

Opportunités d'utilisation de la technologie drone au niveau des écosystèmes forestiers

S. FADIL¹, I. SEBARI¹, M. BOUHALOUA², K. AIT EL KADI¹

(Reçu le 20/05/2020; Accepté le 31/05/2020)

Résumé

Au cours de la dernière décennie, la technologie drone a suscité un grand intérêt et a été largement utilisée pour des applications civiles. Ainsi, les drones ont rapidement prouvé leurs efficacités dans les ressources naturelles, l'environnement, l'agriculture et la foresterie. Étant une plate-forme de télédétection, les drones ont le potentiel d'augmenter l'efficacité d'acquisition des données forestières en ayant des résolutions spatiale et temporelle beaucoup plus importantes que celles des autres techniques de télédétection. Dans cet article, nous présentons une synthèse des travaux de recherche portant sur l'utilisation de la technologie drone dans diverses applications forestières, dont la modélisation de la canopée forestière, l'évaluation des paramètres de l'inventaire forestier, le suivi de la santé des forêts et la discrimination des essences forestières. L'analyse de ces travaux a montré que l'utilisation de la technologie drone a concerné plusieurs aspects diversifiés, tandis que d'autres thématiques de recherche sont encore peu étudiées, notamment l'évaluation de la régénération naturelle, le suivi des projets de réhabilitation des écosystèmes naturels, l'étude des impacts des changements climatiques et des impacts anthropogènes sur un écosystème forestier. Le drone offre des opportunités d'utilisation de la technologie drone dans la gestion du domaine forestier Marocain, afin de remédier aux limites des techniques de télédétection utilisées actuellement en termes de résolution spatiale, de flexibilité du choix du temps d'acquisition des données et en terme du coût.

Mots clés: Drone, Écosystème forestier, Inventaire forestier, Modélisation de la canopée forestière, Photogrammétrie, Lidar

Opportunities for the use of drone technology in forest ecosystems

Abstract

Over the past decade, UAV technology has attracted a great deal of interest and has been widely used for civilian applications. UAVs have rapidly proven their efficiency in natural resources, the environment, agriculture and forestry. As a remote sensing platform, UAVs have the potential to increase the efficiency of forest data acquisition, having much higher spatial and temporal resolutions than other remote sensing techniques. In this paper, we present a synthesis of research on the use of UAV technology in various forestry applications, such as forest canopy modelling, forest inventory parameter assessment, forest health monitoring and forest species discrimination. The analysis of this research has shown that the use of UAV technology has concerned several diversified aspects, while other research themes are less studied, notably the assessment of natural regeneration, the monitoring of natural ecosystem rehabilitation projects, the study of climate and anthropogenic change impacts forest ecosystems. UAV technology is an opportunities for management of the Moroccan forest ecosystem, in order to overcome the limitations of the remote sensing techniques currently used, in terms of spatial resolution, flexibility in the choice of data acquisition time and in terms of cost.

Keywords: UAV, Forest ecosystem, Forest inventory, Forest canopy modelling, Photogrammetry, Lidar

INTRODUCTION

Depuis toujours, l'Homme a interagit avec son environnement, en façonnant les écosystèmes afin de répondre à ses besoins. En effet, les écosystèmes forestiers procurent de nombreux biens et services, notamment par la production de bois, l'accueil du public, la protection de la biodiversité et la séquestration du carbone. Toutefois, les forêts à travers le monde sont touchées par les changements globaux, comme le changement climatique (GIEC, 2013), qui affectent la croissance des forêts et la concurrence. Le défi rencontré par le gestionnaire est d'assurer une gestion intégrée et durable de ces écosystèmes. Pour faire face à ses attentes antagonistes, les gestionnaires forestiers doivent disposer d'informations exhaustives, précises, géo-localisées et à jour et peu coûteuses.

En effet, les activités de gestion forestière suivent un processus rationnel complexe qui consiste en trois maillons de chaîne consécutifs, appelés «three Ds», Données, Dynamique et Décisions (Surový and Kuželka, 2019a). Les gestionnaires prennent des décisions, mais aucune décision raisonnable ne peut être prise sans être fondée sur des données récentes. Dans le domaine de la sylviculture et la gestion de la nature, le deuxième maillon est aussi crucial pour

les bonnes pratiques de prise de décision. Ceci parce que la forêt constitue un écosystème à long terme (par opposition aux terres agricoles par exemple) qui dépasse généralement la durée de vie humaine. En d'autre terme, pour une bonne prise de décision, il est nécessaire de connaître en détail à la fois l'état récent des écosystèmes forestiers et leurs développement futur sans intervention humaine ou avec des interventions de gestion planifiées (Kaya et al., 2016).

La foresterie a été parmi les premiers domaines, après la géographie et la géologie, à utiliser de manière importante et récurrente les techniques de télédétection dans les démarches d'inventaire et de cartographie de la ressource (Gupta et al., 2010). Ces techniques de télédétection, terrestres, satellitaires et aéroportées, offrent la possibilité au gestionnaire d'appréhender de larges surfaces et d'y mener à bien un aménagement sur le long terme (Lisein, 2016).

