were interested to evaluate how the use of accurate photogrammetric digital surface models (DSMs) could facilitate these estimations. Based on DSMs, dendrometric models were calibrated using circular plots (700 m²) measured in an area of interest (AOI). UAVs flight above these AOI were acquired at very high resolution (VHRI) giving images with a spatial resolution of 2.5 cm, as compared to 25,0 cm for the standard IGN aerial images.

We were also interested in assessing the impact of DSMs resolution. For this purpose, DSMs were computed at the original resolution as well as degraded resolutions from 5.0 cm to 40.0 cm. Each DSM's elevation was then compared to manual stereoscopic measurements realized on the VHRI.

By subtracting a digital terrain model (DTM) from each DSM, we derived canopy height models (CHMs). From these CHMs, we observed that plot height distributions were interesting indicators of forest structures and we were also able to established dominant height (H_0) models. These results underline the interest of new photogrammetric approaches, and the importance of spatial resolutions, to improve forest planning and management.

Keywords : UAV, photogrammetric DSM, spatial resolution, forest metric

1. Introduction

1.1. L'aménagement forestier

Dans le cadre de l'étude du milieu, qui est préalable à l'élaboration des aménagements, les aménagistes forestiers doivent en particulier décrire les peuplements forestiers, sous divers aspects : quantification de la ressource sur pieds, qualité, état sanitaire, etc... Pour cela, une étape d'inventaire est souvent réalisée sur le terrain, à partir d'un échantillonnage de placettes d'analyse de 200 m² (8,0 m de rayon) à 700 m² (15,0 m de rayon). L'aménagiste évalue ainsi des variables dendrologiques (composition du peuplement) et dendrométriques (mesure des hauteurs et diamètres des arbres). De ces attributs, il calcule des indicateurs de structure, e.g. hauteur dominante ou surface terrière, ou des paramètres biophysiques, e.g. volume de bois ou biomasse, qui caractérisent le peuplement en place. Ces informations servent à rédiger les documents d'aménagement. Ceux-ci sont la trame d'une étude du milieu qui permet de définir les grandes orientations de la gestion d'une forêt. Des recherches sont menées afin d'utiliser des techniques de télédétection pour améliorer le processus d'extraction de variables forestières tout en maintenant un coût acceptable (Järnstedt et al., 2012).

1.2. Les techniques de télédétection

Deux techniques sont particulièrement intéressantes pour mesurer des paramètres de structure forestière et estimer des paramètres biophysiques : le LiDAR et la photogrammétrie numérique (Lindberg and Hollaus, 2012, Vega and St-Onge, 2008).

La technologie active LiDAR (Light Detection and Ranging) aéroporté trouve un large écho dans la communauté scientifique car elle permet l'obtention en un seul vol d'un nuage de points XYZ qui permet de décrire non seulement la surface de la canopée, mais aussi le modelé du terrain et d'avoir une information sur les différentes strates de la végétation qui composent le peuplement. Toutefois, son usage se trouve limité par un coût d'acquisition encore élevé. Par ailleurs il existe encore très peu de données d'archives, données nécessaires pour évaluer la dynamique de la croissance des peuplements ou celle des perturbations.

Avec la convergence des disciplines de vision par ordinateur et de photogrammétrie, le début des années 2000 a vu apparaître de nouveaux algorithmes de calcul très performants qui ont ravivé l'intérêt de la communauté forestière pour la photogrammétrie numérique. En effet ces nouveaux algorithmes permettent d'identifier, par corrélation d'image, des points homologues entre deux ou plusieurs images sur les zones forestières. Cette étape, indispensable au calcul de l'élévation des points des images, constituait auparavant un verrou méthodologique aujourd'hui en

partie levé. En permettant d'éviter l'étape délicate et longue de numérisation des photographies analogiques, le développement de capteurs numériques grand format et produisant des images d'une excellente qualité géométrique et radiométrique a aussi favorisé le développement de la photogrammétrie numérique (Leberl et al., 2010). Par ailleurs pour des campagnes d'acquisition typiques, les chambres métriques permettent de couvrir de grandes surfaces en trois fois moins de temps qu'avec un Lidar (Baltsavias, 1999). Enfin certains auteurs ont montré que la précision de calcul des variables dendrométriques à partir de modèles numériques de surface (MNS) photogrammétriques est proche de celle obtenue avec le LiDAR (Bohlin et al., 2012, Mora et al., 2013).

Malgré les nombreux avantages des prises de vues standardisées, comme celles réalisées par l'Institut Géographique National (IGN), et l'amélioration des algorithmes, de nombreux facteurs nuisent à la mise en correspondance des clichés. Notamment les obstructions, les motifs répétitifs, les ombres ou encore la diversité des peuplements rencontrés au sein d'une même zone (peuplements mixtes) (St-Onge et al., 2008). Aussi, (Baltsavias et al., 2006) suggèrent d'augmenter le recouvrement et de diminuer la taille du pixel au sol pour éliminer une partie de ces problèmes mal gérés par les logiciels de mise en correspondance d'images.

