

# Les drones voleront-ils au secours de la faune menacée de la RDC ?

Julie Linchant<sup>1</sup>, Philippe Lejeune<sup>2</sup>, Cédric Vermeulen<sup>1</sup>

1: Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech. Laboratoire de foresterie des régions tropicales et subtropicales - Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels. 2, Passage des déportés, 5030 Gembloux. julie.linchant@gmail.com

2: Université of Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels. 2, Passage des déportés, 5030 Gembloux

## Résumé

La gestion et la conservation des écosystèmes naturels requièrent un suivi efficace qui passe par des études régulières et des actions rapides. Cependant, ces études sont difficiles à mettre en place, particulièrement dans les milieux tropicaux où le manque de moyens et de matériel approprié ainsi que les conditions de terrain difficiles se font sentir. En conséquence de ces limitations, le temps entre deux études consécutives peut être très important, rendant le suivi à long-terme pratiquement impossible. L'avènement récent des drones dans leurs applications civiles et le développement rapide de la technologie ouvre une porte vers un suivi plus régulier des écosystèmes naturels. Il est donc important que la République Démocratique du Congo ne reste pas en arrière et tire profit des avantages indiscutables des drones pour aider à faire face aux fortes pressions qui pèsent sur ses écosystèmes. Pour ce faire, le Département Forêts, Nature, Paysage de l'Université de Gembloux Agro-Bio Tech travaille sur un projet visant à développer de nouvelles méthodes de suivi de la faune et des activités illégales dans les aires protégées de la RDC. Trois objectifs spécifiques sont poursuivis : (i) la mise au point de nouvelles méthodes d'inventaire et de suivi de la grande faune pour appuyer voire remplacer partiellement les méthodes traditionnelles, (ii) l'appui à la lutte anti-braconnage traditionnelle par une reconnaissance aérienne et (iii) la gestion de l'empiètement dans les aires protégées par les activités anthropiques illégales notamment grâce à la cartographie de ces activités qui peut être obtenue via l'imagerie produite au départ des drones.

**Mots-clés** : UAV, RDC, gestion de la faune

## Abstract

*Adaptive management and conservation of natural ecosystems require effective monitoring which means that regular surveys and rapid response are needed. However, particularly in tropical areas, such surveys are logistically difficult to implement due to the lack of means and appropriate material and harsh field conditions, making. Consequently of those limitations, the time between surveys can be very long, making effective monitoring impossible. The recent advent of Unmanned Aerial Systems in civilian applications and the fast growing development of the technology open a door to a more regular monitoring of natural ecosystems. It is thus important that the Democratic Republic of Congo does not stay behind and takes profit of UAS undisputable advantages to help face the high pressure on its natural ecosystems. To do so a new project led by the Department of Forests, Nature, Landscape of Gembloux Agro-Bio Tech will develop new methods to survey wildlife and the illegal actions in the protected areas of the Democratic Republic of Congo. It focuses on three main objectives: (i) creating new efficient methods to inventory and monitor the megafauna to support and partially replace the usual surveys, (ii) developing aerial reconnaissance to help avoid the biggest risk for the guards and (iii) managing the encroachment of protected areas by illegal human activities with the help of UAS-based mapping and surveillance.*

**Keywords:** drone, DRC, wildlife management

## 1. Introduction

Les populations fauniques mondiales observent une décroissance de leurs effectifs de plus en plus alarmante, et ce majoritairement dans les pays en voie de développement. En effet, ces populations font face à des pressions de plus en plus intenses. Parmi celles-ci, la croissance démographique galopante et la pauvreté des populations locales augmentent rapidement la demande en ressources et multiplient les effets de la pression anthropique sur les milieux naturels. Le développement du trafic illégal de la faune s'intensifie également et entraîne une recrudescence du braconnage (UNEP, 2012).

La République Démocratique du Congo (RDC) n'échappe pas à cette règle et la situation y est encore plus dramatique du fait des conflits armés qui secouent le pays depuis de nombreuses années.