Il existe trois plateformes de capteurs importants, qui correspondent typiquement à trois niveaux de détails de données acquises (Surový and Kuželka, 2019): (1) les satellites fournissant des données sur une grande étendue spatiale et avec une résolution grossière, (2) les avions fournissant des données à mi-distance par rapport aux drones et aux satellites, (3) les drones représentant une très haute

¹ Département de Cartographie, Photogrammétrie, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

² Département des Ressources Naturelles et Environnement, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

résolution des données sur une étendue spatiale locale. Ces derniers ont prouvé rapidement leurs efficacités et leurs intérêts dans plusieurs domaines, et notamment dans la foresterie et l'environnement. Néanmoins, leur efficacité est strictement liée au type de capteurs utilisé.

Parallèlement avec le développement des capteurs, des ordinateurs et des techniques de calculs, l'applicabilité de la télédétection en foresterie a évolué des données de photographie aérienne (Lyons, 1966) aux données d'imagerie satellitaires (Asner, 2005); ce qui a permis de calculer des indices forestiers et d'estimer le volume et la biomasse (Lu, 2006). Des programmes satellites comme Landsat, qui est l'un des programmes les plus utilisés dans le monde est couramment utilisé en foresterie ainsi que le Sentinel 2, utilisé plus récemment, avec une fréquence de revisite plus élevée, des largeurs de bande plus étroites et une résolution plus fine (Hojas-Gascon *et al.*, 2015). Néanmoins, leur utilisation ne convient pas aux applications nécessitant une résolution plus importante, comme les arbres individuels ou mêmes les feuilles, ou celles nécessitant une très courte période de revisite de zone.

Par conséquent, l'applicabilité et l'efficacité des drones ont un grand potentiel pour combler les limites des autres types de données. En effet, depuis 1990 les chercheurs ont exploré le potentiel des différents types de drones et de capteurs dans la surveillance de la surface de la terre (Nowak *et al.*, 2019). Les applications se développent dans différents domaines et leur utilisation en foresterie augmente également, conduisant éventuellement à une utilisation régulière à des fins de surveillance à petite échelle et exploitant les avancements importants en terme de capteurs embarqués et des approches méthodologiques développées (Matese, 2020; Torresan *et al.*, 2017).

Cet article traite de l'apport de l'utilisation de la technologie drone en foresterie. Une première section est réservée à la présentation de cette technologie en termes de terminologie, de classification, de capteurs embarqués et de méthodes de traitements des données. Par la suite, une revue des applications potentielles de la télédétection par drone dans la recherche forestière. Les opportunités d'utilisation du drone dans la recherche forestière et la gestion du domaine forestier Marocain sont présentées.

TECHNOLOGIE DRONE

Terminologie

Les drones sont connus sous le nom aéronefs sans pilote ou systèmes aériens sans pilote («Drone», 2020). D'autres termes sont employés pour désigner ces systèmes. En effet, les fabricants, les organismes publics, les opérateurs et les associations du domaine de l'aéronautique et des drones, utilisent tous des termes spécifiques comportant de légères différences au niveau de leurs définitions. Nous donnons dans ce qui suit quelques appellations:

UAV: «acronyme des termes en anglais *Unmanned Aerial Vehicle*, véhicule aérien sans pilote, il est le terme le plus fréquemment employé en anglais pour définir un objet volant utilisé pour des applications civiles dans un cadre amateur ou professionnel ».

UAS: «Malgré l'entente internationale globale sur l'acronyme RPAS (Remotely Piloted Aircraft System)

pour une utilisation à long terme, certaines organisations américaines et britanniques ont décidé d'employer plutôt l'acronyme UAS (Unmanned Air System / Aircraft), ce qui signifie système d'aéronef sans humain à bord ». L'Autorité de l'aviation civile du Royaume-Uni (CAA) fournit une définition complète et l'explication de ce choix: Les termes Unmanned Aircraft (UA) ou RPA (de Remotely Piloted Aircraft pour avion piloté à distance) sont utilisés pour décrire l'avion lui-même, alors que le terme système UAS (de Unmanned Aircraft System pour aéronef non habité) est généralement utilisé pour décrire l'équipement d'exploitation complet, y compris l'avion, le poste de commande avec lequel l'aéronef est piloté et la liaison de données sans fil.

RPAS: «L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) utilise l'acronyme RPAS (de l'anglais Remotely Piloted Aircraft System ou système d'avion piloté à distance) («Drone», 2020) et définit ces aéronefs comme "étant le fruit de développements de pointe dans le domaine de la technologie aérospatiale, les RPAS offrent d'immenses possibilités de progrès car ils ouvrent des nouvelles pistes pour des applications civiles et commerciales tout comme ils apportent des améliorations à la sécurité et l'efficacité de l'ensemble de l'aviation civile". La désignation RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) semble aussi avoir la préférence des agences de l'aviation civile internationales comme Eurocontrol, l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (AESA), l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile (OACI), l'Autorité de sûreté de l'aviation civile (CASA-Australie), l'Autorité de l'aviation civile (CAA-Nouvelle-Zélande) et BeUAS (l'Association belge de l'aviation télépilotee)».