1.3. Vers la très haute résolution

Une nouvelle tendance se dessine qui consiste à utiliser du matériel photographique grand public embarqué sur des moyens aéroportés légers (drones). Cette solution a un coût raisonnable compte-tenu de la technologie à bord et ne nécessite qu'un seul opérateur disposant de la partie théorique du brevet de pilote ULM et d'une formation pratique sur les drones, ce qui est une contrainte de moins en comparaison des systèmes aéroportés (Zarco-Tejada et al., 2014). La flexibilité du système en fait son véritable atout. La possibilité de planifier ses propres missions avec les recouvrements voulus et un pixel au sol jusqu'à 10 fois plus résolu que pour les prises de vues standardisées (25 cm à 30 cm) permettent de modéliser jusqu'à la couronne des arbres. Toutefois, il existe des contraintes de charge utile, d'autonomie ou encore de géométrie du capteur embarqué. Du fait de la miniaturisation des appareils photographiques numériques (APN) embarqués, on dispose en effet rarement de chambres grand format.

1.4 Objectifs de l'étude

Dans le cadre de cette étude, nous comparons des MNS calculés à partir de PVA de drone de différentes résolutions. Nous cherchons à vérifier si l'hypothèse que l'accès à la THR permet d'améliorer la précision

des MNS et de résoudre les problèmes courants que l'on rencontre en montagne pour la mise en correspondance des clichés est vraie. Nous utilisons des pointés stéréoscopiques pour qualifier numériquement la précision de nos modèles et des transects sur divers sites forestiers pour une analyse visuelle.

Un deuxième objectif est de déterminer quelle résolution est la plus adaptée pour générer des MNS dans le but d'extraire une variable forestière, ici la hauteur dominante. La hauteur dominante, souvent utilisée par les gestionnaires, représente dans les futaies régulières la hauteur moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare. Sa connaissance permet d'évaluer des indices de fertilité, qui décrivent la croissance potentielle des arbres en un lieu donné ou « site » (Vega and St-Onge, 2008). Pour qualifier la précision de nos modèles de H_0 , nous nous référons à des modèles de hauteur de couvert LiDAR.

2. Matériel et méthodes

2.1. Description du site

L'étude a été menée dans la forêt domaniale du Ventouret (FDV) située à 50 km d'Avignon sur le versant sud du Mont-Ventoux sur la commune de Bédoin (5°10' E, 44°07' N). L'Office National des Forêts (ONF) gère les quelques 28 km² de cette forêt mixte de moyenne montagne sur laquelle sont présents du chêne pubescent (*Quercus pubescens*), du hêtre (*Fagus sylvatica*), diverses essences de pin (*Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*) ainsi que du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*).

En plus de cette diversité d'essences, le site de la FDV présente une topographie vallonnée avec des altitudes qui varient entre 1000 m et 1400 m. Les conditions d'ensoleillement changent considérablement au cours de la journée et génèrent des ombres qui peuvent engendrer des erreurs lors de la mise en correspondance (MEC) des images, notamment pour des missions de PVA qui durent plusieurs heures.

2.2. Zones d'étude

Une zone d'intérêt de 1800 hectares sur laquelle on trouve diverses expositions et une topographie variée a été délimitée.

En s'appuyant sur le plan d'aménagement de la base de données de l'ONF réalisée pour cette forêt entre 2011 et 2012, les « types » de peuplements les plus fréquents ont été triés par classes de hauteur puis ont fait l'objet de mesures terrain (juin 2013). Des mesures de variables dendrométriques telles que la hauteur et le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) utiles à l'aménagiste forestier pour estimer les volumes de bois, ont été réalisées. Les relevés de hauteurs ont été effectués sur 5 placettes circulaires de 15,0 m de rayon

situées dans trois zones où les peuplements sont représentatifs de la FDV (Tab. 1). Sur chacune de ces placettes ont été calculées des variables synthétiques décrivant le peuplement, notamment la hauteur dominante, moyenne des 6 plus gros arbres sur la placette de 7 ares (Duplat and Perrotte, 1981).

2.3. Campagne de PVA de drone

De manière quasi-synchrone avec ces relevés dendrométriques, une campagne de PVA a été réalisée à l'aide d'un drone.

La mission a été menée en juin 2013 quand les conditions météorologiques le permettaient. Essentiellement, deux critères sont retenus : la vitesse du vent ne doit pas excéder 10 km/h et un temps sec mais pas trop ensoleillé pour éviter tout phénomène de flamboiemment. L'APN utilisé est un Sigma DP2 Merrill (www.sigma-photo.fr) équipé d'un capteur CMOS de 24 x 16 mm et d'une focale fixe de 30 mm (équivalent 35 mm : 45 mm). À la hauteur de vol de 120 m, un pixel au sol mesurera environ 2,5 cm. L'APN est embarqué sur un drone multi-rotors de la marque Mikrokopter (www.mikrokopter.de). Ce drone équipé de 8 rotors a une charge utile de 4 kg qui lui permet d'embarquer aisément deux APN pour calculer des indices de végétation par exemple (avec un capteur RVB et un capteur proche IR). Toutefois, toute charge supplémentaire se fait au détriment de l'autonomie qui peut être réduite à 20 minutes et limiter alors le nombre de PVA.

