

Les drones au secours de la grande faune menacée de RDC

par Julie Linchant¹/julie.linchant@doct.ulg.ac.be, Philippe Lejeune²/p.lejeune@ulg.ac.be, Cédric Vermeulen¹/cvermeulen@ulg.ac.be

Résumé

Dans un contexte international de pressions de plus en plus intenses sur la faune sauvage, caractérisées notamment par une recrudescence intense du braconnage, le suivi régulier de la faune est essentiel pour assurer sa conservation. La situation de la biodiversité en République Démocratique du Congo est particulièrement préoccupante suite aux nombreux conflits armés et aux pressions anthropiques qui en découlent, ainsi qu'au manque de moyens et d'investissement. Habituellement, le suivi de la faune est réalisé à l'aide d'inventaires pédestres et aériens. Cependant, ces méthodes font face à de nombreuses contraintes, notamment leur coût et la logistique importante qu'elles demandent. Elles sont aussi dangereuses pour les opérateurs, ces derniers risquant leur vie lors d'accidents de vol ou lors de rencontres avec des braconniers ou des animaux potentiellement dangereux. Dans ce contexte, l'utilisation des drones civils, actuellement en pleine expansion, représente une alternative aux méthodes classiques pour le suivi de la grande faune et la surveillance des aires protégées. En effet, cette nouvelle technologie présente un coût plus faible, une logistique facile et une prise en main rapide, ainsi qu'un minimum de risque pour les opérateurs. Néanmoins, elle en est à ses balbutiements et de nouvelles méthodes de suivi doivent être mises au point pour relever le défi imposé par les contraintes liées à ce matériel innovant, tels que la faible autonomie et le traitement de grands volumes de données.

L'Université de Liège-Gembloux Agro-Bio Tech a bâti, en partenariat avec le CIFOR, le projet WiMUAS visant à développer ces nouvelles méthodes dans le cadre des aires protégées en RDC. Cet article s'appuie sur une revue bibliographique récente pour en présenter les trois

principaux objectifs en regard des développements existants :

- (i) la mise au point de nouvelles méthodes d'inventaire et de suivis ponctuels de la grande faune par analyse d'images et de vidéos obtenues par drone ;
- (ii) la gestion des périphéries et activités illégales notamment grâce à la cartographie précise de ces activités qui peut être obtenue via l'imagerie drone ;
- (iii) la lutte anti-braconnage qui pourrait être appuyée par une reconnaissance du terrain par drone pour rechercher et fournir des indices en limitant la mise en danger des gardes.

Mots-clés: Unmanned Aerial System, projet WiMUAS, UAV, RDC, inventaires de faune

Introduction

La situation internationale actuelle de la faune est de plus en plus alarmante, particulièrement dans les pays du Sud. Le développement rapide du trafic illégal de la faune et la recrudescence intense du braconnage, associés aux diverses pressions anthropiques liées au développement démographique et à la grande pauvreté des populations locales, font peser des pressions de plus en plus fortes sur les milieux naturels et la faune qu'ils abritent (UNEP, 2012). Parmi ces pays, la République Démocratique du Congo (RDC) est particulièrement vulnérable, notamment de part sa situation politique instable. D'une superficie considérable de plus de 2.300.000 km² et située de part et d'autre de l'Equateur, la RDC englobe une grande diversité de climats, de reliefs, d'habitats, et donc d'écosystèmes. Cette diversité lui confère

¹ Univ. Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels. Laboratoire de foresterie des régions tropicales et subtropicales. Passage des Déportés, 2.B-5030 Gembloux (Belgique)

² Univ. Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels. Passage des Déportés, 2.B-5030 Gembloux (Belgique)

une biodiversité exceptionnellement riche et variée et en fait un des pays les mieux nantis en la matière (Eba'a et Bayol, 2009). Le pays possède de nombreuses aires protégées couvrant environ 11% du territoire national et destinées à préserver cette biodiversité. Cependant, comme toutes les aires protégées, ces dernières sont soumises à différentes pressions anthropiques telles que l'empiètement s'accompagnant de déforestation pour la conversion des terres ou la production de charbon de bois (makala), le braconnage de subsistance ou à destination du trafic mondial et autres activités illégales telles que l'exploitation de mines clandestines et le pâturage par le bétail domestique. De plus, les multiples conflits armés qui agitent le pays depuis des années décuplent l'effet de ces pressions, d'une part en déplaçant les populations, d'autre part en générant de nombreux groupes armés qui s'établissent dans les aires protégées. Ces différentes populations subsistent majoritairement de la viande de brousse. Les groupes armés tirent également parti des produits du braconnage pour financer leurs activités et rendent le travail des éco-gardes particulièrement périlleux (Vermeulen, 2013). La déforestation induite par les activités anthropiques joue également un double rôle en participant au changement climatique. Or, au niveau de l'Afrique, les prédictions de changement climatique annoncées sont supérieures à la moyenne mondiale et il est prévisible qu'elles affecteront grandement la biodiversité en modifiant la composition des communautés fauniques, notamment en entraînant une perte importante d'espèces parmi lesquelles de nombreux grands mammifères (Raquel *et al.*, 2012).

