

UTILISATION DES DRONES POUR LE SUIVI DES AIRES PROTÉGÉES EN RDC

*Jean Semeki Ngabinzeke¹, Cédric Vermeulen², Julie Linchant³,
Jean-Marie Kahindo Muhongya⁴ & Philippe Lejeune⁵*

Introduction

La télédétection est un outil efficace pour surveiller l'état des habitats au sein des aires protégées (Jones *et al.* 2009 : 4 ; Wiens *et al.* 2009 ; Willis 2015 : 1). Les données qu'elle fournit permettent particulièrement de détecter et de suivre l'évolution des pressions anthropiques et les menaces pesant sur des zones naturelles (Turner *et al.* 2015 ; Bey *et al.* 2009 ; Szantoi *et al.* 2016) telles que l'expansion des cultures (Phalan *et al.* 2013), l'évolution démographique et l'urbanisation (Svancara *et al.* 2009), l'impact des conflits armés et l'exploitation minière (Butsic *et al.* 2015) ou encore la déforestation et la dégradation des forêts (Potapov *et al.* 2012 ; Nackoney *et al.* 2014).

Les outils de télédétection sont en constante évolution et permettent de répondre à la demande croissante d'informations sur l'état de l'environnement (Whitehead & Hugenholtz 2014 : 2 ; Whitehead *et al.* 2014 : 2). Une des évolutions les plus récentes concerne le domaine des aéronefs télécommandés sans pilote à bord (*unmanned aerial system*), plus communément appelés drones. Alors qu'elle trouve ses origines dans le domaine militaire (Watts *et al.* 2012 : 1), cette technologie a conduit à des changements notables dans le secteur de la télédétection environnementale (Anderson & Gaston 2013 : 1 ; Whitehead & Hugenholtz 2014 : 1). Sa flexibilité de déploiement et sa capacité à fournir des images à très haute résolution

¹ Jean Semeki Ngabinzeke est professeur associé à l'Université de Kinshasa, faculté des Sciences agronomiques, département de Gestion des Ressources naturelles.

² Cédric Vermeulen est professeur à l'Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, unité de recherche TERRA.

³ Julie Linchant est chercheur-doctorant à l'Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, unité de recherche TERRA.

⁴ Jean-Marie Kahindo Muhongya est professeur à l'Université de Kisangani, faculté des Sciences, département de botanique.

⁵ Philippe Lejeune est professeur à l'Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, unité de recherche BIOSE.

spatiale (Watts *et al.* 2012 : 1 ; Linchant *et al.* 2015 : 2 ; Tang & Shao 2015 : 1) permettent un éventail d'applications de gestion des ressources naturelles sur des zones cibles telles que la gestion des pâturages arides (Rango *et al.* 2009 ; Laliberte *et al.* 2011), la détection des activités illégales (Koh & Wich 2012), le contrôle de l'érosion du sol (Oleiree-Oltmanns *et al.* 2012 : 1), le comptage de la faune (Vermeulen *et al.* 2013 ; Linchant *et al.* 2015), l'agriculture de précision (Zhang *et al.* 2014 ; Torres-Sánchez *et al.* 2015) ou encore la surveillance des incendies de forêts (Wing *et al.* 2014 ; Tang & Shao 2015). D'autres études ont également rapporté avec succès l'utilité des drones notamment pour le contrôle post-exploitation des pistes de débarquement (Pierzchala *et al.* 2014) et l'évaluation de la restauration des forêts tropicales (Zahawi *et al.* 2015). Toutes ces études ont conclu que la technologie drone offre une opportunité pour surveiller des terres au niveau local, ce qui contribue à l'amélioration des stratégies de gestion et de prise de décisions. Néanmoins, des applications spécifiques sur le suivi des activités humaines dans les aires protégées, particulièrement en région tropicale, sont rares et des tests formels sont nécessaires pour rendre efficace la technologie des drones dans ce domaine (Kakaes *et al.* 2015).

Un tel outil peut-il venir en aide aux aires protégées de la RDC, considérées aujourd'hui comme parmi les plus vulnérables de la planète (Misser 2013 : 1 ; Butsic *et al.* 2015 : 2) ? Le pays a en effet mis en place un réseau d'aires protégées qui couvrent près de 11 % du territoire national et constituent le socle des politiques étatiques en matière de conservation de la nature et de développement durable (Pélissier *et al.* 2015). Malheureusement, ces zones sont actuellement menacées par diverses pressions anthropiques, résultant d'une combinaison de facteurs à la fois socio-économiques et politiques. Plus de trois-quarts de la population congolaise vit en effet en dessous du seuil de pauvreté, et les ressources naturelles, y compris celles présentes dans les aires protégées, constituent bien souvent le seul moyen de subsistance pour les populations locales. Avec les conflits armés récurrents qui minent le pays depuis plusieurs décennies, les aires protégées sont également devenues des zones de refuge de prédilection pour les groupes armés et les populations déplacées fuyant les incursions des rebelles (Misser 2013 : 9 ; Nackoney *et al.* 2014 : 1). Face à cette situation, un défi permanent pour l'Institut congolais pour la Conservation de la Nature (ICCN) est d'assurer avec des moyens très limités une surveillance aussi soutenue que possible des énormes surfaces sous statut d'aire protégée.

L'exploration des possibilités permettant de documenter l'anthropisation au sein de ces aires protégées constitue donc une priorité pour tous les acteurs de la conservation de la biodiversité. Il convient de développer des outils compatibles avec la faiblesse des moyens humains et financiers et l'état des infrastructures techniques d'un pays à la dimension de la RDC.

Cet article présente les opportunités qu'offrent les mini-drones en matière de surveillance des perturbations humaines au sein des zones dédiées à la

conservation de la nature. Plus spécifiquement, il ambitionne de décrire les potentialités de cette technologie dans la détection des activités humaines, la cartographie et la surveillance rapide de l'évolution des terroirs villageois ainsi que du recensement et de la caractérisation des habitations villageoises. Nous discutons ensuite de l'implication de telles applications dans la conservation de la biodiversité et des défis (technologiques, techniques, environnementaux, sociaux, économiques, politiques et légaux) liés à l'utilisation de ce type de technologies dans le contexte particulier de la RDC.

1. Matériel et méthodes

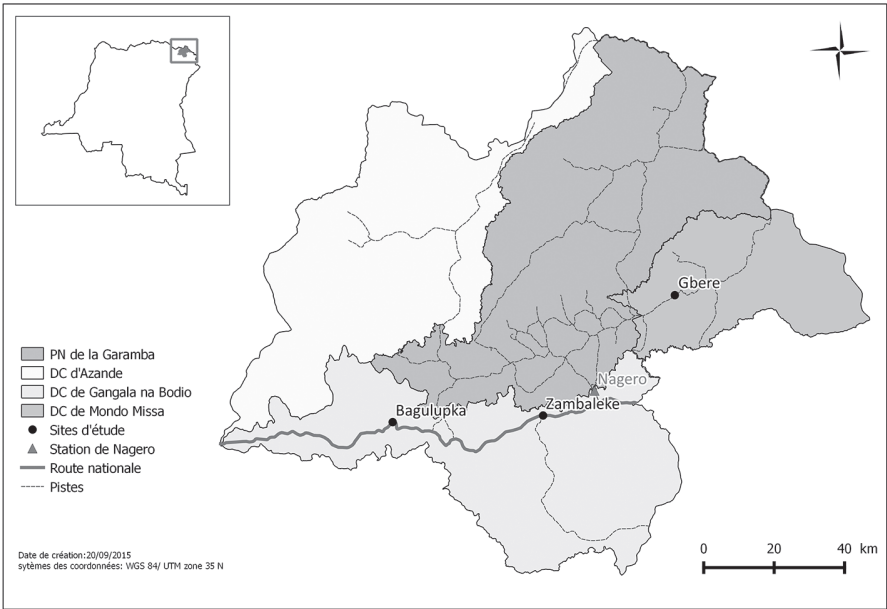
1.1. Site d'étude

L'étude a été réalisée dans les domaines de chasse de Mondo Missa et de Gangala na Bodio, faisant partie du complexe des aires protégées de la Garamba, dans le nord-est de la RDC (figure 1). Le climat est de type tropical semi-humide ou AW3 selon la classification de Köppen, avec une pluviométrie de 1500 mm en moyenne par an et une température moyenne annuelle de 25 °C (Balimbaki 2015). Le couvert végétal est constitué d'une mosaïque de formations comprenant des savanes (herbeuses, arbustives et boisées) entrecoupées de forêts denses sèches, de forêts claires et de forêts galeries (De Saeger 1954).