Classification des drones

Les drones peuvent être classés en fonction de critères multiples. Deux catégories peuvent être distinguées selon la plateforme utilisée: à voilure fixe et à voilure rotative. Une autre caractéristique importante des drones est leur taille, qui détermine grandement leur portée et la charge utile qu'ils peuvent transporter (Nowak *et al.*, 2019). Ainsi, il existe aussi une autre classification sur la base de leur masse. Ils peuvent alors avoir les dénominations suivantes: **(1)** MAV, de l'anglais Micro Air Vehicle, pour des tous petits engins pesant moins d'un gramme; **(2)** sUAS, acronyme de small Unmanned Aircraft System, employé pour des drones dont la masse est sous les 25 Kg; et **(3)** UAV utilisé pour les aéronefs sans pilote dont le poids dépasse les 25 Kg.

Capteurs embarqués

Différents capteurs sont susceptibles d'être embarqués sur un drone. Habituellement, il y a la caméra visuelle qui capte des images en couleurs naturelles des parties survolées. Mais d'autres capteurs peuvent être utilisés et qui permettent d'acquérir des données différentes voire complémentaires (Matese, 2020). En effet, Colomina et Molina (2014) ont discuté les différents capteurs compatibles avec les exigences de la charge utile des micros et mini UAV. Ils ont différencié les systèmes à bande visible, proche infrarouge (NIR), multispectral, hyperspectral, thermique, à balayage laser (Lidar) et radar à ouverture synthétique (SAR). Leur examen a révélé que les caméras visuelles haute résolution étaient le capteur dominant le plus utilisé.

Méthodes de traitement des données

Une révolution dans les techniques de traitement de données drone est la technique Structure From Motion (SfM), qui permet une reconstruction entièrement automatique de scènes 3D et de nuages de points photogrammétriques à partir d'images à recouvrement (Surový and Kuželka, 2019). Ce qui permet de fournir des orthoimages drone de très haute résolution et de grande précision.

Des avancées importantes ont été réalisées dans le domaine de traitement de l'image, permettant ainsi une analyse automatique (non supervisée) ou semi-automatique (supervisée) des données à grand échelle (Surový and Kuželka, 2019). Avec les images et orthoimages drone, les méthodes probablement les plus utilisées sont des méthodes statistiques modernes, à savoir Random Forest, Support Vector Machine et dernièrement les réseaux neuronaux convolutifs (Yao et al., 2019).

APPLICATIONS DU DRONE DANS LE DOMAINE FORESTIER

Les utilisations des drones dans l'étude du domaine forestier sont multiples et diversifiés. Nous présentons dans cette section quelques études qui se sont intéressées principalement à la modélisation de la canopée forestière et détermination de la hauteur, à l'évaluation des paramètres de l'inventaire forestier, à la détection et reconstitution d'arbres individuels, à la surveillance de la santé des forêts, à la discrimination des essences forestières, aux forêts de précision et gestion de la planification forestière durable, au suivi des projets de restauration des écosystèmes forestiers et à la cartographie des clairières. Nous présentons à la fin de cette section le tableau 1 dans lequel nous synthétisons les travaux de recherche étudiés dans cet article, par domaine d'application forestière, type de drone utilisé et type de capteur embarqué.

Modélisation de la canopée forestière et détermination de la hauteur

La hauteur du couvert forestier est un paramètre précieux en foresterie et est normalement déterminée par des mesures sur le terrain. Plusieurs études se sont intéressées à la détermination des hauteurs des arbres par drone. Zarco-Tejada et al. (2014), ont effectué en Espagne une étude portant sur une zone forestière de 158 ha et ayant pour objectif la détermination de la hauteur des arbres dans une canopée discontinue en utilisant la solution drone. Ils ont utilisé un drone à ailes fixes avec un système de caméra qui a permis d'acquérir des images avec 5 cm/pixel. Ils ont généré une ortho-mosaïque et des modèles numériques de surface (DSM) de la zone par le biais de méthodes de reconstruction automatique en 3D. Ces chercheurs ont obtenu comme résultats des mesures précises de la hauteur de la canopée en les comparant avec les déterminations classiques sur terrain.