Avec son immense superficie de plus de deux millions de kilomètres carrés située de part et d'autre de l'Equateur, la RDC est pourtant un des pays les mieux nantis en terme de biodiversité. La grande variété de climats, de reliefs et d'habitats en fait un pays pourvu de nombreux écosystèmes et d'une biodiversité exceptionnelle (Eba'a et Bayol., 2009). Cette richesse est théoriquement préservée par un grand nombre d'aires protégées, 11% du territoire national étant mis en réserve pour sauvegarder ce capital. Cependant, la situation sociopolitique instable du pays favorise les pressions anthropiques. L'empiètement humain illégal

dans les aires protégées s'accompagnant de déforestation pour la conversion des terres ou la production de makala (charbon de bois), le braconnage de subsistance ou à destination du trafic mondial et autres activités illégales telles que les mines clandestines et le pâturage sont décuplés par l'effet des conflits armés. En effet, les nombreux groupuscules armés et les populations déplacées s'établissent partout où ils le peuvent, y compris dans les aires protégées. Ces populations subsistent majoritairement de la viande de brousse et les groupes armés profitent également du braconnage pour financer leurs activités. De plus, leur présence rend le travail des éco-gardes particulièrement dangereux (Vermeulen, 2013). Finalement, la déforestation due aux activités anthropiques impacte sur le changement climatique dont les prévisions au niveau de l'Afrique sont supérieures à la moyenne. Il est prévisible qu'elles affecteront durement les communautés fauniques, notamment en entraînant une perte importante d'espèces parmi lesquelles de nombreux grands mammifères (Raquel *et al.*, 2012).

Dans le contexte sociopolitique défavorable de la RDC, les moyens et l'attention fournis à la conservation de l'environnement s'en trouvent limités. L'Institut Congolais pour la Gestion de la Nature (ICCN), mandataire de la gestion des aires protégées, ne dispose donc que de peu de moyens financiers, logistiques et humains pour assurer la surveillance et la conservation de la biodiversité (IUCN/PACO, 2010 ; Billand, 2012). Or, évaluer et suivre l'évolution de la couverture forestière, la répartition des espèces et la dynamique des populations animales est essentiel pour comprendre les processus sous-jacents afin de mieux préserver ces ressources (Koh et Wich, 2012). Ces éléments soulignent l'importance de développer de nouvelles approches de gestion efficaces basées sur des techniques innovantes, abordables et multifonctionnelles.

Depuis une dizaine d'années, les drones ont fait leur apparition dans le domaine civil et leurs applications n'ont cessé de se développer, ouvrant de nouvelles perspectives pour la gestion de l'environnement et de la faune (Jones *et al.*, 2006 ; Hardin et Hardin, 2010 ; Watts *et al.*, 2010 ; Getzin *et al.*, 2012 ; Koh et Wich, 2012 ; Wing *et al.*, 2013). Leurs avantages, tels que les coûts d'achat et de maintenance faibles pour les mini-drones habituellement utilisés dans les applications civiles (Berni *et al.*, 2008 ; Dunford *et al.*, 2009 ; Harwin et Lucieer, 2012), la logistique facile avec un déploiement et une prise en main rapide (Dunford *et al.*, 2009 ; Xiang et Tian, 2011), l'empreinte écologique réduite (Martin *et al.*, 2012) et la possibilité de voler dans une large gamme de conditions météorologiques et à basse altitude, leur confèrent une haute résolution spatiale et temporelle par rapport aux plates-formes classiques de télédétection (Xiang et Tian, 2011 ; Turner *et al.*, 2012 ; Westoby *et al.*, 2012). Ces caractéristiques combinées à des capteurs de plus en plus performants permettent d'obtenir des images dont la résolution spatiale est de quelques centimètres, bien en-delà de l'imagerie aérienne et satellite classique. Il devient dès lors possible de repérer et d'identifier sur de telles images animaux, humains, véhicules et infrastructures. De plus, la logistique aisée permet d'obtenir à frais réduits une couverture de la zone voulue à un moment précis.