La création des domaines de chasse avait à l'origine pour vocation de servir de zones tampon au Parc national de la Garamba. Ils sont destinés à l'utilisation durable des ressources naturelles (Dudley 2008 : 28 ; Balimbaki 2015 : 13). Malheureusement, les différentes activités exercées par les populations locales telles que l'agriculture itinérante sur brûlis, la chasse, la pêche, la carbonisation et l'orpaillage s'y déroulent sans respect des règles établies. Cette situation, associée au braconnage commercial perpétré par les groupes armés, a conduit à l'inscription dudit parc sur la liste du patrimoine mondial en péril depuis 1996 (Unesco 2010 ; Misser 2013 : 2).

Le choix des sites d'étude (villages de Zambaleke, de Bagulupka et Gbere) situés dans les domaines de chasse en périphérie du parc a été guidé à la fois par la présence d'activités anthropiques avérées et par des impératifs sécuritaires (Balimbaki 2015 : 13). Ces zones cumulent différents types de pressions anthropiques typiques de la RDC (agriculture sur brûlis, orpaillage, implantations humaines...) et rencontrées dans la plupart des aires protégées du pays (Unesco 2010 ; Misser 2013). Le parc lui-même n'est pas considéré ici d'une part car les populations riveraines y sont peu présentes et, d'autre part, car les vols qui y ont été réalisés ont essentiellement porté sur les comptages de faune, dont les résultats sont décrits de manière exhaustive par Linchant *et al.* (2015 ; 2018).

Figure 1 : localisation de la zone d'étude dans le complexe des aires protégées de la Garamba, au nord-est de la RDC



Source : Jean Semeki.

1.2. Plateforme, capteur et planification des vols

Le mini-drone Falcon (figure 2), développé par CLIMAX Engineering (Colorado, USA), a été sélectionné dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'un mini-drone à ailes fixes, propulsé électroniquement à l'aide de batteries au lithium. Son envergure est de 2,50 m, avec un poids de 6 kg, et une autonomie de vol maximale de 90 min pour une vitesse de croisière de 50 km/h.

Figure 2 : drone Falcon utilisé dans cette étude



Source : Julie Linchant.

Le Falcon a été équipé, selon les missions réalisées, d'une caméra infrarouge thermique Tamarisk, d'une caméra Sony Block en couleurs vraies ou d'un appareil photo numérique Sony NEX-7. Le bloc de caméras vidéo a été utilisé pour le repérage des zones anthropisées alors que l'appareil photo numérique a été dédié à l'acquisition des images fixes. Le contrôle et la planification des plans de vol ont été effectués à l'aide du logiciel Mission Planner (version 1.3.31) compatible avec l'autopilote ArduPilotMega (APM), rendant l'ensemble de la mission autonome pour le vol de cartographie. La communication radio digitale (2400-2500 MHz) entre le drone et la station au sol a une portée maximum de 10 km en l'absence d'obstacle sur la ligne de vue. Des informations complémentaires sur les aspects techniques liés à l'exécution des missions drone avec le Falcon sont disponibles dans Semeki *et al.* (2016a : 2 ; 2016b : 5).

1.3. Acquisition des images

Les données ont été acquises au cours de trois campagnes de vols dans les trois terroirs villageois. Dans un premier temps, les zones d'étude ont été délimitées en suivant une approche de cartographie participative menée avec les villageois (Larzillière *et al.* 2013). Une première série de 15 vols de détection (4 en mode « vidéo » et 11 autres pour les vols « images fixes ») a été ensuite réalisée entre les mois d'août et de septembre 2014. Le drone équipé de la caméra vidéo a été piloté manuellement à des altitudes allant de 150 à 400 m de la hauteur du sol pour repérer les zones anthropisées et circonscrire leur emplacement. Des vols d'acquisition des photographies ont été ensuite effectués à une hauteur allant de 100 à 250 m en vue d'évaluer l'impact de la très haute résolution (< 10 cm/pixel) sur la capacité à discriminer des éléments anthropiques. Dans un second temps, les sites d'étude ont été survolés entre mars et avril 2015 au cours de 6 vols afin de cartographier et surveiller les différentes activités humaines détectées. Les espaces occupés par les cultures saisonnières de Gbere ont été également cartographiés en juillet 2015 pour pouvoir évaluer la capacité de mini-drones à réaliser une cartographie et une surveillance rapide de la dynamique des terroirs villageois dans les aires protégées de forêts et savanes tropicales. L'ensemble des vols a été organisé par deux opérateurs, l'un pour observer la station de contrôle et l'autre pour fixer l'antenne.

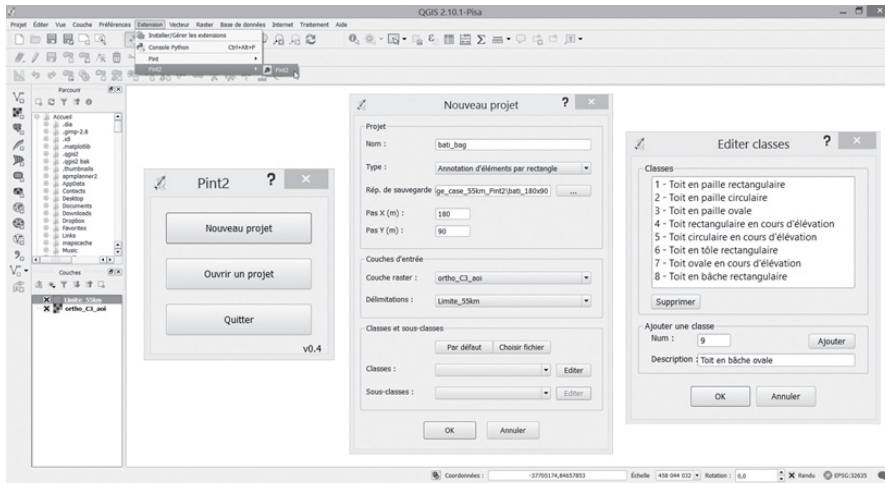
1.4. Traitement et analyse des images

La procédure de traitement des images acquises comprend, selon le cas, les étapes de géoréférencement, d'orthorectification, de mosaïquage, de découpage et de segmentation en vue de leur analyse en fonction de chaque application explorée dans cette étude.

Les images extraites des vidéos ont été géoréférencées par synchronisation des heures d'acquisition des vidéos avec le temps enregistré dans le fichier de position du vol. Quant aux images fixes, leur géoréférencement a été effectué à l'aide des informations de vol fournies par le logiciel de planification Mission Planner (version 1.3.31). Ces images ont ensuite été orthorectifiées et mosaïquées, en suivant une procédure en trois étapes dont l'alignement, la construction du modèle 3D et la création d'une ortho-image (Agisoft 2015). Pour chaque site d'étude, un masque délimitant la zone d'intérêt centrée sur les zones anthropisées a été défini sur l'ortho-image.

Dans le cas des images temporelles acquises à Gbere, chaque ortho-image découpée de la sorte a été segmentée au moyen de l'algorithme multi-résolution du logiciel eCognition Developer 9 (Blaschke 2010) afin de faciliter et d'objectiver le travail de délimitation des unités d'occupation des sols. Les couches de segments ainsi produites ont été photo-interprétées de manière exhaustive par un même opérateur ayant une bonne connaissance du terrain et disposant d'une série de points GPS prélevés sur le terrain en vue de la reconnaissance des différentes utilisations du sol. Le choix de l'approche cartographique basée sur une analyse visuelle se justifie par la très haute résolution spatiale des ortho-images (10 cm/pixel), la faible résolution spectrale (image RVB seulement), mais aussi la très grande hétérogénéité des éléments à identifier. Des compléments d'information sur la procédure de traitement et d'analyse d'images réalisée pour étudier la dynamique d'occupation des sols sont disponibles dans Semeki *et al.* (2016b).