Dans une approche combinée, caméra et lidar (Lisein et al., 2014) ont utilisé les données de photogrammétrie et Lidar pour modéliser la surface du couvert forestier à partir d'images aériennes à basse altitude. La zone d'étude est un massif forestier qui s'étend sur 200 ha, située dans la commune de Felenne en Belgique, à cheval sur les lieux-dits petit Houdron et les Rolisses. Pour ce faire, ils

ont utilisé un drone, GatewingX100 1. Les images ont été traitées avec les approches «Structure from Motion» et un modèle de surface de canopée de peuplements de feuillus a été généré. Par la suite, ce modèle a été combiné avec un modèle numérique de terrain Lidar pour obtenir un modèle de Hauteur de peuplement et pour en déduire la hauteur dominante du peuplement. Ces résultats confirment la faisabilité de modéliser l'évolution de la hauteur des peuplements forestiers depuis une série temporelle d'images drone. Les résultats obtenus sont satisfaisants et semblables à ceux obtenus avec un équipement LiDAR plus coûteux. Moe et al., (2020) ont étudié la hauteur individuelle de certaines essences de bois de grande valeur telles que le bouleau monarque (*Betula maximowicziana*), le ricin aralia (*Kalopanax septemlobus*) et le chêne japonais (*Quercus crispula*) dans le nord du Japon. Ils ont comparé la hauteur individuelle des arbres à partir de trois sources différentes de données: des relevés conventionnels sur le terrain (1), des photographies aériennes numériques dérivées des données des véhicules aériens sans pilote (UAV-DAP) (2) et des données de détection et de télémétrie de la lumière (LiDAR) (3). Les auteurs ont confirmé l'applicabilité des données UAV-DAP pour obtenir la hauteur individuelle des arbres des espèces de feuillus de grande taille et de grande valeur avec une précision comparable à celle des données obtenus par LiDAR et au niveau du terrain.

Évaluation des paramètres de l'inventaire forestier

Pour l'estimation des paramètres dendrométriques, Puliti et al., (2015) ont utilisé des variables trois dimensions qui découlent de l'imagerie drone en combinaison avec des données de référence au sol pour ajuster des modèles linéaires de hauteur moyenne de Lorey, hauteur dominante, nombre de tiges, surface terrière, et estimation du volume de la tige de peuplements dans une forêt boréale du sud-est de la Norvège. Ces chercheurs ont utilisé un drone à ailes fixes eBee (senseFly Ltd., Suisse) équipé d'une caméra S110 captant dans le visible et le proche infrarouge (PIR), pour parcourir 38 parcelles d'échantillonnage circulaires de 400 m², dans une forêt au niveau de la Norvège. Les résultats ont révélé que l'utilisation de l'imagerie UAS peut fournir des informations d'inventaire forestier relativement précises et opportunes à l'échelle locale.

Chianucci et al., (2016) ont testé dans des peuplements de hêtres purs si la photographie numérique aérienne drone en couleurs réelles peut être utilisée pour estimer les paramètres du couvert forestier. Pour se faire, ils ont utilisé un drone eBee à voilure fixe (~700 g) d'une durée de vol maximale de ~50 min, équipé d'un appareil photo numérique RVB standard, pour voler à une altitude de 170 m et acquérir des images avec une résolution de ~7,5 cm par pixel. Les résultats montrent qu'en utilisant un drone, les estimations des paramètres du couvert forestier sont intéressantes, rapides et utiles.

Puliti et al., (2020) ont comparés plusieurs sources de données, provenant de drone (UAV) et de balayage laser aéroporté (ALS) pour la déduction des paramètres biophysique clés dans les petites propriétés forestières (5 à 300 ha). Les quatre types de données utilisés sont comme suit: des variables indépendantes du terrain à partir de données photogrammétriques de drones (UAV-SfM) (1), des variables obtenues à partir de données photogrammétriques

triques de drones normalisées à l'aide de données de terrain externes (UAV-SfMDTM) (2), drone laser scanne (3) et données ALS (4). Les auteurs ont conclu que l'utilisation de données de drones peut augmenter la précision des estimations au niveau des tiges, même dans des conditions d'échantillonnage intensif sur le terrain.

Détection et Reconstitution d'arbres individuels

En Allemagne, Fritz *et al.*, (2013) ont utilisé un octocoptère, équipé d'une caméra VIS-RGB Lumix G3 (Panasonic Ltd.) pour détecter et reconstruire automatiquement des arbres individuels sur une zone cible de 120×75 (m²), dans une vieille forêt dominée par des chênes (*Quercus robur*). Ces chercheurs ont pris plus de 1000 images avec un angle d'inclinaison de 45 ° et à une hauteur de 55 m au-dessus du sol. La collecte des données a eu lieu à l'état de feuille morte en avril 2013. Après analyse et traitement des données, les résultats ont été comparés à un nuage de points du scanner laser terrestre (TLS) de la même zone drones.

Actuellement, la technologie LiDAR devient beaucoup plus accessible et représente une nouvelle solution pour la caractérisation des peuplements forestiers, notamment grâce au fait qu'elle peut être montée sur des drones. Dans ce sens, Wallace *et al.*, (2014) ont utilisé des données LiDAR haute résolution capturées à partir d'un drone multirrotor pour la détection et de la délimitation des arbres au niveau d'un peuplement d'*Eucalyptus globulus* âgé de quatre ans. Ils se sont intéressés à déterminer l'influence de l'algorithme de détection et celle de la densité de points sur la précision de la détection. Les résultats suggèrent que les deux paramètres sont tous les deux importants dans la précision de la détection et de la délimitation des arbres individuels.