Les études utilisant la technologie drone dans le domaine de la faune se sont multipliées mais restent cependant cantonnées à un petit nombre d'espèces, principalement des oiseaux (Chabot et Bird, 2012 ; Sardà-Palomera *et al.*, 2012 ; Grenzdörffer, 2013) et des espèces marines telles que les lamantins (*Trichechus manatus latirostris*), les dugongs (*Dugong dugong*) ou encore les crocodiles (*Alligator mississippiensis*) (Jones *et al.*, 2006 ; Koski *et al.*, 2009 ; Martin *et al.*, 2012 ; Hogdson *et al.*, 2013). Quelques mammifères terrestres ont également été observés : le chevreuil (*Capreolus capreolus*) (Israël, 2011), l'orang-outans (*Pongo spp*) (Koh et Wich, 2012) et dernièrement, l'éléphant (*Loxodonta africana*) (Vermeulen *et al.*, 2013). Cependant, bien que les possibilités de détection soient très encourageantes, peu d'auteurs ont réalisé de réels comptages de populations et tenté de mettre au point un protocole spécifique. Dans le cas des mammifères, seuls Vermeulen *et al.* (2013) ont tenté de réaliser une estimation de l'effectif d'une population d'éléphants, sur un échantillon néanmoins trop petit que pour en tirer des résultats pertinents (Figure 1). De même, Lisein *et al.* (2013) sont les seuls à s'être intéressés à la meilleure manière d'estimer la superficie réellement couverte par les images.



**Figure 1 :** Détection d'éléphants sur photo obtenue par drone (Vermeulen *et al.* 2013).

Finalement, l'imagerie provenant de drone constitue une base de données permanentes qui peut donc être analysée par plusieurs opérateurs à posteriori de manière à augmenter la fiabilité des résultats. Les drones ont donc le potentiel pour devenir les prochains outils pour assurer le suivi de la faune et appuyer les équipes de surveillance au braconnage intense (Watts *et al.*, 2012).

Cependant, il reste du chemin à parcourir avant que cette technologie émergente ne devienne complètement opérationnelle en relevant le défi imposé par les contraintes liées à ce matériel, telles que la faible endurance et le volume très important de données à traiter. Il est dès lors important que l'Afrique Centrale et la RDC ne soient pas à la traîne dans ce domaine prometteur.

Le projet WiMUAS (Wildlife Monitoring with Unmanned Aerial Systems) développé par Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège) a vu le jour dans ce contexte avec pour objectif principal de mettre au point de nouvelles méthodes d'inventaire et de surveillance de la faune et des activités anthropiques à l'aide du drone Falcon UAV.

Trois objectifs spécifiques sont plus particulièrement poursuivis :

- (i) la mise au point de nouvelles méthodes d'inventaire et de suivi ponctuel de la grande faune par drone en vue de suppléer ou de remplacer les techniques de comptage traditionnelles ;
- (ii) l'appui à la lutte anti-braconnage traditionnelle par une reconnaissance du terrain par drone pour rechercher et fournir des indices en limitant la mise en danger des gardes ;
- (iii) la gestion des périphéries et activités illégales qui s'y développent notamment grâce à la cartographie à haute résolution spatiale et temporelle de ces activités.

## 2. Matériel

Le drone *Falcon* (Figure 2) est un mini-drone à aile-fixe d'une envergure de 2,5 m. Il est propulsé par un moteur électrique silencieux. Il est lancé à l'aide d'un élastique et atterrit à l'aide d'un parachute. Il peut être équipé au choix d'un appareil *Sony Nex 7* (24 MP) et de deux *GoPro* ou d'une caméra thermique *Tamarisk* (480x640) couplée à une caméra de jour haute définition. Il a une endurance maximale de 90 min et une portée vidéo de 5 km. Il est équipé de l'autopilote *Mission Planner* qui permet une variété quasiment illimitée de plans de vol et peut aisément passer du pilotage automatique au pilotage manuel.



Figure 2 : Drone *Falcon* en vol.

## 3. Le suivi des populations fauniques

Le recensement et le suivi régulier des populations de faune est essentiel pour faire face à des évolutions qui dépassent largement le rythme habituel des inventaires classiquement mis en place, et ce principalement dans les pays du Sud.

Les recensements de la moyenne et grande faune sont actuellement réalisés au moyen d'inventaires pédestres, motorisés ou aériens reposant généralement sur des plans d'échantillonnage de type systématique (transects équidistants couvrant de manière uniforme l'ensemble de la zone d'étude).