Pour recenser les habitations villageoises, les extraits des ortho-images acquises à Zambaleke et Bagulupka ont été analysés en utilisant une application (PINT pour Photo-INTerprétation) développée par nos soins dans l'environnement du logiciel open source QGIS (Semeki *et al.* 2018). Le processus de photo-interprétation et de traitement des résultats sur le recensement exhaustif des objets (ici, les habitations) à l'aide de cette application comprend les étapes suivantes : la génération d'un réseau de cellules rectangulaires, la création du dictionnaire des classes constitutives de la légende, la réalisation de la phase de photo-interprétation proprement dite, la création d'un fichier au format shapefile, et la génération d'un fichier au format .csv contenant une synthèse des résultats. La figure 3 présente les différentes boîtes de dialogue constituant l'interface de l'outil PINT. Pour caractériser la dispersion des habitations par rapport à la route principale, les couches de points localisant ces constructions ont été croisées avec une couche raster définissant la distance euclidienne à la route principale de chaque village. Ce croisement a été réalisé avec la commande « Point sampling tool » de QGIS ; la couche représentant la distance a été produite avec la commande « Proximity » du même logiciel.

Figure 3 : illustration des boîtes de dialogue de l'outil PINT

Source : Jean Semeki.

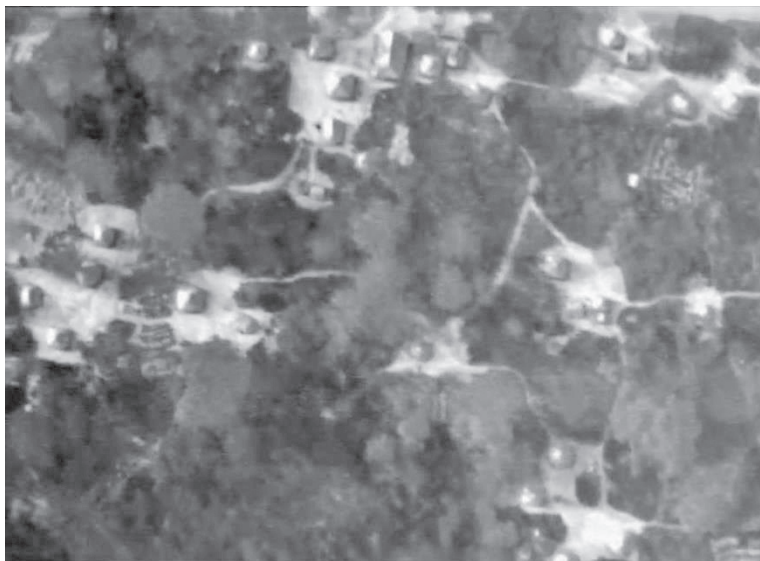
2. Résultats

2.1. Détection des activités humaines

Les tests de détection menés au cours de 15 vols ont montré que différentes activités humaines et divers objets peuvent être détectés à l'aide des mini-drones jusqu'à une hauteur de vol de 350 m en mode vidéo. C'est notamment le cas des zones défrichées par l'agriculture itinérante sur brûlis, des habitations, du sol nu, du feu, des pistes ou des routes. La visibilité de ces éléments est particulièrement commode sur les images thermiques car ces surfaces réfléchissent une part importante du rayonnement électromagnétique (figure 4). Les séquences de vidéo retransmises en direct ont également permis de localiser les sites d'exploitation minière artisanale à une hauteur de 270 m (figure 5).

Par rapport aux images vidéo, les zones impactées par les activités humaines sont plus facilement détectables sur les photos aériennes (figure 6), leur résolution spatiale étant de 8 cm/pixel. Le sol mis à nu lors des activités minières ressort d'une manière particulièrement claire sur cette photo de drone. Ces images permettent même de reconnaître certaines cultures vivrières, y compris celles du manioc, du riz ou du maïs (figure 7). De telles données peuvent aider les acteurs de conservation à identifier les empiètements au sein des aires protégées à l'échelle de terroirs villageois et donc de faciliter la prise de contact, les négociations et la décision dans une perspective de gestion adaptative.

Figure 4 : détectabilité des maisons, sol nu et pistes avec l'image thermique du drone Falcon à Zambaleke



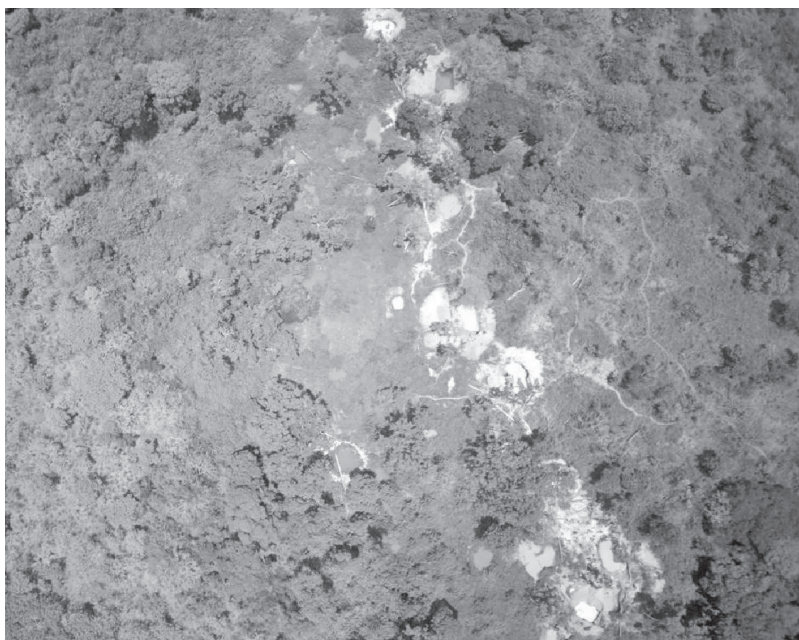
Source : Julie Linchant et Jean Semeki.

Figure 5 : détection des sites d'orpaillage artisanal avec l'image thermique du drone Falcon à Gbere



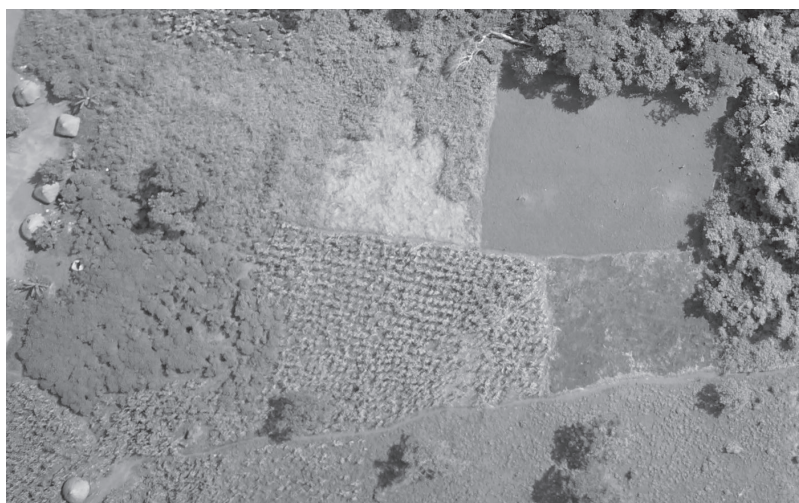
Source : Julie Linchant et Jean Semeki.