Pour cette étude, 3 plans de vol ont été spécifiquement réalisés en vue d'obtenir des MNS THR avec des recouvrements longitudinal et latéral de l'ordre de 80 %, ce qui est supérieur à des PVA classiques (60 %, 20 %) (Fig. 1b). Une augmentation du recouvrement permet de réduire les appariements faux en combinant davantage de clichés lors de la mise en correspondance des images.

2.4. Données d'élévation de référence

Afin d'estimer les précisions planimétrique et altimétrique qui peuvent être atteintes avec les MNS photogrammétriques calculés à partir d'images à différentes résolutions, on dispose d'un MNS LiDAR obtenu à partir d'un vol à l'altitude de 1530 m avec une densité de 2 points/m². Ce vol réalisé à l'hiver 2012 pour la rénovation du RGE® Alti (www.professionnels.ign.fr/rgealti) n'a pas la densité la mieux adaptée au calcul de MNS en forêt (Lisein et al., 2013) mais le Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu du dernier écho sert de référence au calcul des Modèles de Hauteur de Couvert (MHC) photo-LiDAR (St-Onge et al., 2008).

Des données complémentaires de référence seront produites par photogrammétrie (cf. §2.5.2).

Placette	H ₀	Groupement	Essence	UA
1	15.29	HET3	hêtre	102
2	12.33	PX2	pin à crochets	93
3	13.54	HET2	hêtre	121
4	17.83	CED3	cèdre	41
5	20.73	CED4	cèdre	34

Tableau 1 : Placettes utilisées pour l'étude de la hauteur dominante H₀. Le type de peuplement par hauteur, l'essence et le nombre d'unités d'analyse dans lequel ce peuplement présent à l'échelle de la forêt.

2.5. Génération de données par photogrammétrie

2.5.1. Prétraitement photogrammétrique

MicMac est un logiciel libre et open-source de l'IGN qui permet la reconstruction de modèles 3D à partir d'images stéréoscopiques. Le processus photogrammétrique est entièrement réalisé à l'aide de ce logiciel. Il comprend les étapes suivantes : l'orientation interne (OI) qui correspond à la calibration interne de l'APN. Comme l'APN est non seulement sensible aux chocs mais aussi à la température, les paramètres physiques, i.e. focale (F), point principal d'autocollimation (PPA) et point principal de symétrie (PPS), et les distorsions (radiales et tangentielles) sont réévalués pour chaque jeu de photos. L'orientation relative (OR) qui s'appuie sur l'algorithme SIFT (Lowe, 2004) permet d'orienter les images les unes par rapport aux autres par itération. Suit l'étape d'orientation absolue (OA) qui consiste à partir de points d'appui connus en coordonnées à basculer le modèle dans un repère terrain (ex : Lambert93 + IGN69).

2.5.2. Pointés stéréoscopiques de référence

Les fichiers d'OA générés au format interne de MicMac sont convertis pour être ouverts dans le module StereoAnalyst du logiciel Erdas Imagine. Ce module permet de réaliser des pointés stéréoscopiques sur ces images à la résolution de 2,5 cm. Plus de 400 points de référence sont cliqués manuellement sur deux zones survolées par le drone. Ces points choisis aléatoirement sont précis à ± 30,0 cm et constituent la référence pour estimer la précision des MNS photogrammétriques.

2.5.3. Calcul des MNS à partir d'images à différentes résolutions

Dégradation des jeux de données

Les trois jeux de photographies sont dégradés en utilisant l'outil Degrade du logiciel Erdas Imagine. Cet opérateur est plus robuste qu'un interpolateur bilinéaire classique quand le facteur d'échelle est supérieur à 4 car sa fenêtre de recherche est de 4x4 pixels. Au total,

60 photographies sont dégradées de 2x, 4x, 8x et 16x pour obtenir des résolutions spatiales (RS) respectives de 5,0 cm, 10,0 cm, 20,0 cm et 40,0 cm.

Choix de la stratégie de mise en correspondance (MEC) d'images

A la manière de (St-Onge et al., 2008), plusieurs paramètres de MEC ont été testés indépendamment. Un coefficient de corrélation entre le MNS LiDAR de référence et les MNS photogrammétriques a ensuite été calculé et des paramètres optimaux pour la MEC des images ont été mis en évidence (Lucie, 2013).

Pour la présente étude, étant donné la petite superficie des zones survolées par le drone (environ 1 hectare) et la complexité de la canopée, la taille de la fenêtre de corrélation est choisie la plus petite possible. Les MNS sont calculés à la résolution originelle des PVA pour pouvoir étudier l'impact de la résolution. Les paramètres utilisés pour tous les clichés sont résumés dans le tableau 2.