Face à cette situation, l'Institut Congolais pour la Conservation de la Nature (ICCN), détenteur du mandat de la gestion des aires protégées, se trouve démuné. En effet, dans un contexte socio-politique particulièrement défavorable, l'attention portée aux problématiques environnementales s'en trouve diminuée. Il ne dispose donc pas de suffisamment de moyens financiers, logistiques et humains pour assurer la surveillance et la conservation de la biodiversité (IUCN/PACO, 2010 ; Billand, 2012). Ces préoccupations soulèvent l'importance de trouver de nouvelles

méthodes efficaces à moindre coût pour obtenir des données et assurer le suivi et la protection de la faune dans les meilleures conditions possibles.

De nombreux projets internationaux s'intéressent heureusement à la situation et cherchent à développer des solutions innovantes. C'est le cas du projet WiMUAS (Wildlife Monitoring with Unmanned Aerial Systems) de la Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech qui s'intéresse à l'actuelle expansion des drones civils et de leurs applications. Le Département Forêts, Nature, Paysage développe depuis 2011 des recherches appliquées sur l'utilisation de véhicules aériens motorisés inhabités, ou drones, en gestion des ressources naturelles, concernant aussi bien l'évaluation des ressources forestières que le suivi de la faune (Lisein *et al.*, 2013 ; Vermeulen *et al.*, 2013). Le projet WiMUAS, financé par le Centre de Recherche Forestière International (CIFOR) et l'Union Européenne dans le cadre du projet global de développement Forêts et Changement Climatique au Congo (FCCC), a été développé pour mettre au point de nouvelles méthodes d'inventaire et de surveillance de la faune et des activités anthropiques à l'aide de drones.

Le projet a trois principaux objectifs:

- (i) la mise au point de nouvelles méthodes d'inventaire et de suivi ponctuel de la grande faune par drone (analyse d'images et de vidéos) pour appuyer les méthodes traditionnelles, voire les remplacer partiellement ;
- (ii) la gestion des périphéries et activités illégales notamment grâce à la cartographie précise de ces activités qui peut être obtenue via l'imagerie drone ;
- (iii) la lutte anti-braconnage qui pourrait être appuyée par une reconnaissance du terrain par drone pour rechercher et fournir des indices en limitant la mise en danger des gardes.

Cet article se veut une présentation des ces trois objectifs au regard d'une revue bibliographique récente, précédée d'une présentation succincte de la technologie des drones et du développement de ses applications civiles.

1. Le développement de la technologie drone

Les drones sont définis comme des véhicules aériens motorisés inhabités et réutilisables. Ils sont contrôlés à distance de manière manuelle et/ou automatique. Ils peuvent embarquer des capteurs variés mais sont le plus souvent utilisés comme plateformes de télédétection avec un choix de caméras à haute résolution ou de caméras infra-rouges et thermiques liées à un positionnement GPS.



Drone

Largement utilisés dans le domaine militaire, ils n'ont fait leur apparition dans le civil que depuis une dizaine d'année. Le développement récent de leurs applications telles que l'application de la loi (Finn et Wright, 2012), les opérations d'intervention rapide (Haarbrink et Koers, 2006 ; Eisenbeiss, 2009), l'agriculture de précision (Sugiura *et al.*, 2005 ; Lelong *et al.*, 2008 ; Hunt *et al.*, 2010), l'hydrologie (Niethammer *et al.*, 2012 ; Westoby *et al.*, 2012), l'archéologie (Verhoeven *et al.* 2012) et la gestion de l'environnement (Hardin and Hardin, 2010 ; Getzin *et al.*, 2012 ; Wing *et al.*, 2013) semble annoncer une nouvelle ère pour la conservation de la nature. En effet, de nombreux avantages sont associés à cette technologie. Les coûts d'achat et de maintenance sont faibles pour les mini-drones habituellement utilisés dans le civil (inférieurs à 50.000€ sans compter les éventuelles pièces de rechange à l'utilisation) (Berni *et al.*, 2008 ; Dunford *et al.*, 2009 ; Harwin et Lucieer, 2012), la logistique est facile avec un déploiement et une prise en main rapide (Dunford *et al.*, 2009 ; Xiang et Tian, 2011), les risques potentiels pour les opérateurs sont minimales (Xiang et Tian, 2011