Figure 6 : visibilité des sites d’orpaillage artisanal sur la photo aérienne du drone Falcon à Gbere (résolution de 8 cm/pixel)



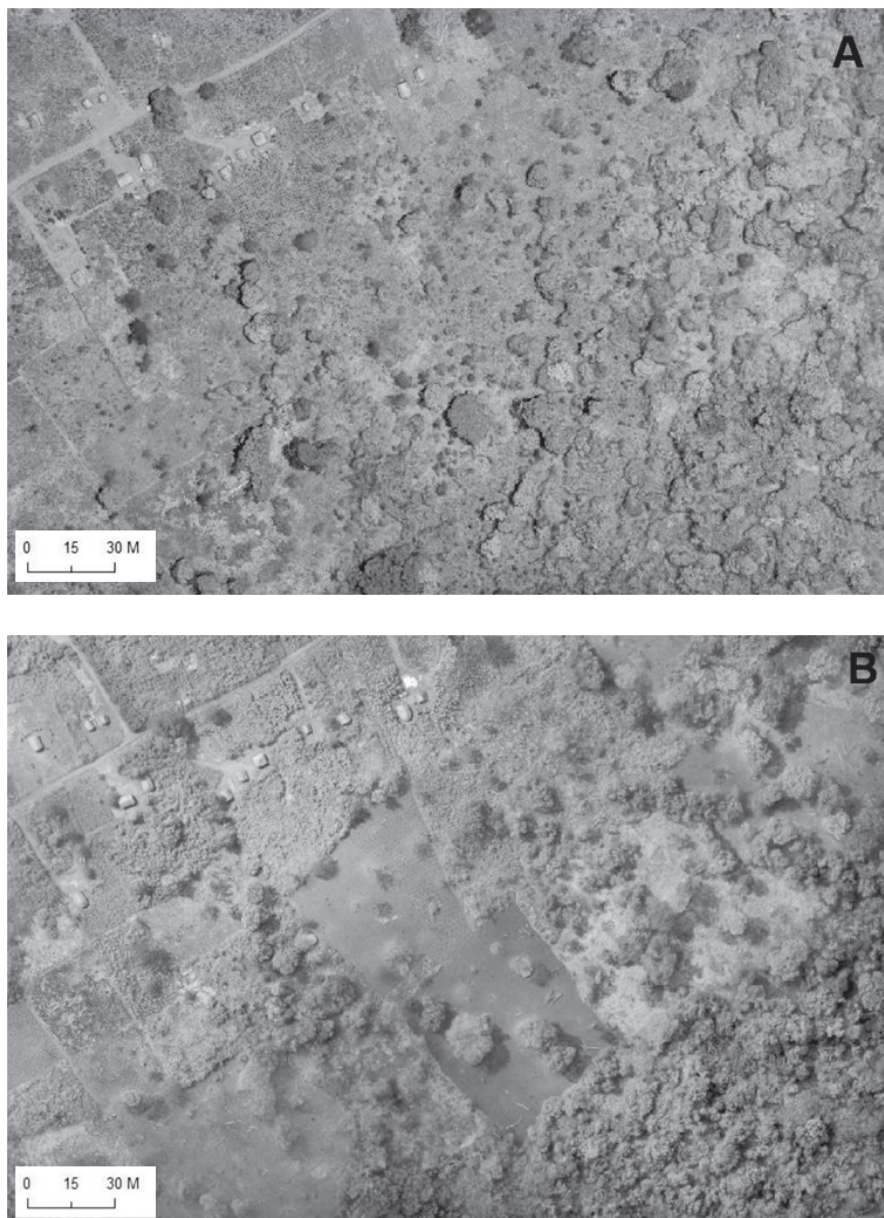
Source : Julie Linchant et Jean Semeki.

Figure 7 : détectabilité de divers objets acquis avec des photos aériennes par drone Falcon : sol nu, maisons, défriches, brûlis, cultures vivrières (manioc, maïs), jachère et forêts (résolution de 8 cm/pixel)



Source : Julie Linchant et Jean Semeki.

Figure 8 : extrait des ortho-images illustrant un paysage fortement anthropisé à Gbere entre avril 2015 (A) et juillet 2015 (B) ; images acquises avec le drone Falcon



Source : Julie Linchant et Jean Semeki.

2.2. Surveillance rapide de l'évolution des terroirs villageois

Des images diachroniques acquises sur le terroir villageois de Gbere ont permis d'identifier des modifications d'utilisation des terres en rapport avec les pratiques de l'agriculture itinérante sur brûlis entre les mois d'avril et juillet 2015 (Semeki *et al.* 2016b). Sur une zone d'étude de 114 ha extraite à partir des ortho-images produites entre les deux dates (figure 8), l'étendue des zones des forêts et savanes est passée de 86,6 à 80,1 ha, les jachères de 16,9 à 8,2 ha et les défriches de 4,1 à 10,0 ha. Les cultures saisonnières ont, quant à elles, augmenté de 3,2 à 11,8 ha. Les 6,5 ha de forêts et savanes manquants ont été convertis en défriches (4,2 ha) et mis en cultures (1,4 ha), la différence (0,9 ha) étant formée de bouquets d'arbres isolés se retrouvant dans l'agro-écosystème. Les surfaces occupées par les jachères, transformées en zones défrichées (4,8 ha) et en cultures saisonnières (4,6 ha), ont connu une diminution d'environ 50 % soit 8,7 ha. Les images acquises avec le mini-drone à des périodes différentes sur un même terroir permettent donc de documenter l'évolution de l'affectation des terres au sein du terroir.

2.3. Recensement et caractérisation de la typologie des habitations villageoises

Les vols réalisés dans les villages de Zambaleke et Bagulupka, couvrant respectivement une zone d'intérêt de 217 ha et 732 ha, ont démontré qu'il est possible d'inventorier les implantations humaines à l'aide d'un mini-drone au sein des aires protégées. Un total de 308 et 461 habitations villageoises ont été recensées respectivement sur les deux sites. La proportion de maisons avec toit construit est de 81,8 % (n = 252) et 89,4 % (n = 412) respectivement pour le village de Zambaleke et celui de Bagulupka, alors que celle de maisons avec toit en construction est respectivement de 18,2 % (n = 56) et 10,6 % (n = 49) pour ces deux villages. La proportion plus élevée de bâtiments en construction dans le village de Zambaleke s'explique par la présence d'un poste militaire en cours d'installation et comportant 31 bâtiments.

Si l'on considère le type de matériaux utilisés (tableau 1), les toits en paille (figure 9) sont largement majoritaires (signe d'attachement des populations locales à leur tradition), avec respectivement 98,8 % et 97,6 % de constructions à Zambaleke et Bagulupka. Les installations dotées d'un toit en bâche peuvent être considérées comme marginales, puisqu'elles ne représentent que 1,2 % des bâtiments construits. Enfin, les maisons dotées d'un toit en tôle, qui nécessitent une disponibilité financière pour l'achat et le transport des matériaux, sont très rares, voire inexistantes : aucun toit en tôle n'est recensé à Zambaleke et seulement 5 ont été dénombrés à Bagulupka soit 1,2 % de constructions inventoriées sur ce deuxième site.

Tableau 1 : fréquence absolue et relative par type de matériaux utilisés pour la construction de toits dans deux sites d'études (données acquises avec le Falcon)

Site	Type de matériaux	Nombre de maisons	%
Zambaleke	Bâche	3	1,2
	Paille	249	98,8
	Tôle	0	0,0
	Total	252	100,0
Bagulupka	Bâche	5	1,2
	Paille	402	97,6
	Tôle	5	1,2
	Total	412	100,0

Source : Jean Semeki.