Dans les vastes savanes africaines au couvert léger et à faible relief, ils se déroulent majoritairement à l'aide de petits avions à aile haute (type *Cessna*) avec 1 pilote et 3 observateurs. A ce jour, cette technique reste la meilleure pour recenser les grands ongulés sur des surfaces importantes (Norton-Griffiths, 1978 ; Jachmann, 1991).

Cependant, ces types d'inventaires présentent plusieurs inconvénients non négligeables. Le premier

concerne leur coût élevé, souvent pris en charge par des bailleurs extérieurs au pays, rendant de ce fait leur répétition irrégulière et difficile à obtenir (Bouché, 2012 ; Dunham, 2012). Ensuite, leur organisation est complexe d'un point de vue logistique. Dans les régions les moins développées d'Afrique, le manque d'appareils correctement équipés, de carburant et de personnel approprié se fait particulièrement sentir (Bouché, 2012). Par ailleurs, ces inventaires présentent des sources d'imprécision importantes inhérentes à la localisation des observations, à la définition des surfaces échantillonnées et à la difficulté de détecter et de compter correctement les animaux en condition de vol (Wilkinson, 2007 ; Watts *et al.*, 2010). Enfin, ils présentent un risque d'accident élevé pour les opérateurs, les crashes d'avions étant la principale cause de mortalité chez les biologistes de terrain (Sasse, 2003). Les suivis terrestres (pédestres ou motorisés) quant à eux exigent beaucoup de temps, de personnel et de moyens. Ils sont très souvent difficiles à mettre en place dans les endroits éloignés et peu accessibles (Koh et Wich, 2012) et sont relativement coûteux (Bouché, 2012). Ces limitations rendent les suivis aléatoires (Dunham, 2012 ; Vermeulen *et al.*, 2013) et durant les longues périodes d'absence certaines espèces peuvent disparaître sans même qu'aucune action de gestion appropriée ne puisse être prise (Ferreira et Aarde, 2009 ; Bouché *et al.*, 2012).

Si les drones évitent efficacement la plupart des écueils liés aux méthodes classiques, ils présentent par contre d'autres contraintes de taille : leur faible endurance, généralement inférieure à 2 heures, la faible portée de la liaison radio (une dizaine de kilomètres à peine) et leur vitesse (de 50 à 80 km/h) limitent la surface qu'il est possible de couvrir en un seul vol. Le fait que les comptages ne soient pas réalisés au moment du vol, mais à posteriori sur les images collectées est susceptible d'augmenter considérablement les coûts de personnel en charge de cette opération. Ces limitations importantes imposent de se détacher des stratégies d'échantillonnage habituellement mises en œuvre dans les inventaires aériens classiques (Norton-Griffiths, 1978) mais également de mettre au point des techniques de gestion et de traitement des images adéquates.

Toutes ces adaptations méthodologiques et ces possibilités techniques nécessitent d'être testées et vont impliquer de revoir de manière assez fondamentale le modèle statistique sous-tendant l'estimation des effectifs des populations étudiées.

La faible surface couverte par vol peut-être partiellement compensée par une augmentation de leur nombre. Pour éviter une multiplication des points de décollage et d'atterrissage, on pourrait remplacer la répartition systématique des transects d'observations par une distribution radiale au départ d'un nombre très limité de points de décollage. On peut également envisager d'abandonner une couverture systématique de l'ensemble du territoire au profit d'un survol préférentiel des zones les plus attractives pour la faune. La réalisation d'un inventaire en un laps de temps très limité (quelques jours) peut également être remplacée par un processus de suivi continu de la faune tout au long de l'année. Par ailleurs, l'établissement de stations de contrôle relais dans un périmètre donné pourrait aider à lever la contrainte de portée du signal radio.

Il convient également de tirer au mieux parti des différents capteurs disponibles et de leur performances

respectives : caméra optique à très haute résolution utilisées la journée et caméra thermique permettant des prises de vues nocturnes. Ceci permettrait d'augmenter le nombre d'espèces prises en compte dans les inventaires grâce à la détection d'animaux nocturnes ou plus cryptiques.