Surveillance de la santé des forêts et cartographie des maladies forestières

Le potentiel des drones pour la détection des niveaux d'infestation (*Agilus biguttatus*) dans de petits peuplements de forêts de chênes a été l'objet du travail de Lehmann *et al.*, (2015). Les auteurs ont utilisé un quadcoptère équipé d'une caméra CIR numérique (Canon IXUS 100 équipé d'un capteur infrarouge) pour acquérir des images à très haute résolution spatiale (~ 2 cm/pixel). Leurs résultats, basés sur cinq classes (Healthy, Infested, Dead, Other Vegetation Canopy Gaps), avaient une précision globale de plus de 82,5% avec un gain de temps et en coût estimés de plus de 50% pour les peuplements de taille petite à moyenne par rapport au processus de détection traditionnel.

Dans le Sud de la Finlande et plus exactement au niveau d'une forêt urbaine, Näsi *et al.*, (2015), ont étudié le potentiel d'utilisation de la photogrammétrie et de l'imagerie hyperspectrale à base de drone pour cartographier les dommages causés par les scolytes (*Ips typographus*). Ces chercheurs ont travaillé sur neuf parcelles échantillons, de forme circulaires et ayant un diamètre de 10 m. Ces parcelles ont été géo-référencées et les arbres ont été localisés en mesurant la distance et l'azimut par rapport au centre des parcelles. Les paramètres dendrométriques (DBH: Diamètre à hauteur de poitrine et la hauteur des arbres) ont été mesurés et les symptômes des arbres ont été enregistrés. Un modèle numérique de surface (DSM) est généré à l'aide des méthodes d'appariement denses. Après certains ajustements des mosaïques d'images spectrales et

des données de facteur de réflectance bidirectionnelles ont été produites. Ainsi, des arbres individuels ont été détectés au niveau du modèle de hauteur de canopée (MHC) et leurs caractéristiques spectrales ont été extraites à partir des mosaïques d'images spectrales. Les auteurs ont obtenu une précision de 76%, lorsque les arbres sont classés en trois classes (arbres sains, arbres infectés et arbres morts) et une précision de 90% lorsque les arbres sont classés en deux classes (arbres sains et arbres morts).

Discrimination des essences forestières

Lisein *et al.*, (2016) ont utilisé une série temporelle de 20 ortho-photomosaïques générées à partir d'images drone (Gateway X100), pour déterminer les dates optimales pour discriminer cinq essences feuillues (Erable, Peuplier, Frêne, Chêne indigène et le Bouleau). Leurs résultats montrent que les vols les plus efficaces dans la différenciation de ces essences forestières sont ceux effectués en début et fin printemps, toutefois l'ajout d'acquisitions en automne améliore la discrimination d'espèces.

Dans le cadre du projet FoGLIE (Fruition of Goods and Landscape in Interactive Environment). Gini *et al.*, (2014), ont étudié un parc au nord de l'Italie, ils ont utilisé des images très haute résolution, prises avec deux caméras compactes drone (RGB et NIR). Un modèle numérique de surface a été généré ainsi que les ortho-images correspondantes, par la suite ils ont utilisé la classification supervisée et non supervisée pour faire la distinction entre différentes espèces d'arbustes et d'arbres. Les résultats de cette étude montrent que la précision globale pour la classification non supervisée est d'environ 50% tandis que la classification supervisée donne une précision d'environ 80%.

Forêts de précision

Des paramètres tels que le couvert forestier, le nombre d'arbres, l'estimation du volume, la vitalité ou la composition des peuplements sont des paramètres importants pour la planification forestière et la gestion durable des forêts.

Le drone économise le temps d'estimation du volume et donne une précision acceptable, notamment dans l'étude de Mokroš *et al.*, (2016), qui ont utilisé un quadricoptère à faible coût commercial (DJI Phantom 3 Professional) pour voler à environ 20 mètres d'altitude afin d'estimer le volume de la pile de copeaux de bois. Après avoir comparé les résultats avec le volume obtenu par relevé GNSS (Système mondial de navigation par satellite), les auteurs ont conclu que l'utilisation des drones n'entraînait pas de résultats sensiblement différents (10,4% de plus de volume estimé par la méthode du drone) et le temps nécessaire pour collecter des données est significativement plus faible (12 à 20 fois moins) avec l'avantage de la documentation par l'ortho-mosaïque.

Hassaan *et al.*, (2016) ont utilisé un quadricoptère commercial (DJI Phantom 2) avec un temps de vol maximal de ~ 20 min pour compter les arbres dans les zones urbaines et ont réussi à identifier les arbres avec une précision de 72%. De même, Wallace *et al.*, (2014) ont détecté le nombre d'arbres à l'aide de capteurs LiDAR (détection de la lumière et télémétrie) montés sur un drone.

Sur un territoire d'étude au niveau de la Colombie-Britannique, Goodbody *et al.*, (2017) ont effectué une recherche impliquant les drones pour mettre à jour un inventaire forestier amélioré. En effet, ils ont utilisé des nuages de

points obtenus d'une part par lidar aéroporté en 2013 et par photogrammétrie à l'aide d'un drone en 2015 pour estimer l'accroissement en hauteur et en volume sur des arbres choisis (246 arbres). Les auteurs ont conclu que les nuages de points obtenus sur drone (UAS-DAP) peuvent donner une précision temporelle et spatiale plus importante lors des inventaires améliorés et constitueraient une source d'information valable pour certaines activités d'aménagement forestier durable.