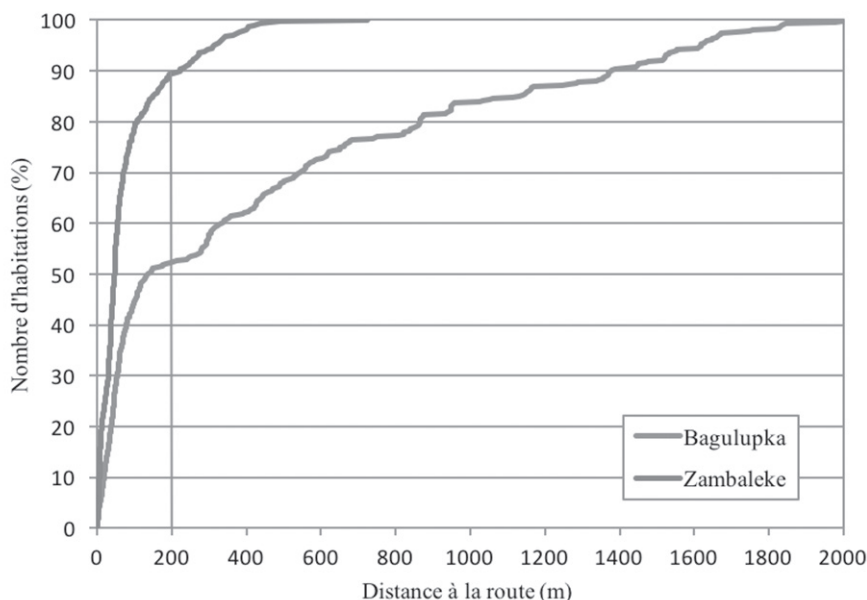
Figure 9 : habitations villageoises cartographiées avec le drone Falcon à Zambaleke



Source : Julie Linchant et Jean Semeki.

L'analyse de la distribution spatiale des habitations inventoriées a montré que dans le premier site (Zambaleke), près de 90 % des maisons sont situées à moins de 200 m de la route principale, les 10 % restants étant dispersés jusqu'à 700 m de la route. Dans le second village (Bagulupka), la proportion des habitations situées à moins de 200 m de la route tombe à 50 %, l'autre moitié étant disséminée dans la brousse jusqu'à 2000 m de la route centrale (figure 10).

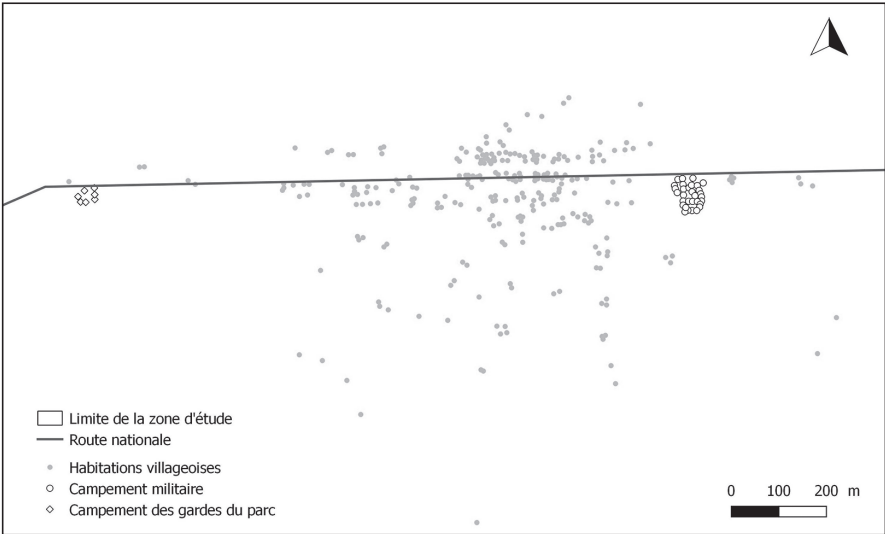
Figure 10 : dispersion des habitations villageoises par rapport à la route centrale dans les villages de Zambaleke et Bagulupka



Source : Jean Semeki.

Zambaleke présente ainsi la configuration d'un village linéaire peu dispersé, où les maisons sont plus ou moins alignées le long d'un axe routier central (figure 11), alors que le village de Bagulupka, pour sa part, comporte un premier noyau compact de 220 habitations (48 %) situé à proximité de la route. Le reste des habitations est disséminé par petits groupes correspondant aux unités familiales communément appelées « *Mboka* » (figure 12).

Figure 11 : répartition des habitations par rapport à la route principale dans le village de Zambaleke



Source : Jean Semeki.

Figure 12 : répartition des habitations par rapport à la route principale dans le village de Bagulupka



Source : Jean Semeki.

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par les levées de points GPS (*Global positioning system*) au sol sur les mêmes sites permet de conclure que l'approche drone est plus efficace pour une cartographie rapide des villages. Le temps global de mise en œuvre de la méthode drone est de 11 h de temps opérateur et 7 h de temps machine pour les deux sites totalisant 950 ha, soit une productivité de l'ordre de 86 ha par heure d'opérateur. Par contre, la levée des points GPS au sol réalisée par les responsables du Parc de la Garamba a nécessité la mobilisation de deux enquêteurs dans chaque village pendant deux journées consécutives (Balimbaki 2015).

3. Discussion

3.1. Capacité opérationnelle des drones

La surveillance est essentielle pour la conservation des aires protégées, et cette étude a démontré que la technologie drone peut constituer une solution complémentaire et préalable aux approches au sol. Le matériel utilisé est facilement transportable dans deux sacs à dos. Il peut donc être utilisé dans des endroits difficilement accessibles.

Malgré certaines difficultés techniques rencontrées telles que la communication radio parfois déficiente et les surchauffes de matériel, cette technologie présente les qualités requises pour opérer dans un environnement tropical de type forêt-savane et pour y réaliser des missions d'observation préalables dans un contexte sécuritaire parfois relativement difficile comme celui de la RDC. La capacité de déploiement rapide des drones permet de couvrir l'ensemble d'un terroir villageois de quelques centaines à plusieurs milliers d'hectares en un, voire quelques vols successifs réalisables au cours d'une journée (en moyenne quatre vols/j.), avec une équipe limitée (deux personnes). Alors que l'accessibilité aux données de qualité représente une des contraintes majeures limitant le suivi de l'état d'habitat des aires protégées (Turner *et al.* 2015 : 1), la technologie drone peut ainsi aider les gestionnaires à obtenir rapidement des informations précises et actualisées, facilitant ainsi les prises de décisions.

3.2. Opportunités de l'imagerie drone

Les résultats obtenus lors de différents tests ont clairement mis en évidence l'utilité de l'imagerie drone pour la détection et la surveillance des activités humaines au sein des aires protégées de forêts et savanes tropicales typiques de la RDC, que ce soit en mode vidéo ou encore avec les photographies. La vidéo retransmise en direct permet de repérer à distance les endroits survolés, particulièrement les zones anthropisées. La visibilité des surfaces dénudées ou d'autres objets réfléchissant une part importante de l'énergie est remarquable sur les images acquises avec la caméra thermique.

Cette capacité de détection, associée à la flexibilité des drones, représente une application intéressante pour les inspections en temps réel des activités en cours, préalablement au déploiement plus ciblé des équipes de terrain.

Dans le cas particulier de l'identification des zones impactées par l'orpaillage artisanal, cette fonctionnalité constitue un apport considérable. La plupart des aires protégées sont en effet menacées par l'expansion de l'activité minière artisanale et informelle, conduisant particulièrement à la déforestation et la dégradation de l'habitat (Potapov *et al.* 2012 : 6 ; Butsic *et al.* 2015). La détection précoce de ces sites rendue possible à partir des drones permettrait aux gestionnaires d'amorcer des processus de négociation et de déplacement anticipés, socialement plus acceptables s'ils sont initiés rapidement.

Les photos aériennes acquises au cours de différents vols ont par ailleurs démontré que la technologie drone offre un potentiel comme outil de surveillance de la dynamique de terroirs villageois au sein des aires protégées. Les données de qualité qu'elle fournit (résolution spatiale centimétrique) permettent d'évaluer en détail l'évolution d'occupation des sols au niveau communautaire et d'en assurer une surveillance rapide. Un tel outil de cartographie représente une réelle opportunité dans la mise en œuvre des stratégies de gestion adaptative des aires protégées en RDC. Son usage peut notamment aider à obtenir de précieux renseignements sur les zones les plus dégradées et les mesures à déployer. Des zones cibles peuvent être cartographiées à plusieurs reprises pour surveiller les changements potentiels dans l'utilisation des terres, en particulier là où les contraintes techniques et logistiques ont conduit à l'empiétement de l'habitat naturel.