; Watts *et al.*, 2012) et l'empreinte écologique à l'usage est réduite du fait de l'utilisation de batteries électriques moins polluantes que le carburant (Martin *et al.*, 2012). De plus, ils peuvent voler dans une large gamme de conditions météorologiques sans danger, y compris sous une couverture nuageuse particulièrement basse. Les capteurs hautement performants combinés à une faible altitude permettent d'obtenir des images dont la résolution est de quelques centimètres par pixel, bien en-delà de l'imagerie aérienne et satellite classique (d'une dizaine de centimètres à plusieurs mètres). Il devient dès lors possible de repérer et d'identifier animaux, humains, véhicules et infrastructures sur ces images (Xiang et Tian, 2011 ; Turner *et al.*, 2012 ; Westoby *et al.*, 2012). De plus, la logistique relativement aisée permet d'obtenir à frais réduits la couverture de la zone voulue aux moments précis désirés. Ces avantages leur confèrent une haute résolution spatiale et temporelle. Finalement, l'imagerie provenant de drones constitue une base de données permanentes qui peuvent donc être analysées par plusieurs opérateurs *a posteriori*. De cette manière, une vérification des éléments détectés est toujours possible, ce qui augmente la fiabilité des résultats tels que les dénombrements de faune.

Les drones ont donc le potentiel pour devenir les prochains outils pour assurer le suivi de la faune et appuyer les équipes de surveillance (Watts *et al.*, 2012). Cependant, il reste du chemin à parcourir avant que cette technologie émergente ne devienne opérationnelle en relevant le défi imposé par les contraintes liées à ce matériel, telles que la faible autonomie et le traitement d'un énorme volume de données (jusqu'à plus d'un milliard d'images ou plus d'une heure de vidéo en temps réel par vol). Il est important que l'Afrique Centrale et la RDC ne soient pas à la traîne et adoptent dès maintenant une position de précurseurs dans ce domaine prometteur.

2. Les inventaires et suivis ponctuels de la faune

Dans le contexte actuel, un défi important pour la conservation de la faune est d'être capable d'évaluer et de suivre l'évolution de la couverture forestière, la répartition des espèces

et la dynamique des populations animales afin de mieux préserver ces ressources (Koh et Wich, 2012). En effet, le suivi (ex. : observation des processus biologiques, habitats, comportements, déplacements) et le recensement (i.e. un comptage visant à donner une estimation du nombre d'individus et le plus souvent la répartition spatiale) réguliers des populations de faune sont essentiels pour comprendre des processus dont l'évolution dépasse largement le rythme habituel des inventaires classiquement mis en place, et ce principalement dans les pays du Sud.

Le plus souvent, les recensements des moyenne et grande faunes sont réalisés à l'aide d'inventaires pédestres, en voiture ou aériens. Dans les vastes zones de savanes africaines au relief relativement plat, les inventaires aériens à l'aide de petits avions pilotés embarquant un minimum de trois observateurs restent la meilleure alternative pour recenser les grands ongulés (Jachmann, 1991). Cependant, bien qu'ayant une utilité incontestable, ces méthodes présentent plusieurs inconvénients majeurs dans leur mise en œuvre. Leur coût est élevé et le financement est souvent soutenu par des bailleurs extérieurs au gestionnaire, le rendant de fait irrégulier et difficile à obtenir (Bouché, 2012 ; Dunham, 2012). Par ailleurs, ils sont difficiles à organiser d'un point de vue logistique, particulièrement dans les régions moins développées d'Afrique où le manque d'appareils, de carburant et de personnel approprié se fait sentir (Bouché, 2012). Enfin, ils sont confrontés à des difficultés inhérentes à la précision géospatiale dans l'acquisition des données (hauteur de vol fluctuante et imprécision de la surface couverte au sol, prise de données GPS décalées, erreurs humaines) (Wilkinson, 2007 ; Watts *et al.*, 2010). Wiegman et Taneja (2003), Wilkinson (2007) et Watts *et al.* (2010) soulignent également que ces méthodes d'inventaires exposent les chercheurs à d'importants risques d'accident mortels, les crashes d'avions étant la principale cause de mortalité chez les biologistes de terrain d'après Sasse (2003). Quant aux suivis terrestres (pédestres ou motorisés), sur de grandes superficies ils exigent beaucoup de temps, de personnel et de moyens, 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 contraintes rendent les suivis et recensements réguliers