La détection semi-automatisée des éléments sur les images constitue également un enjeu très important dans la réussite des recensements de faune par drone. Il est en effet essentiel de trouver des moyens permettant de réduire efficacement le temps "opérateur" consacré à l'analyse des images récoltées lors des différents vols. L'automatisation de la détection des individus sur les images a déjà été réalisée avec succès pour certaines espèces d'oiseaux (Abd-Elrahman, 2005 ; Chabot et Bird, 2012 ; Sardà-Palomera *et al.*, 2012 ; Grenzdörffer, 2013). La détection automatique se base sur des paramètres de couleurs et de formes. Des groupes de pixels de couleurs particuliers sont déterminés et les paramètres de taille et de forme sont ensuite utilisés pour les discriminer d'éventuels objets de teinte semblable. Les espèces étudiées par ces auteurs constituent des cas d'étude relativement simples caractérisés par un contraste important entre les animaux et leur environnement : il s'agit généralement de surfaces relativement uniformes telles que des plans d'eau, des plages ou des pelouses. Les espèces de moyenne et grande faune en région tropicale présentent le plus souvent des couleurs peu contrastées et évoluent dans un environnement beaucoup plus complexe, avec notamment la présence d'un couvert arboré utilisé par les animaux comme source d'ombrage (Figure 3).

Coulter *et al.* (2012) exploitent pour leur part la comparaison d'images successives extraites d'une vidéo acquise par caméra thermique. La détection de pixels présentant une variation du niveau d'éclairement entre images successives traduit la présence d'objets émettant de la chaleur et qui sont en mouvement. Cette méthode, qui fonctionne en temps quasi-réel commence à être utilisée pour le contrôle des frontières dans certains pays.



**Figure 3** : Groupe d'éléphants profitant de l'ombrage fourni par un bouquet d'arbres.

#### 4. La lutte contre le trafic illégal de faune et le braconnage

Les drones sont susceptibles de constituer un outil complémentaire important pour la lutte anti-braconnage classique dans les aires protégées de la RDC. En effet, les éco-gardes courent de grands risques dans l'exercice de leurs fonctions et disposent de peu de moyens face à la pression de plus en plus forte du braconnage, sans compter la présence des groupes armés dispersés dans plusieurs aires protégées.

S'il est évidemment impossible de se passer des patrouilles de terrain et de supprimer totalement les risques inhérents à cette activité, ces derniers pourraient être minimisés grâce à une meilleure connaissance de la situation. L'objectif est dès lors de développer une méthode combinant repérage aérien et actions de terrain pour diminuer les risques auxquels sont exposés les éco-gardes et cibler au mieux les actions à entreprendre.

De nombreuses initiatives de ce type sont régulièrement évoquées dans les médias et plusieurs grandes organisations se sont intéressées au développement de telles méthodes (WWF, 2013 ; Mulero-Pázmány *et al.*, 2014). Cependant peu de résultats concrets sont enregistrés à ce jour.

Au plan méthodologique, on peut envisager d'exploiter des techniques de détection automatique similaires à celle utilisées pour le contrôle de frontières dans certains pays (Coulter *et al.*, 2012). L'usage de la retransmission directe dont celle des images prises par caméra thermique constitue une autre alternative, notamment pour la détection des campements illégaux.

#### 5. Le suivi des activités anthropiques d'empiètement

Un problème récurrent des aires protégées concerne l'empiètement de leur périmètre par des activités anthropiques telles que la production de charbon de bois (makala), les brûlis destinés à convertir les terres en terrains cultivés ou lieu d'habitation, le pâturage des animaux domestiques et les activités minières illégales.

Ces activités contribuent au déboisement des espaces naturels protégés et à un appauvrissement conséquent des populations de faune sauvage. Les campements de pêcheurs illégaux constituent également une menace et une pression supplémentaire sur les ressources.