Dans le cadre de la mise en œuvre de processus REDD+ (Réduction des Émissions dues à la Déforestation et la Dégradation des forêts), la technologie drone permet de mesurer de manière précise les petites surfaces défrichées par les populations locales. Elle pourrait donc être utilisée pour fournir une documentation régulière sur l'état des forêts, notamment en vue de justifier les paiements pour services environnementaux.

3.3. Dynamique sociale

La typologie des habitations et des villages représente l'indicateur par excellence de la vie rurale traditionnelle, permettant de comprendre les contextes socio-culturel et économique passés et actuels des populations villageoises (Hecketsweiler *et al.* 1991 : 97). Dans le contexte particulier de la RDC, où les aires protégées sont fréquemment occupées par des personnes déplacées suite à des conflits armés (Misser 2013), la documentation et le suivi des implantations humaines constituent un défi important pour les gestionnaires.

L'intérêt des drones réside principalement dans le gain de temps pour la collecte des données spatiales, la relative sécurité des opérateurs, mais également dans une meilleure garantie de complétude du recensement, en raison de la vue d'ensemble offerte par l'ortho-image permettant de réaliser une cartographie rapide des habitations villageoises. La résolution de l'imagerie drone (8 cm/pixel) permet de caractériser le type de matériaux utilisés pour confectionner les toits des habitations. La prédominance des constructions en paille observée dans notre cas d'étude, bien que traditionnelle, traduit l'utilisation dans cette zone d'un type d'habitat « provisoire », justifié par la présence de groupes armés ; il s'agit d'un habitat construit à la hâte et que l'on abandonne facilement (Balimbaki 2015). La dispersion de l'habitat constatée sur les deux sites serait également la résultante des agressions perpétrées par la LRA (Lord's resistance army), ayant amené les populations à s'installer de manière dispersive à l'intérieur des aires protégées. Ce mode d'occupation du sol a été également rapporté dans d'autres aires protégées de la RDC (Molinario *et al.* 2015 : 8). Il constitue une menace pour la conservation, car il dégrade l'habitat naturel. Cela nécessite de la part des gestionnaires des outils simples et appropriés, qui sont relevés dans cette étude, afin de repérer très tôt les implantations humaines et d'éviter leur installation définitive.

3.4. Défis liés aux drones

Défis environnementaux, technologiques et techniques

L'utilisation de mini-drones pour la télédétection environnementale est confrontée à un certain nombre de défis qui nécessitent d'être surmontés dans le but d'améliorer l'efficacité des opérations lors de l'acquisition des images et des traitements photogrammétriques. Parmi les contraintes rencontrées lors de cette étude, on notera notamment les problèmes de communication radio, les surchauffes de composants du drone, les difficultés d'assemblage d'images uniquement acquises en zone forestière et l'automatisation de l'analyse des données. Les conditions de l'environnement naturel et météorologique, la relative petite charge utile et l'instabilité du drone, ainsi que la basse résolution spectrale d'images sont les principales causes de ces difficultés d'assemblage (Hardin & Jensen 2011 ; Paneque-Gálvez *et al.* 2014).

Le Falcon a été testé dans un environnement forêt-savane où la communication radio entre le drone et la station de contrôle au sol a constitué une des principales limitations (au-delà de 3 km). La canopée forme un écran aux ondes, la plupart des mini-drones étant seulement exploités à basse fréquence (1-3 GHz) en raison des restrictions réglementaires (Colomina & Molina 2014 : 4). Les vols réalisés ont montré que pour améliorer la communication, il serait opportun de voler à une hauteur plus élevée (par exemple,

250 m). Les températures, parfois extrêmes dans la région de la Garamba (25 °C ; Balimbaki 2015 : 14), ont occasionné des surchauffes de certains composants du drone. Ces problèmes sont inévitables compte tenu de la fragilité des matériaux utilisés dans la fabrication des mini-drones (Hardin & Jensen 2011 : 4). L'amélioration continue du système est un atout afin de relever ce défi. Suite à nos remarques, le fournisseur du Falcon a peint l'appareil en blanc, alors que la teinte initiale était noire.

Des difficultés ont été également rencontrées lors de la phase d'assemblage des images acquises à basse hauteur (100 à 200 m) en zone forestière. Leur très fine résolution (2-3 cm/pixel) ne permit pas au logiciel de trouver un nombre suffisant de points homologues de bonne qualité. Ce phénomène a conduit au rejet des photos de ces vols. Koh & Wich (2012) ont également décrit les mêmes difficultés dans l'assemblage des photos de forêts acquises à basse hauteur (100-180 m) en Indonésie. Pour relever ce défi, tel que suggéré par Kakaes *et al.* (2015 : 41) et sur la base des résultats de cette étude, afin de mener à bien les missions de cartographie avec les mini-drones en zone boisée, nous recommandons une hauteur de vol plus élevée (250 m), car elle permet d'assurer un bon compromis entre le niveau de détail des images obtenues et l'efficacité du traitement photogrammétrique. Cette hauteur a été expérimentée au cours de dix vols de cartographie et surveillance des terroirs réalisés avec le Falcon dans nos sites d'études. Des hauteurs de vol élevées permettent également de réduire l'erreur spatiale due au déplacement radial des objets tels que les arbres (Barazzetti *et al.* 2014 : 1).

Les taux de recouvrement longitudinal de 60 % et latéral de 40 %, appliqués au cours des vols tests de détection avec le Falcon, ont été jugés insuffisants et étaient également à la base des impossibilités d'alignement d'un grand nombre de photos avec le logiciel Agisoft Photoscan. Ces déficits sont liés à la petite empreinte des images drones et à l'instabilité de l'aéronef face aux mouvements ascendants. Le vent très important dans la région de la Garamba (>20 km/h) a en effet conduit à une variation des angles de prise de vue et par conséquent à des trous dans le recouvrement. Des taux de recouvrement longitudinal d'au moins 80 % et latéral de 70 %, appliqués lors de la deuxième campagne de collecte des données, ont produit des résultats satisfaisants (Semeki *et al.* 2016b ; 2018). Ils doivent être considérés dans la planification des vols pour assurer la réussite des opérations drones, notamment lors de l'acquisition des images et des traitements photogrammétriques. De tels recouvrements permettent également de couvrir une surface approximative de 900 ha pour un vol d'une durée d'environ 1 h, élément pouvant compenser l'entendue relativement faible couverte par un seul vol.

En outre, la caméra RVB utilisée dans cette étude fournit des images en vraies couleurs ayant une très faible résolution spectrale, ce qui limite l'usage d'algorithmes de classification automatique. Cette contrainte est

commune à la plupart des mini-drones, compte tenu de leur faible poids ne permettant d'embarquer qu'une petite charge utile (capteur ; Hardin & Jensen 2011 ; Paneque-Gálvez *et al.* 2014 : 12). Ces limitations sont cependant compensées par la très haute résolution spatiale d'images (Whitehead *et al.* 2014), laquelle nous a permis de développer des approches de photo-interprétation exhaustive et simple pour cartographier et surveiller les terroirs villageois dans les zones d'étude. Le recours à ces applications prêtes à l'emploi ne nécessite pas une grande expertise technique pour réaliser les différents traitements. La technologie drone étant cependant en perpétuelle amélioration (Whitehead & Hugenholtz 2014 : 2), l'arrivée de capteurs multi-spectraux compacts, utilisables sur des mini-drones, augure des perspectives intéressantes dans l'utilisation des chaînes de traitement d'images plus automatisées.