Avec une utilisation conjointe avec l'imagerie satellitaire, Thibaut *et al.*, (2019) ont caractérisé la structure forestière d'un miombo en périphérie de la ville de Lubumbashi (RDC) à l'aide d'imageries drone et satellitaires. Ils ont conclu que l'identification des arbres individuels par imagerie drone est jugée satisfaisante à plus de 70% de même que les hauteurs extraites du Modèle Numérique de Hauteur avec une erreur de l'ordre de 11%. Ils ont mis en évidence un modèle d'estimation de la biomasse aérienne au départ du volume sous le Modèle Numérique de Hauteur Vol_{ha} et du coefficient de variation de la hauteur H_{cv} (variables surfaciques extraites du Modèle Numérique de Hauteur).

Suivi des projets de restauration des écosystèmes forestiers

Almeida *et al.*, (2019) ont exploré le potentiel d'un système lidar transporté par drone pour évaluer les résultats d'une expérience de plantation de restauration avec 20 espèces indigènes. L'expérience a été établie dans la forêt atlantique du Brésil et les résultats ont démontrés que les systèmes lidar transportés par drones ont montré un énorme potentiel pour le suivi de projets de restauration forestière à grande échelle (des milliers d'hectares), fournissant un outil important pour aider à la prise de décision et à la responsabilité dans la restauration des paysages forestiers.

Cartographie des clairières

La présence de clairières dans le domaine forestier peut refléter le niveau de dégradation de ce dernier ainsi que l'importance des pressions anthropiques et naturelles qui lui sont exercés. D'où l'importance de leurs cartographie. Toutefois, les petites clairières avant, ne pouvaient pas être mesurés avec précision à l'aide de données satellitaires (Frolking *et al.*, 2009), mais il est désormais possible à l'aide de la télédétection par drone (Banu *et al.*, 2016).

En Allemagne, Getzin *et al.*, (2012) ont effectué des vols de drones dans des forêts mixtes de conifères à feuilles caduques et à prédominance de hêtres, obtenant ainsi des images d'une résolution de 7 cm permettant d'identifier avec précision les trous dans la canopée d'une taille maximale de 1 m². Les vols ont eu lieu à une altitude de 250 m avec un drone pesant environ 6 kg et ayant des temps de vol allant jusqu'à 60 minutes. Après traitement des images obtenues, une corrélation significative entre les paramètres de clairière mesurés et les indicateurs de biodiversité a été trouvée. L'étude suggère que l'utilisation de drones et de leurs images haute résolution peut mesurer avec précision les paramètres de vide dans la canopée, qui pourraient en réalité constituer de précieux indicateurs de la biodiversité.

Drone, une Technologie prometteuse pour le domaine forestier Marocain

L'analyse approfondie des travaux de recherche antérieurs sur les drones, a révélé qu'au niveau des pays de l'Afrique du Nord et particulièrement au Maroc, l'usage de cette technologie dans la gestion du patrimoine naturel en général et du patrimoine forestier en particulier est rare et insuffisant, compte tenu des avantages incomparables qu'elle procure.

En effet, les drones permettent une acquisition rapide et peu coûteuse des données, avec une résolution temporelle et spatiale plus importante et variant selon le type de capteur utilisé. Nous présentons ci-dessous, quelques propositions d'applications des drones dans la gestion du domaine forestier Marocain.

Inventaire Forestier National

Grâce à sa position géographique privilégiée, entre la Méditerranée au nord, l'océan Atlantique à l'ouest et le Sahara au sud, et grâce à l'importance des chaînes de montagnes, dont certaines dépassent quatre mille mètres d'altitude, le Maroc présente une grande diversité bioécologique et une gamme très importante de milieux naturels différents.

Pour avoir une connaissance complète et homogène sur l'état du patrimoine forestier, le premier Inventaire Forestier National (IFN), réalisé entre 1990-2005, a permis de disposer d'une base de données cartographiques et numériques fiables et importantes sur la répartition géographique, la consistance et l'état général des ressources forestières (HCEFLCD, 2018).

L'une des caractéristiques des écosystèmes forestiers marocains c'est qu'ils évoluent rapidement à cause des contraintes d'ordre écologique, social et économique qui entraînent différentes formes de dégradation (Bijaber et Ahlafi, 2005). Par conséquent, la révision de l'Inventaire Forestier Nationale est primordiale pour une connaissance exacte et précise de l'état actuel du patrimoine forestier.

L'utilisation des images satellitaires à cette fin (comme LANDSAT TM et SPOT XS) est important surtout pour de grandes étendues. Toutefois, elle reste insuffisante à cause de leurs résolutions moyennes et leurs coûts élevés. Cela implique l'utilisation des techniques innovantes pour remédier aux limites des techniques classiques d'acquisition de données en termes de coût, de temps et de précision.