Post-traitement SIG pour le calcul des MHC

Les MNS photogrammétriques ainsi que les MNS et MNT LiDAR ont ensuite été ré-échantillonnés à 50 cm à l'aide d'un interpolateur bilinéaire qui détermine la nouvelle valeur d'une cellule en fonction de la distance moyenne pondérée des valeurs des centres des quatre cellules en entrée les plus proches. Ces modèles davantage lissés sont utilisés pour calculer la différence :

$$MHC = MNS_{photo} - MNT_{LiDAR} \quad (1)$$

2.6. Qualification des MNS

2.6.1. Écarts d'altitude entre pointés stéréo et MNS

Pour tout (X,Y)_{pointé}, la différence d'altitude ΔZ entre le pointé et le MNS est calculée. On utilise l'écart interquartile (EI) pour étudier la dispersion de ΔZ. Si cette variable suit une distribution normale alors la zone délimitée par 1,5 fois l'EI devrait contenir 99,3 % des observations. Pour chaque jeu de données, les valeurs aberrantes i.e. n'appartenant pas à l'intervalle]Q1 - 1.5 EI ; Q3 + 1.5 EI[sont identifiées. En plus de ces mesures de dispersion, on calcule sur les jeux de données sans valeurs aberrantes, les ΔZ supérieurs à 1,50 m et à 5,00 m ainsi que l'écart-type.

2.6.2. Comparaison de profils de points

Des profils de points ont été réalisés sur trois zones survolées par le drone. La zone SP2 est composée de peuplements de hêtres et de pins. La zone SP7 de 3 peuplements de cèdre de différentes hauteurs. Le profil de la zone SP3 passe par des peuplements très denses de hêtres (Fig. 1a).

2.6.3 Effet de la qualité des MNS sur l'estimation de la hauteur dominante

Les relevés terrain de référence ont été effectués sur 5 placettes circulaires de 15,0 m de rayon. Le MNT LiDAR est utilisé pour le calcul du MHC (équation 1). Nous avons ensuite extrait divers indicateurs à partir du MHC sur des emprises correspondant à celles des placettes. Des modèles affines mettant en relation ces indicateurs et la donnée H_0 issue des mesures terrain ont été établis et évalués par validation croisée.

Facteur de régularisation	Fenêtre de corrélation	Coefficient de corrélation
0,005	3x3	0,0

Tableau 2 : Les paramètres modifiés de la commande Malt du logiciel MicMac qui réalise la MEC des images.

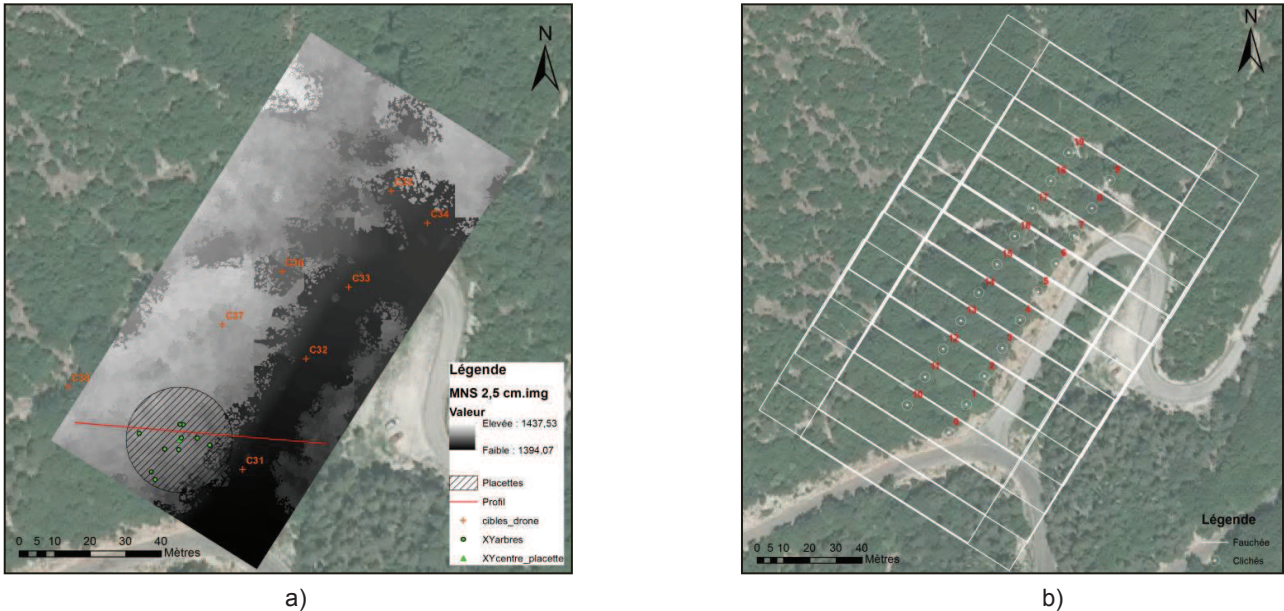


Figure 1 : Zone d'étude SP3 survolée par le drone et mesurée sur une placette d'analyse de 15 m de rayon, MNS calculé à partir des images à 2,5 cm de résolution (a). Le plan de vol avec des recouvrements de 80 % ; les deux bandes de 10 photos ne sont pas prises en lacet mais dans le sens du vent de manière à augmenter l'autonomie du drone (b)