Toutes ces activités sont difficiles à recenser et à monitorer. L'imagerie satellitale permet de suivre la progression de la déforestation mais n'est pas suffisamment précise pour distinguer les différentes activités. Dans les régions tropicales, leur utilisation est en outre limitée par la couverture nuageuse et par le prix d'acquisition dans le cas de satellites commerciaux à très haute résolution. Le survol des ces activités par drone équipé d'appareils photos de haute résolution permet, après un traitement photogrammétrique adéquat des images, d'obtenir une cartographie très précise et actualisée de ces activités.

Cette cartographie permettra d'avoir une vue d'ensemble de la situation et de cibler les zones d'intervention prioritaire. A titre d'illustration, la figure 4 représente un extrait d'orthoimage produite au départ d'un vol drone réalisé à une hauteur de vol de 150 m. La résolution finale est de 4 cm. On remarque que l'on

peut aisément distinguer les zones dégradées, brûlées, les zones de coupe, les pistes et également les constructions et les êtres vivants. Le survol régulier de ces zones offrira un suivi et permettra aux acteurs de la

conservation de mieux comprendre la dynamique des activités illégales afin de prendre les mesures de gestion qui adaptées.



**Figure 4** : Portion d'orthoimage issue de la cartographie d'un tronçon de rivière à Yangambi. Les pistes, champs et zones dégradées sont facilement identifiables. La miniature montre l'agrandissement de la berge sur laquelle on peut détecter la présence d'une personne.

## 6. Conclusion

Le développement de l'ensemble de ces nouvelles méthodes de suivi de la faune et de surveillance des aires protégées axées sur la technologie drone semble constituer une alternative intéressante au regard de la situation socio-économique difficile de la RDC. L'investissement de départ, bien que représentant un coût supplémentaire, reste tout à fait compétitif par rapport aux coûts d'inventaires aériens classiques pour une même durée d'utilisation. Une fois le matériel acquis, son utilisation peu onéreuse permet de répéter régulièrement les suivis de faune. Le matériel peut également être utilisé pour fournir des données utiles pour les autres aspects de la conservation sans coûts supplémentaires (Kudo *et al.*, 2012 ; Mulero-Pázmány *et al.*, 2014).

Cependant, la situation n'est pas encore idéale. Les limitations d'endurance et de portée vidéo constituent toujours le frein majeur à une utilisation réellement opérationnelle de cette technologie. On peut raisonnablement penser que les performances

matérielles augmenteront rapidement durant la prochaine décennie.

Il est par conséquent important de développer dès à présent les méthodologies relatives à la mise en œuvre des vols d'observations ainsi qu'au traitement et à l'interprétation des images récoltées.

Et les faits donnent raison à l'optimisme puisque les récents avancements technologiques ont déjà permis au drone Falcon de doubler sa portée et d'augmenter son endurance. Il semblerait donc que les drones soient prêts à voler au secours de la faune africaine.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Centre de Recherche Forestière International (CIFOR) et l'Union Européenne pour le financement accordé à ce projet dans le cadre du projet de développement Forêts et Changement Climatique au Congo (FCCC). Les auteurs remercient également le bureau d'étude R&SD (Resources and Synergies Development) pour son soutien et son apport logistique dans ce projet, ainsi

que les différents partenaires y prenant part de près ou de loin.