D'où l'intérêt de l'usage des drones, indépendamment des types de capteurs, cette technologie contribuera efficacement dans la révision de l'Inventaire Nationale Forestier, au Maroc ainsi que dans d'autres pays Africains (Berie and Burud, 2018).

Aménagement des Forêts

Une gestion durable des ressources forestières n'est concevable que si l'exploitation du capital productif veille à conserver intactes les fonctions socio-écologiques. Ainsi, les études d'Aménagement menées par le département des Eaux et Forêts, constituent la clef de voûte d'une gestion parcimonieuse des forêts. Il se veut un outil essentiel de gestion non seulement pour l'exploitation forestière mais aussi, et surtout, pour la politique des investissements et la planification sectorielle (HCEFLCD, 2018).

Au niveau du Maroc, la majorité des forêts sont aménagées, c'est-à-dire possèdent une planification dans le temps et dans l'espace sur une durée approximative de 24 ans. Ces études d'aménagement sont la base d'une gestion rationnelle du domaine forestier et se réalisent par des bureaux d'études spécialistes dans ce domaine. Toutefois, leurs réalisations demandent beaucoup de temps et de ressources humaines (pour la réalisation des inventaires, construction de tarifs de cubage, étude phytoécologique, etc.) mais avec une précision moyenne et variable.

L'utilisation des drones va sans doute améliorer la réalisation de ces études d'aménagement et va faciliter le travail de vérification (vérification de la carte des types de peuplement, des tarifs de cubage, des fiches d'inventaires, etc).

Autres applications

En plus de l'Inventaire National Forestier et de l'Aménagement des forêts, les drones peuvent être d'un grand intérêt dans la réhabilitation des écosystèmes forestiers, par le suivi des travaux de reboisement, la surveillance des périmètres mis en défens, l'évaluation de la régénération naturelle, etc.

Ainsi, Chaque année des programmes de coupes de bois et de récolte de liège sont préparés, sur la base d'inventaire forestier et à l'aide des études d'aménagements, la technologie drone va faciliter le travail du personnel forestier, en économisant le temps et l'effort et en augmentant la précision.

Par ailleurs, les drones peuvent aider aussi, dans la surveillance des incendies de forêt. En effet, l'utilisation de cette technologie pour une première reconnaissance, procure un gain de sécurité pour les équipes sur le terrain et permet ainsi de recueillir les données de la zone incendiée pour mieux planifier l'intervention.

CONCLUSION

L'utilisation des drones a augmenté dans plusieurs domaines grâce aux avantages incomparables qu'ils procurent, notamment leurs résolutions spatiales et temporelles, leurs déploiements rapides et leurs coûts opérationnels bas. Ainsi, l'usage des drones est devenu primordiale pour une gestion rationnelle du domaine forestier dans certains pays, notamment Canada et la France. Néanmoins, il est encore en stade de recherche et d'exploration, pour de nombreux pays, en particulier, ceux de l'Afrique. Toutefois, l'utilisation usuelle du drone incessamment dans la gestion forestière, s'impose surtout dans certaines conditions (forêt de montagne ou le terrain est inaccessible, surveillance périodique des placettes de santé de forêt, incendie de forêt, etc.).

Les applications des drones décrites ci-dessus sont nombreuses et diversifiées, mais plusieurs pistes de recherche dans le domaine forestier sont encore vierges et il faudrait les explorer, notamment l'utilisation des drones dans l'évaluation de la régénération naturelle, le suivi des travaux de réhabilitation des écosystèmes (exemple : reboisement), l'usage de cette technologie dans l'étude des impacts des changements climatiques et des impacts anthropogènes sur un écosystème forestier.