Défis économiques

Malgré ces limitations, dans le contexte particulier de la RDC, où certaines contraintes techniques, logistiques, sécuritaires ou encore financières rendent difficile le suivi régulier des pressions anthropiques au sein des aires protégées, les approches de cartographie et de surveillance des activités humaines développées dans le cadre de cette étude peuvent venir en aide aux gestionnaires et autres acteurs de conservation afin d'améliorer la gouvernance dans ce secteur. L'utilisation, par exemple, de l'outil PINT dans un environnement *open source* en liaison avec l'imagerie drone constitue une opportunité comme outil de monitoring simple à mettre en œuvre, peu coûteux, indépendant d'une liaison internet pour le suivi des zones anthropisées d'étendues de quelques dizaines de km² au sein des aires protégées. Cette fonctionnalité semble être très pertinente dans la mesure où la plupart des aires protégées en RDC se trouvent dans des régions très reculées, où la qualité insuffisante des connexions internet et le coût lié à l'achat des logiciels d'analyse des données empêchent les utilisateurs d'accéder aux outils de monitoring de l'utilisation des terres disponibles en ligne. En outre, les mini-drones fonctionnent avec une équipe très réduite (deux opérateurs). Toutefois, l'analyse des coûts financiers des opérations de surveillance des activités humaines par drone dans les aires protégées n'a pas été abordée dans le cadre de cette étude, et nécessiterait d'autres investigations afin de déterminer le coût total de telles opérations.

Défis politiques, sociaux et réglementaires liés à l'utilisation des drones en RDC

En dépit des opportunités qu'offre la technologie drone relevées dans cette étude, les missions réalisées sur le terrain ont démontré que son utilisation peut être freinée en raison de contraintes politiques, sociales et réglementaires. Dans un pays comme la RDC, dont le contexte sociopolitique

est caractérisé par des conflits récurrents, pour la plupart des institutions et des acteurs – et particulièrement les services de sécurité et les hommes politiques –, les drones ont une forte connotation militaire. En l'absence d'une réglementation spécifique régissant leur utilisation, la conduite de la présente étude a nécessité de nombreuses autorisations auprès des autorités politico-administratives (Agence nationale de renseignements, Gouvernorat de l'ex-Province-Orientale, Direction générale de l'ICCN) et coutumières. Le consentement des populations locales des villages survolés a requis l'organisation de séances d'information et de sensibilisation afin d'expliquer l'intérêt de cette technologie dans le suivi des terroirs villageois. Cette communication s'est traduite par un enthousiasme et une grande curiosité de la part des populations lors de chaque décollage.

Dans la mesure où la technologie drone présente des perspectives intéressantes pour améliorer la gouvernance des aires protégées en RDC, il est recommandé qu'une législation spécifique prévoyant une place pour tous les acteurs concernés par un survol et détaillant la chaîne de prise de décision soit développée. Un tel projet de loi vient d'être initié par le ministère de l'Environnement et du Développement durable afin de consolider l'ensemble des initiatives mises en œuvre quant au processus de la REDD+.

Par rapport à d'autres pays d'Afrique, les travaux de recherches menés récemment par le Centre technique de Coopération agricole et rurale (CTA) sur les réglementations en matière de drones dans les pays d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique, révèlent que seule l'Afrique du Sud dispose à présent d'une réglementation spécifique en vigueur. Par ailleurs, d'autres pays, tels que le Sénégal et le Kenya, ont toutefois interdit l'usage à caractère civil des drones en l'absence d'autorisation explicite des autorités (Jeanneret 2016). Selon cette même source, d'autres pays (non mentionnés) disposent d'un éventail de formulaires, manuels et produits d'information. Enfin, de nombreux pays n'ont pris aucune disposition liée à l'utilisation civile de drones.

Conclusion

Ce travail a mis en évidence l'une des premières tentatives d'utilisation d'un mini-drone pour la surveillance des activités humaines au sein des aires protégées de forêts et savanes de RDC. Les résultats obtenus montrent que cette technologie offre un potentiel comme outil permettant de surveiller fréquemment les empiètements humains et peut donc venir en aide aux aires protégées de la RDC menacées par toutes sortes de pressions anthropiques. Leur capacité à se déployer rapidement et à fournir des images d'une très haute résolution offre la possibilité de détecter des activités humaines et des objets précis, de réaliser une cartographie minutieuse et une surveillance rapide de la dynamique de terroirs villageois ainsi que le recensement et la

caractérisation des habitations villageoises au sein des aires protégées. Cette capacité des mini-drones constitue une des réponses aux besoins actuels exprimés par divers acteurs pour relever le défi lié au suivi des aires protégées du pays en vue d'améliorer la prise de décision dans une perspective de gestion adaptative. La mise en œuvre opérationnelle nécessite cependant une appropriation de l'outil de la part de l'ensemble des acteurs de la conservation et une implication personnelle des décideurs. Notons enfin que cette technologie n'est qu'un support de débat, une base pour la négociation d'enjeux complexes autour de l'affectation des terres en RDC.

Remerciements

La présente étude a été réalisée dans le cadre du projet WiMUAS (Wildlife Monitoring with Unmanned Aerial Systems) développé par Gembloux Agro-Bio Tech, avec le financement du CIFOR (Centre de Recherche forestière internationale), et l'Union européenne pour le projet FCCC (Forêts et Changement climatique au Congo). Les auteurs tiennent à exprimer leur profonde gratitude envers ces institutions. Nos remerciements s'adressent également au bureau d'étude R&SD (Ressources & Synergies Development) pour son apport logistique dans l'exécution de cette recherche. Enfin, nous tenons à remercier l'Institut congolais pour la Conservation de la Nature (ICCN) et African Parks Network pour avoir accepté ce projet au Parc national de la Garamba ainsi que pour leur appui logistique et sécuritaire lors de la collecte des données.

Bibliographie

- Agisoft. 2015. « Agisoft PhotoScan. Manuel de l'utilisateur. Professional Edition, version 1.1 ». En ligne : http://www.agisoft.com/pdf/manuals_other/pscan_pro_fr_1_1.pdf
- Anderson, K. & Gaston, K. 2013. « Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology ». *Frontiers Ecology Environment* 11 (3) : 138-146.
- Balimbaki, K.A. 2015. « Étude socio-économique dans les trois domaines de chasse contigus au Parc national de la Garamba ». ICCN, African Parks Network, Nagero.
- Barazzetti, L., Brumana, R., Oreni, D., Previtali, M. & Roncoroni, F. 2014. « True-orthophoto generation from UAV image: implementation of a combined photogrammetric and computer vision approach ». *ISPRS Annals Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* 2 (5) : 57-63.
- Bey, A., Díaz, A.S.-P., Maniatis, D., Marchi, G., Mollicone, D., Ricci, S., Bastin, J.-F., Moore, R., Federici, S., Rezende, M., Patriarca, C., Turia, R., Gamoga, G., Abe, H., Kaidong, E. & Miceli, G. 2016. « Collect earth: land use and land cover assessment through augmented visual interpretation ». *Remote Sensing* 8 : 807.
- Butsic, V., Baumann, M., Shortland, A., Walker, S. & Kuemmerle, T. 2015. « Conservation and conflict in the Democratic Republic of Congo: the impacts