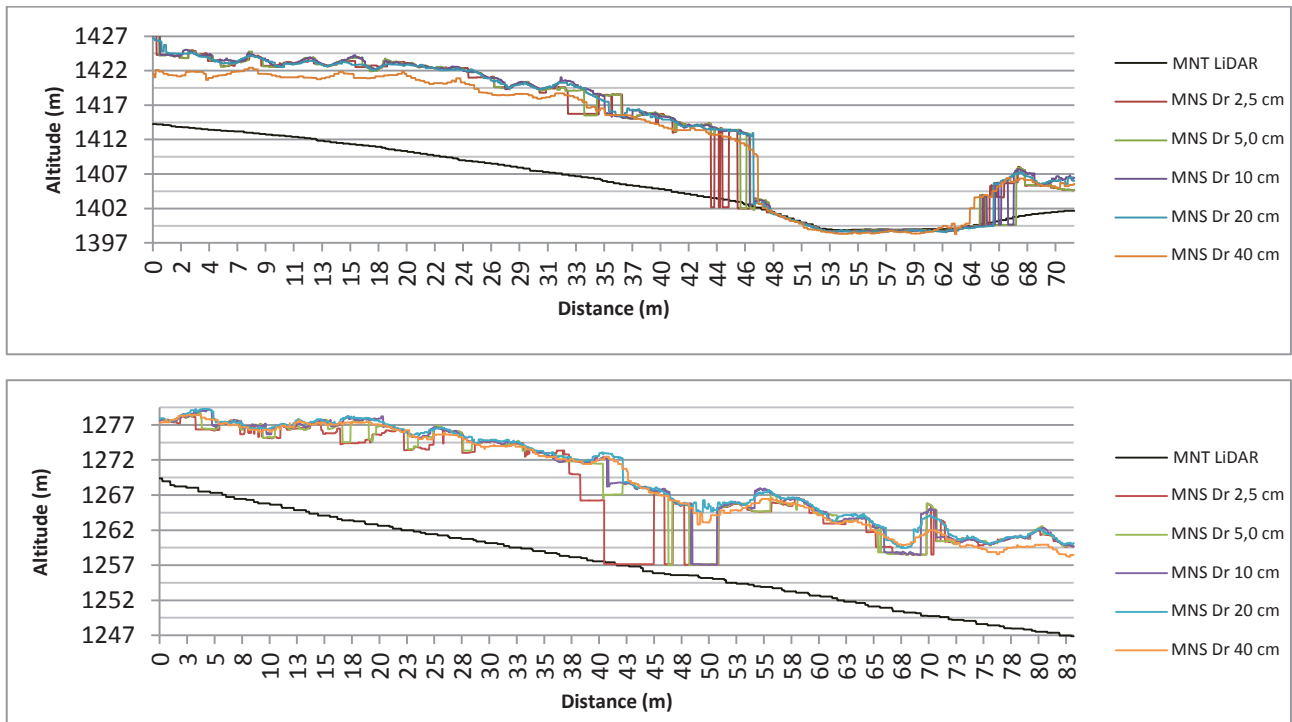


Figure 2 : Profils de points dans la zone SP3 (a) et SP2 (b) avec les MNS du drone aux différentes RS et le MNT LiDAR

3. Résultats et discussion

3.1. Choix de la résolution

3.1.1. Statistiques sur les écarts d'altitudes

A la lumière des statistiques appliquées aux MNS calculés à partir de différentes résolutions, en prenant comme référence les pointés stéréoscopiques réalisés sur les images à 2,5 cm de résolution (Tab. 3), on peut dire que :

- Les MNS générés à partir des photos les plus résolues sont ceux qui ont l'écart-type en Z et les différences d'altitude supérieures à 5 m les plus importants
- Les MNS générés à partir des photos à 18 cm ont l'écart-type en Z et les différences d'altitude supérieures à 5 m les plus faibles

La zone SP2 a la spécificité de présenter un couvert dense et régulier. Au contraire la zone SP7 présente de grands peuplements de cèdre et beaucoup de houppiers. Les ombres portées sont donc plus importantes et celles-ci sont mal gérées par le logiciel MicMac au regard des 128 observations supérieures à 5 m.

La répartition des écarts sur la zone SP2 est gaussienne avec un écart-type de 1,78 m à la résolution de 10 cm. La zone SP7 présente davantage d'irrégularités et à la même résolution, l'écart-type est de 3,13 m et compte 22 observations supérieures à 5,00 m.