## Références

- Abd-Elrahman A., Pearlstine L., Percival F., 2005. *Development of Pattern Recognition Algorithm for Automatic Bird Detection from Unmanned Aerial Vehicle Imagery*. *Surveying and Land Information Science* 65:37–45.
- Berni J., Zarco-Tejada P., Surez L., González-Dugo V. and Fereres E., 2008. *Remote sensing of vegetation from uav platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII.
- Billand A., 2012. *Biodiversité dans les forêts d'Afrique centrale : Panorama des connaissances, principaux enjeux et Mesures de conservation*. In : de Wasseige C., de Marcken P., Bayol N., Hiol Hiol F., Mayaux P., Desclée B., Nasi R., Billand A., Defourny P., Eba'a A.R., eds. *Les forêts du Bassin du Congo*. Etat des forêts 2010. Office des publications de l'Union européenne, 2012, Luxembourg, 63-93.
- Bouché P., Mange R.N.M., Tankalet F., Zowoya F., Lejeune P., Vermeulen C., 2012. *Game over! Wildlife Collapse in Northern Central African Republic*. *Environmental Monitoring and Assessment* 184:7001–7011.
- Bouché P., 2012. *Evolution Des Effectifs Des Populations D'éléphants d'Afrique Soudano-sahélienne: Enjeux pour leur conservation*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech.
- Chabot D. and Bird D.M., 2012. *Evaluation of an off-the-shelf Unmanned Aircraft System for Surveying Flocks of Geese*. *Waterbirds* 35:170–174.
- Coulter L.L., Stow D.A., Tsai, Y.H., Chavis C.M., Lippit C.D., Fraley G.W. and McCreight R.W., 2012. *Automated detection of people and vehicles in natural environment using high temporal resolution airborne remote sensing*. ASPRS 2012 Annual Conference Sacramento, Californie, 19-23 mars 2011.
- Dunford R., Michel K., Gagnage M., Piegay H. and Tremelo M.L., 2009. *Potential and Constraints of Unmanned Aerial Vehicle Technology for the Characterization of Mediterranean Riparian Forest*. *International Journal of Remote Sensing* 30:4915–4935.
- Dunham K.M., 2012. *Trends in Populations of Elephant and Other Large Herbivores in Gonarezhou National Park, Zimbabwe, as Revealed by Sample Aerial Surveys*. *African Journal of Ecology* 50:476-488.
- Eba'a A.R. and Bayol N., 2009. *Les forêts de la République Démocratique du Congo*. In : De Wasseige C., de Wasseige C., Devers D., de Marcken P., Eba'a A.R., Nasi R., Mayaux Ph., eds. *Les forêts du Bassin du Congo*. Etat des forêts 2008. Office des publications de l'Union européenne. Luxembourg, 115-128.
- Ferreira S.M., and Aarde R.J., 2009. *Aerial Survey Intensity as a Determinant of Estimates of African Elephant Population Sizes and Trends*. *South African Journal of Wildlife Research* 39:181–91.
- Getzin S., Wiegand K. and Schöning I., 2012. *Assessing Biodiversity in Forests Using Very High-resolution Images and Unmanned Aerial Vehicles*. *Methods in Ecology and Evolution* 3:397–404.
- Grenzdörffer G.J., 2013. *UAS-based automatic bird count of a common gull colony*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2, 2013 UAV-g2013, 4 – 6 September 2013, Rostock, Germany.
- Hardin P.J. and Hardin T.J., 2010. *Small Scale Remotely Piloted Vehicles in Environmental Research*. *Geography Compass* 4:1297–1311.
- Harwin S. and Lucieer A., 2012. *Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-view Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery*. *Remote Sensing* 4:1573–1599.
- Hodgson A., Kelly N., Peel D., 2013. *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Surveying Marine Fauna: A Dugong Case Study*. *PLoS ONE* 8:e79556.
- Israël M., 2011. *A UAV-based Roe Deer Fawn Detection System*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1 (C22).
- UICN/PACO, 2010. *Parcs et réserves de la République démocratique du Congo : évaluation de l'efficacité de gestion des aires protégées*. Ouagadougou, Burkina Faso : UICN/PACO.
- Jachmann H., 1991. *Evaluation of Four Survey Methods for Estimating Elephant Densities*. *African Journal of Ecology* 29: 188–195.
- Jones G.P., Pearlstine L.G. and Percival H.F., 2006. *An Assessment of Small Unmanned Aerial Vehicles for Wildlife Research*. *Wildlife Society Bulletin* 34:750–758.
- Koh L.P. and Wich S.A., 2012. *Dawn of Drone Ecology: Low-cost Autonomous Aerial Vehicles for Conservation*. *Tropical Conservation Science* 5:121–132.
- Koski W. R., Allen T., Ireland D., Buck G., Smith P. R., Macrender A. M., Halick M. A., Rushing C., Sliwa D. J. and McDonald T. L., 2009. *Evaluation of an unmanned airborne system for monitoring marine mammals*. *Aquatic Mammals* 35:347–357.
- Kudo H., Koshino Y., Eto A., Ichimura M., Kaeriyama M., 2012. *Cost-Effective Accurate Estimates of Adult Chum Salmon, *Oncorhynchus Keta*, Abundance in a Japanese River Using a Radio-Controlled Helicopter*. *Fisheries Research* 119-120:94–98
- Lisein, J., Linchant, J., Lejeune, P., Bouché, P. and Vermeulen, C. 2013. *Aerial surveys using an Unmanned Aerial System (UAS): comparison of different methods for estimating the surface area of sampling strips*. *Tropical Conservation Science* 6:506-520.
- Martin J., Edwards H.H., Burgess M.A., Percival H.F., Fagan D.E., Gardner B.E., Ortega-Ortiz J.G., Ifju, P.G., Evers B.S. and Rambo T.J., 2012. *Estimating Distribution of Hidden Objects with Drones: From Tennis Balls to Manatees*. *PLoS ONE* 7:e38882.
- Mulero-Pázmány M., Stolper R., van Essen L.D., Negro J.J., Sassen T., 2014. *Remotely Piloted Aircraft Systems as a Rhinoceros Anti-Poaching Tool in Africa*. *PLoS ONE* 9:e83873.
- Norton-Griffiths M., 1978. *Counting mammals*. The African Elephant Specialists Group (Eds J.J.R. Grimstell), 2<sup>nd</sup> edition.
- Raquel A.G., Neil D.B., Marcabeza C.R. and Miguel B.A., 2012. *Exploring consensus in 21st century*