RÉFÉRENCES

- Almeida, D. R. A., Broadbent, E. N., Zambrano, A. M. A., Wilkinson, B. E., Ferreira, M. E., Chazdon, R., Meli, P., Gorgens, E. B., Silva, C. A., Stark, S. C., Valbuena, R., Papa, D. A., Brancalion, P. H. S. (2019). Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79: 192-198.
- Asner, G. P. (2005). Selective Logging in the Brazilian Amazon. *Science*, 310: 480-482.
- Banu, T. P., Borlea, G. F., Banu, C. (2016). The use of drones in forestry. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 5: 557-562.
- Berie, H. T., Burud, I. (2018). Application of unmanned aerial vehicles in earth resources monitoring: Focus on evaluating potentials for forest monitoring in Ethiopia. *European Journal of Remote Sensing*, 51: 326-335.
- Bijaber, N., Ahlafi, Z. (2005). Projet FORMA: Études détaillées pour la cartographie des changements dans le cadre de l'Inventaire Forestier National. 9.
- Chianucci, F., Disperati, L., Guzzi, D., Bianchini, D., Nardino, V., Lastris, C., Rindinella, A., Corona, P. (2016). Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47: 60-68.
- Fritz, A., Kattenborn, T., Koch, B. (2013). UAV-based photogrammetric point clouds -Tree stem mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point clouds. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 40: 141-146.
- Frolking, S., Palace, M. W., Clark, D. B., Chambers, J. Q., Shugart, H. H., Hurtt, G. C. (2009). Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114 (G2).
- Gadat, S. (1995). Séance 12: Algorithmes de Support Vector Machines. *s a*, 57.
- Getzin, S., Wiegand, K., Schöning, I. (2012). Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles : Assessing biodiversity in forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 3: 397-404.
- Gini, R., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G. (2014). Use of Unmanned Aerial Systems for multispectral survey and tree classification : A test in a park area of northern Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 47: 251-269.
- Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., Marshall, P. L., Tompalski, P., Crawford, P. (2017). Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. *The Forestry Chronicle*, 93: 71-81.
- GIEC (2013). Changements climatiques 2013, les éléments scientifiques Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 4 p.
- Gupta, S., Weinacker, H., Koch, B. (2010). Comparative Analysis of Clustering-Based Approaches for 3-D Single Tree Detection Using Airborne Fullwave Lidar Data. *Remote Sensing*, 2: 968-989.
- Hassaan, O., Nasir, A. K., Roth, H., Khan, M. F. (2016). Precision Forestry: Trees Counting in Urban Areas Using Visible Imagery based on an Unmanned Aerial Vehicle. *IFAC-PapersOnLine*, 49: 16-21.
- Hojas-Gascon, L., Belward, A., Eva, H., Ceccherini, G., Hagolle, O., Garcia, J., & Cerutti, P. (2015). Potential improvement for forest cover and forest degradation mapping with the forthcoming Sentinel-2 program. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W3, 417-423.

- Kaya, A., Bettinger, P., Boston, K., Akbulut, R., Ucar, Z., Siry, J., Merry, K., Cieszewski, C. (2016). Optimisation in Forest Management. *Current Forestry Reports*, 2: 1-17.
- Lehmann, J., Nieberding, F., Prinz, T., Knoth, C. (2015). Analysis of Unmanned Aerial System-Based CIR Images in Forestry—A New Perspective to Monitor Pest Infestation Levels. *Forests*, 6: 594-612.
- Lisein, J. (2016). Application des techniques de photogrammétrie par drone à la caractérisation des ressources forestières. *BIO TECH*, 119.
- Lisein, J., Bonnet, S., Lejeune, P., Pierrot-Deseilligny, M. (2014). Modélisation de la canopée forestière par photogrammétrie depuis des images acquises par drone. 10.
- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27: 1297-1328.
- Lyons, E. H. (1966). Fixed air-base 70 mm photography, a new tool for forest sampling. *The Forestry Chronicle*, 42: 420-431.
- Matese, A. (2020). Editorial for the Special Issue “Forestry Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)”. *Forests*, 11: 406.
- Mokroš, M., Tabačák, M., Lieskovský, M., Fabrika, M. (2016). Unmanned aerial vehicle use for wood chips pile volume estimation. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B1*, 953-956.
- Monasse P., Nadjahi K. (2020). Qu'est ce qu'un réseau de neurones convolutif (ou CNN) ? Cours Centrale Supélec, Open-Classrooms.
- Moe, K., Owari, T., Furuya, N., Hiroshima, T. (2020). Comparing Individual Tree Height Information Derived from Field Surveys, LiDAR and UAV-DAP for High-Value Timber Species in Northern Japan. *Forests*, 11: 223.
- Näsi, R., Honkavaara, E., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Blomqvist, M., Litkey, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T., Tanhuanpää, T., Holopainen, M. (2015). Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level. *Remote Sensing*, 7: 15467-15493.
- Nowak, M. M., Dziób, K., Bogawski, P. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in environmental biology: A review. *European Journal of Ecology*, 4: 56-74.
- Puliti, S., Ørka, H., Gobakken, T., Næsset, E. (2015). Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System. *Remote Sensing*, 7: 9632-9654.
- Puliti, S., Dash, J. P., Watt, M. S., Breidenbach, J., Pearse, G. D. (2020). A comparison of UAV laser scanning, photogrammetry and airborne laser scanning for precision inventory of small-forest properties. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 93: 150-162.
- HCEFLCD (2018). Rapport des activités 2018, Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, Rabat Chellah, Maroc.
- Surový, P., Kuželka, K. (2019). Acquisition of Forest Attributes for Decision Support at the Forest Enterprise Level Using Remote-Sensing Techniques-A Review. *Forests*, 10: 273.
- Thibaut, Q. (2019). Structure d'une forêt claire de type miombo par imageries drone et satellitaire. Travail de fin d'études, Université Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT).
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A., Wallace, L. (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 38: 2427-2447.
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C. S. (2014). Evaluating Tree Detection and Segmentation Routines on Very High Resolution UAV LiDAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52: 7619-7628.
- Yao, H., Qin, R., Chen, X. (2019) Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications-A Review. *Remote Sensing*, 11: 1443.
- Zarco-Tejada, P. J., Diaz-Varela, R., Angileri, V., Loudjani, P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55:89-99.