	RS	outliers	min	1 ^{er} quartile	médiane	moyenne	3 ^{ème} quartile	max	σ	obs > 5.0	obs > 1.5
	0.025	14	-8.04	-2.61	-0.76	-1.13	0.43	4.81	2.40	13	101
	0.05	9	-6.38	-1.95	-0.38	-0.61	0.67	4.37	2.08	3	95
SP2	0.10	10	-4.63	-1.31	-0.14	-0.21	0.79	4.25	1.78	0	76
	0.20	7	-4.85	-1.51	-0.30	-0.36	0.72	4.18	1.78	0	86
	0.40	2	-6.53	-2.55	-1.24	-1.19	0.23	4.25	2.14	8	122

Tableau 3 : Comparaison des altitudes des MNS de différentes résolutions par rapport aux pointés stéréoscopiques (valeur du pointé - valeur MNS). Statistiques effectuées sur la zone SP2 sur la base de 222 observations. Les unités sont exprimées en mètre. Les valeurs extrêmes sont indiquées en rouge (maxima) et vert (minima).

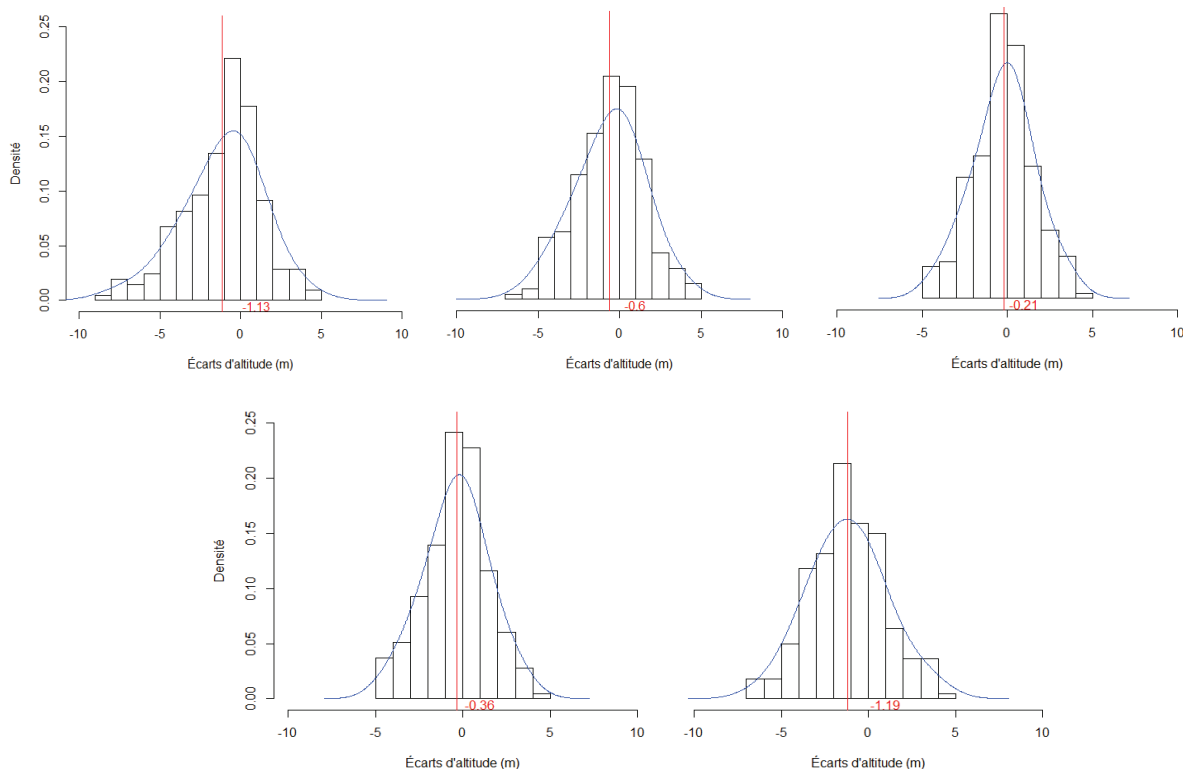


Figure 3 : Comparaison des écarts d'altitude sur la zone SP2 entre les MNS calculés à partir des images de résolution décroissante (0,025 m - 0,05 m - 0,10 m - 0,20 m - 0,40 m, de g. à d.). En rouge, la moyenne des écarts (biais), en bleu, la courbe de densité.

3.1.2. Profils de points forestiers (transects)

Pour la zone SP2 (Fig. 2), aux résolutions spatiales de 20 cm et 40 cm, les transects ne présentent pas de discontinuité et sont très semblables au MNS LiDAR.