- of warfare, mining, and protected areas on deforestation ». *Biological Conservation* 191 : 266-273.
- Blaschke, T. 2010. « Object based image analysis for remote sensing ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 (1) : 2-16.
- Colomina, I. & Molina, P. 2014. « Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92 : 79-97.
- De Saeger, H. 1954. « Introduction ». *Exploration du Parc national de la Garamba*. Bruxelles : Institut des Parcs nationaux du Congo belge.
- Dudley, N. (éd.). 2008. *Lignes directrices pour l'application des catégories de gestion aux aires protégées*. Gland : UICN.
- Hardin, P.J. & Jensen, R.R. 2011. « Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: challenges and opportunities ». *GIScience & Remote Sensing* 48 (1) : 99-111.
- Hecketsweiler, P., Doumenge, C. & Mokoko Ikonga, J. 1991. *Le Parc national d'Odzala Congo*. Gland : UICN.
- Jeanneret, C. 2016. « Mieux comprendre la réglementation en matière de drones ». In C. Addison, G. Rambaldi, F. Greenwood & E.-J. Quak (éd.), *Les Drones au service de l'agriculture*. Wageningen : ICT Update, 82, pp. 22-23.
- Jones, D., Hansen, A.J., Bly, K., Doherty, K., Verschuyt, J.-P., Paugh, J.I., Carle, R. & Story, S.J. 2009. « Monitoring land use and cover around parks: a conceptual approach ». *Remote Sensing of Environment* 113 : 1346-1356.
- Kakaes, K., Greenwood, F., Lippincott, M., Meier, P. & Wich, S. (éd.) 2015. « Drones and aerial observations: new technologies for property rights, human rights, and global development a primer ». Washington : New America.
- Koh, L.P. & Wich, S.A. 2012. « Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation ». *Tropical Conservation Science* 5 (2) : 121-132.
- Laliberte, A.S., Goforth, M.A., Steele, C.M. & Rango, A. 2011. « Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: image processing workflows and applications for rangeland environments ». *Remote Sensing* 3 : 2529-2551.
- Larzillière, A., Vermeulen, C., Dubiez, E., Yamba Yamba, T., Diowo, S. & Mumbere, G. 2013. « La maquette interactive, un outil novateur de participation ». *Bois et Forêts des Tropiques* 315 (1) : 21-28.
- Linchant, J., Lisein, J., Semeki, N.J., Lejeune, P. & Vermeulen, C. 2015. « Are unmanned aircraft systems (UASs) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and challenges ». *Mammal Review* 45 : 239-252.
- Linchant, J., Lhoest, S., Quevauvillers, S., Lejeune, P., Vermeulen, C., Semeki Ngabinzeke, J., Luse, B.B., Delvingt, W. & Bouché, P. 2018. « UAS imagery reveals new survey opportunities for counting hippos ». *PLoS ONE* 13 (11) : e0206413.
- Misser, F. 2013. « Les aires protégées en République démocratique du Congo : menaces et défis. L'action de l'Union européenne ». *Parcs & Réserves* 68 (3) : 1-51.
- Molinario, G., Hansen, M. C. & Potapov, P.V. 2015. « Forest cover dynamics of shifting cultivation in the Democratic Republic of Congo: a remote sensing based assessment for 2000-2010 ». *Environmental Research Letters* 10 (9).

Nackoney, J., Molinario, G., Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M.C. & Furuichi, T. 2014. « Impacts of civil conflict on primary forest habitat in northern Democratic Republic of the Congo, 1990-2010 ». *Biological Conservation* 170 : 321-328.

Oleiree-Oltmanns, S., Marzolf, I., Klaus, D.P. & Ries, J.B. 2012. « Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco ». *Remote Sensing* 4 : 3390-3416.

Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (Unesco). 2010. *Patrimoine mondial dans le bassin du Congo*. Paris : Centre du patrimoine mondial de l'Unesco.

Paneque-Gálvez, J., McCall, M.K., Napoletano, B.M., Wich, S.A & Koh, L.P. 2014. « Small drones for community-based forest monitoring: an assessment of their feasibility and potential in tropical areas ». *Forests* 5 : 1481-1507.

Pélissier, C., De Marcken, P., Mapilanga wa Tsaramu, J.J. & Wilungula, B.C. 2015. « République démocratique du Congo ». In C. Doumenge, F. Palla, F. Hiol Hiol & Larzillière, A. (éd.), *Aires protégées d'Afrique centrale. État 2015*. Kinshasa/Yaound : OFAC, pp. 111-147.

Phalan, B., Bertzky, M., Butchart, S.H.M., Donald, P.F., Scharlemann, J.P.W., Stattersfield, A.J. & Balmford, A. 2013. « Crop expansion and conservation priorities in tropical countries ». *PloS ONE* 8 (1) : e51759.

Pierzchala, M., Talbot, B. & Astrup, R. 2014. « Estimating soil displacement from timber extraction trails in steep terrain: application of an unmanned aircraft for 3D modelling ». *Forests* 5 : 1212-1223.

Potapov, P.V., Turubanova, S.V., Hansen, M.C., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., Mane, L. & Justice, C.O. 2012. « Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data ». *Remote Sensing of Environment* 122 : 106-116.

Rango, A., Laliberte, A., Herrick, J.E., Winters, C., Havstad, K., Steele, C. & Browning, D. 2009. « Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management ». *Journal of Applied Remote Sensing* 3 : 033542.

Semek, N.J., Linchant, J., Quevauvillers, S., Kahindo, J.M.M., Lejeune, P. & Vermeulen, C. 2016a. « Potentiel des véhicules aériens sans pilote dans la détection des activités humaines illégales dans les aires protégées en RDC ». *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 4 : 151-159.

Semek, N.J., Linchant, J., Quevauvillers, S., Kahindo, J.M.M., Lejeune, P. & Vermeulen, C. 2016b. « Cartographie de la dynamique de terroirs villageois à l'aide d'un drone dans les aires protégées de la République démocratique du Congo ». *Bois et Forêts des Tropiques* 330 (4) : 69-83.

Semek, N.J., Pitchugin, M., Linchant, J., Vermeulen, C., Kahindo, M.J.-M. & Lejeune, P. 2018. « Une méthode simple et rapide pour l'évaluation de statistiques d'occupation du sol à l'aide d'images à très haute résolution acquises par mini-drone ». *Bois et Forêts des Tropiques* 335 (1) : 15-23.

- Svancara, L.K., Scott, J.M., Loveland, T.R. & Pidgorna, A.B. 2009. « Assessing the landscape context and conversion risk of protected areas using satellite data products ». *Remote Sensing of Environment* 113 : 1357-1369.
- Szantoi, Z., Brink, A., Buchanan, G., Bastin, L., Lupi, A., Simonetti, D., Mayaux, P., Peedell, S. & Davy, J. 2016. « A simple remote sensing based information system for monitoring sites of conservation importance ». *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 2 (1) : 16-24.
- Tang, L. & Shao, G. 2015. « Drone remote sensing for forestry research and practices ». *Journal of Forestry Research* 26 (4) : 791-797.
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Serrano, S., Arquero, O. & Peña, J.M. 2015. « High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology ». *PLoS ONE* 10 (6) : e0130479.
- Turner, W., Rondinini, C., Pettorelli, N., Mora, B., Leidner, A.K., Szantoi, Z., Buchanan, G., Dech, S., Dwyer, J., Herold, M., Koh, L.P., Leimgruber, P., Taubenboek, H., Wegmann, M., Wikelski, M. & Woodcock, C. 2015. « Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation ». *Biological Conservation* 182 : 173-176.
- Vermeulen, C., Lejeune, P., Lisein, J., Sawadogo, P. & Bouché, P. 2013. « Unmanned aerial survey of elephants ». *PloS ONE* 8 (2) : e54700.
- Watts, A.C., Ambrosia, V.G. & Hinkley, E.A. 2012. « Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use ». *Remote Sensing* 4 : 1671-1692.
- Whitehead, K. & Hugenholtz, C.H. 2014. « Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges ». *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 2 : 69-85.
- Whitehead, K., Hugenholtz, C.H., Myshak, S., Brown, O., LeClair, A., Tamminga, A., Barchyn, T.E., Moorman, B. & Eaton, B. 2014. « Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications ». *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 2 : 68-102.
- Wiens, J., Sutter, R., Anderson, M., Blanchard, J., Barnette, A., Anguilar-Amuchastegui, N., Avery, C. & Laine, S. 2009. « Selecting and conservation lands for biodiversity: the role of remote sensing ». *Remote Sensing of Environment* 113 : 1370-1381.
- Willis, K.S. 2015. « Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas ». *Biological Conservation* 182 : 233-242.
- Wing, M.G., Burnett, J.D. & Sessions, J. 2014. « Remote sensing and unmanned aerial system technology for monitoring and quantifying forest fire impacts ». *International Journal of Remote Sensing Applications* 4 (1) : 18-35.
- Zahawi, R.A., Dandois, J.P., Holl, K.D., Nadwodny, D., Reid, J.L. & Ellis, E.C. 2015. « Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropic forest recovery ». *Biological Conservation* 186 : 287-295.
- Zhang, C., Walters, D. & Kovacs, J.M. 2014. « Applications of low altitude remote sensing in agriculture upon farmers' requests: a case study in North Eastern Ontario, Canada ». *PloS ONE* 9 (11) : e112894.