- projections of climatically suitable areas for Africa vertebrates*. *Global Change Biology*, 18:1253-1269.
- Sardà-Palomera F., Bota G., Viñolo C., Pallarés O., Sazatornil V., Brotons L., Gomáriz S. and Sardá F., 2012. *Fine-scale bird monitoring from light unmanned aircraft systems*. *Ibis* 154:177–183.
- Sasse D.B., 2003. *Job-related mortality of wildlife workers in the United States, 1937–2000*. *Wildlife Society Bulletin*, 31:1015–1020.
- Turner D., Lucieer A. and Watson C., 2012. *An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds*. *Remote Sensing* 4:1392–1410.
- UNEP. 2012. *Global Environmental Outlook 5 Report, Part 1: State and trends of the environment, Chapter 5: Biodiversity*. [http://www.unep.org/geo/pdfs/geo5/GEO5\\_report\\_C5.pdf](http://www.unep.org/geo/pdfs/geo5/GEO5_report_C5.pdf) visité le 15 décembre 2014.
- Vermeulen C., 2013. *Enjeux autour des forêts congolaises*. *Conjonctures congolaise* 2013, 101-113.
- Vermeulen C., Lejeune P., Lisein J., Sawadogo P. and Bouché P. 2013. *Unmanned Aerial Survey of Elephants*. *PLoS ONE* 8:e54700.
- Watts A.C., Perry J.H., Smith S.E., Burgess M.A., Wilkinson B.E., Szantoi Z., Ifju P.G. and Percival H.F., 2010. *Small Unmanned Aircraft Systems for Low-Altitude Aerial Surveys*. *The Journal of Wildlife Management* 74:1614–1619.
- Watts A.C., Ambrosia V.G., and Hinkley E.A., 2012. *Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use*. *Remote Sensing* 4:1671–1692.
- Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J. and Reynolds J.M., 2012. *Structure-from-Motion"photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. *Geomorphology* 179:300-314.
- Wilkinson B.E., 2007. *The design of georeferencing techniques for an unmanned autonomous aerial vehicle for use with wildlife inventory surveys: A case study of the National Bison Range, Montana*. Thèse de Master, University of Florida, Floride.
- Wing M.G., Burnett J., Sessions J., Brungardt J., Cordell V., Dobler D., Wilson D., 2013. *Eyes in the Sky: Remote Sensing Technology Development Using Small Unmanned Aircraft Systems*. *Journal of Forestry* 111:341–47.
- WWF. 2013. *Protecting Threatened Wildlife in Africa with Technology and Training*. A forum hosted by the Richardson Center for Global Engagement, World Wildlife Fund and African Parks. The National Press Club, Washington DC, 31 octobre 2013.
- Xiang H. and Tian L., 2011. *Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV)*. *Biosystems Engineering* 108:174-190.