Pour la zone SP7, le transect à la résolution de 2,5 cm sous-estime toutes les altitudes. Au contraire, le transect à la résolution de 40 cm est tellement lissé qu'il fait penser que le couvert pourrait être continu, ce qui n'est pas le cas. Par ailleurs, nous observons à cette résolution que certains arbres ne sont pas identifiés du fait de la taille de la trouée adjacente qui prolonge la trouée adjacente.

Pour la zone SP3 (Fig. 2), nous constatons que le MNS à la résolution de 2,5 cm présente des sauts qui ne reflètent pas une réalité terrain mais qui résulte davantage d'erreurs de corrélation dans des zones ombrées du couvert forestier. Le MNS à la résolution de 40 cm a tendance à sous-estimer la hauteur du couvert forestier. Les MNS aux résolutions de 10 cm et 20 cm sont très semblables et les plus fidèles à la réalité terrain.

3.2. Estimation de la hauteur dominante

Après avoir testé plusieurs variables couramment utilisées dans les études d'estimation de paramètres forestiers en fonction de nuages de points lidar ou photogrammétriques nous avons retenu le percentile p_{95} comme unique variable explicative (tests non présentés dans cet article). Pour modéliser H_0 à partir du centile p_{95} , on utilise un modèle de régression affine du type :

$$y = ax + b \quad (2)$$

Si l'on prend comme référence le MHC LiDAR, les MHC qui permettent une meilleure prédiction de la hauteur dominante sont ceux générés à partir des clichés à la résolution de 2,5 cm et 5,0 cm (Tab. 4 et Fig. 4). Les estimations faites à partir des MNS issus des clichés aux résolutions de 10 cm, 20 cm et 40 cm sont moins bonnes qu'à partir du MNS Lidar. Pourtant, ce dernier a été calculé à partir d'un nuage de point avec seulement 2 pt/m², soit une densité qui correspondrait pour une grille régulière à des pixels de 70 cm environ. On observe une dégradation de la précision avec la résolution, entre 2.5 cm et 20 cm de résolution. Puis une amélioration de la qualité lorsqu'on passe de 20 cm à 40 cm (Fig 4). La sous-estimation observée sur les transects ne pose pas de problème ici car le modèle capable de corriger un biais systématique.

Source	a (m)	b (m)	R ²	σ (m)
Drone 2,5 cm	-0.80	25.02	0.83	1.38
LiDAR	1.21	-2.45	0.80	1,51

Tableau 4 : Comparaison des modèles affines de hauteur dominante (H_0) calculés à partir du MHC photogrammétrique issu des PVA à 2,5 cm de résolution et du MHC LiDAR.

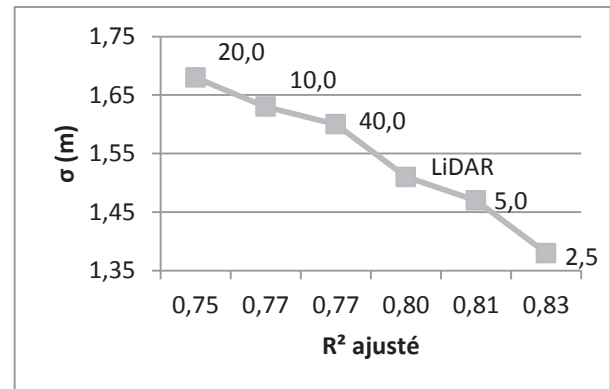


Figure 4 : Comparaison des écarts-types des modèles de H_0 par source de donnée (drone et LiDAR) en fonction du R² ajusté.

Conclusion et perspectives

Nous avons mis en évidence que la très haute résolution n'est pas forcément un gage de précision pour modéliser un couvert forestier plutôt dense. Les moindres zones d'ombres ou absence de feuillage donnent une trouée sur le MNS calculé. Cette trouée n'a pas de réalité terrain mais résulte d'une interpolation erronée. Des résolutions proches de celles que fournit l'IGN lors de ses campagnes (entre 20 et 40 cm) donnent des MNS plus réguliers donc plus exploitables pour des applications forestières. L'augmentation du recouvrement a permis dans la majeure partie des cas d'éliminer les erreurs de mise en correspondance des images sauf dans le cas de la zone SP7 qui, avec un éclairage très rasant et de grands peuplements de cèdre, a engendré des calculs de corrélation faux au niveau des ombres portées avec des altitudes en-dessous du sol.

La modélisation de la hauteur dominante est la mieux caractérisée en utilisant des clichés à THR. En effet, les couronnes des arbres sont alors très visibles sur les images et comme la hauteur dominante par placette est la moyenne des 6 plus gros arbres, ici les plus grands, ce résultat confirme notre hypothèse.

Ces conclusions quant à la résolution optimale des photographies pour la caractérisation d'un peuplement forestier étant divergentes il apparaît intéressant par la suite d'étendre cette étude à d'autres peuplements forestiers et d'autres paramètres. Si nous souhaitons par la suite calculer d'autres variables forestières et utiliser des modèles de statistiques de type ACP (analyse en composantes principales) ou RF (random forest), nous pourrions envisager de faire des plans de vol sur toutes les placettes relevées dans le cadre du projet ANR FORESEE.

Il sera aussi intéressant de comparer avec les résultats obtenus à partir des prises de vues standards de l'IGN, prises de vues qui offrent des recouvrements moindre que ceux obtenus avec un drone.

Cette expérience nous a aussi permis de tirer quelques recommandations concernant l'utilisation du drone pour le suivi et la caractérisation des zones forestières. Les conditions de mesure dans cette zone de montagne se sont révélées très contraignantes et ont nécessité un solide bagage technique et une adaptation des plans de vol et du planning. Il ne faut toutefois pas oublier l'essentiel, à savoir des prises de vues avec le soleil au zénith pour limiter le problème des ombres portées et ne pas hésiter à prendre plus de clichés que nécessaire. De plus, lorsque l'utilisateur prévoit d'effectuer des pointés stéréoscopiques manuels, cette opération ne sera possible sur des clichés à THRS que si les prises de vues sont effectuées lorsque le vent est quasi-nul. En effet, dans le cas contraire, il est compliqué d'identifier correctement des sommets d'arbres et la précision du pointé devient difficile à qualifier. Enfin, l'autonomie du drone reste un problème et limite les surfaces à couvrir. Nous privilégierons

l'emploi d'une aile du type gating pour les grands linéaires. L'avantage du drone multi-rotors dans le contexte forestier est de limiter les photos floues car sa vitesse de déplacement est faible et sa stabilité dans les airs assurée. Un autre avantage du drone multi-rotors est la possibilité de prendre des photos en s'orientant vers le centre d'une zone d'intérêt ; il ne s'agit plus de prises de vues normales mais à la manière de ce qui est réalisé en architecture et patrimoine de modéliser la structure 3D du couvert forestier en supprimant toutes les occlusions.

Financement

Cette étude a été intégrée au projet de recherche ANR FORESEE (Programme BIOENERGIES, Projet ANR-10-BIOE-008 FORESEE « Caractérisation de la ressource forestière pour les bioénergies »).

Ce projet qui est centré sur l'utilisation de données LiDAR aéroporté pour l'évaluation de paramètres forestiers comporte aussi un axe de recherche sur l'utilisation de prises de vues aériennes stéréoscopiques.

Irstea et l'ONF travaillent conjointement autour du thème de la caractérisation de la ressource forestière pour les bioénergies. Ce travail a aussi bénéficié d'un financement partiel de la convention-cadre IRSTEA-ONF 2011-2016.

L'ONF Département R&D bénéficie du soutien de l'Etat géré par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n°ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).

Références

- Baltsavias E., Gruen A., Kuchler M. et al., 2006. Tree height measurements and tree growth estimation in a mire environment using digital surface models. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry", Vienna, Austria.
- Baltsavias E. P., 1999. *A comparison between photogrammetry and laser scanning*. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54:83-94.
- Bohlin J., Wallerman J. Fransson J. E. S., 2012. *Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27:692-699.
- Duplat P., Perrotte G. (1981). *Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers*, Paris, ONF, 1981, 432 p.
- Järnstedt J., Pekkarinen A., Tuominen S. et al., 2012. *Forest variable estimation using a high-resolution digital surface model*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 74:78-84.
- Leberl F., Irschara A., Pock T. et al., 2010. *Point Clouds: Lidar versus 3D Vision*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76:1123-1134.
- Lindberg E. Hollaus M., 2012. *Comparison of Methods for Estimation of Stem Volume, Stem Number and Basal Area from Airborne Laser Scanning Data in a Hemi-Boreal Forest*. *Remote Sensing*, 4:1004-1023.
- Lisein J., Deseilligny M.-P., Bonnet S. et al., 2013. *A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery*. *Remote Sensing*, 1-23.
- Lowe D. G., 2004. *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*. *International Journal of Computer Vision*, 60:91-110.
- Lucie X. 2013. *Optimisation du paramétrage et évaluation de la qualité de MNS photogrammétriques pour une utilisation dans le domaine forestier : Impact de la résolution et de la qualité des données*. Diplôme d'Ingénieur Topographe, INSA de Strasbourg.
- Mora B., Wulder M. A., Hobart G. W. et al., 2013. *Forest inventory stand height estimates from very high spatial resolution satellite imagery calibrated with lidar plots*. *International Journal of Remote Sensing*, 34:4406-4424.
- St-Onge B., Vega C., Fournier R. A. et al., 2008. *Mapping canopy height using a combination of digital stereo-photogrammetry and lidar*. *International Journal of Remote Sensing*, 29:3343-3364.
- Vega C. St-Onge B., 2008. *Height growth reconstruction of a boreal forest canopy over a period of 58 years using a combination of photogrammetric and lidar models*. *Remote Sensing of Environment*, 112:1784-1794.
- Zarco-Tejada P. J., Diaz-Varela R., Angileri V. et al., 2014. *Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods*. *European Journal of Agronomy*, 55:89-99.