difficiles (Dunham, 2012 ; Vermeulen *et al.*, 2013), l'intervalle de temps entre deux inventaires pouvant s'étendre sur une décennie et voire un quart de siècle dans certaines zones protégées (Bouché *et al.*, 2011). Durant ces périodes, certaines espèces peuvent disparaître sans même qu'aucune action de gestion appropriée ne puisse être prise (Ferreira et Aarde 2009; Bouché *et al.* 2012).

Depuis quelques années, l'utilisation des drones dans le domaine du suivi de la faune s'est développée. Néanmoins, elle est restée limitée 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*), crocodiles (*Alligator mississippiensis*) et différentes baleines (Jones *et al.*, 2006 ; Koski *et al.*, 2009 ; Martin *et al.*, 2012 ; Hodgson *et al.*, 2013). Quelques mammifères terrestres ont également été observés : chevreuils (*Capreolus capreolus*) (Israël, 2011), orang-outans (*Pongo spp*) (Koh et Wich, 2012) et dernièrement, les éléphants (*Loxodonta africana*) (Vermeulen *et al.*, 2013).



Vue sur les hippopotames dans la rivière lors d'un survol par drone à 170m d'altitude

Les possibilités de détection sont très encourageantes et des premiers essais de quantification de ces possibilités ont été réalisés (Hodgson *et al.*, 2013 ; Vermeulen *et al.*, 2013). Des comptages et évaluation de populations ont été réalisées majoritairement pour les oiseaux, allant même jusqu'à l'automatisation de la détection des individus sur les images (Chabot et Bird, 2012 ; Sardà-Palomera *et al.*, 2012 ; Grenzdörffer, 2013). Chez les mammifères, seuls Vermeulen *et al.* (2013) ont procédé à

une estimation de la population, sur un échantillon néanmoins trop petit que pour en tirer des résultats définitifs. La majorité de ces études ont utilisé des drones à ailes-fixes à propulsion électrique qui ont une vitesse plus élevée que les multicoptères et permettent donc de couvrir de plus grandes surfaces.

Cependant, malgré ces résultats encourageants, de grands progrès doivent encore être réalisés pour compenser les contraintes imposées par l'usage des drones. Les principaux inconvénients dans l'utilisation de ces derniers sont le temps de vol court (des quelques dizaines de minutes à 2h en moyenne), la petite taille des zones couvertes par un vol, n'excédant pas quelques kilomètres carrés dans le meilleur des cas, la difficulté de trouver des sites de décollage-atterrissage appropriés pour les ailes-fixes et la courte portée du signal de la radio dépendant de la retransmission directe des données (soit moins de 10 km pour les fréquences autorisées dans le civil), ainsi que sa perte dans un habitat fermé. La détection des espèces doit également être améliorée pour être élargie à une gamme d'espèces plus variée, notamment plus petites ou plus cryptiques qui pourraient être repérées par des capteurs thermiques.

Pour y parvenir, différentes nouvelles stratégies d'échantillonnages et méthodes d'inventaire seront développées dans le cadre du projet WiMUAS et plusieurs types de capteurs seront utilisés et testés tels que des caméras à haute résolution et thermiques. La méthode habituellement utilisée lors des inventaires aériens et décrite par Norton-Griffiths (1978) qui consiste à échantillonner en réalisant des transects linéaires systématiques au dessus de blocs définis dans les aires protégées devra être revue pour fournir des résultats valides en tenant compte des contraintes de superficie couverte par les drones. Les grands mammifères de savane faisant habituellement l'objet de ces inventaires constitueront les espèces-cibles mais différents protocoles de suivi seront également adaptés pour tenir compte de la faune et des milieux très variés de la RDC et tirer parti de tous les capteurs disponibles, notamment en milieux plus forestiers. Il devrait en résulter des protocoles flexibles et reproductibles qui permettront d'assurer la surveillance continue des populations animales. La détection informatisée des éléments sur les images sera également

développée pour les espèces cibles dans le but de permettre un gain de temps important pour les opérateurs lors de l'analyse des milliers d'images collectées, tout en garantissant des résultats fiables. L'ensemble des nouvelles techniques mises au point devra permettre de reproduire les suivis régulièrement, et les recensements annuellement pour représenter une alternative aux approches classiques pour le suivi de la faune.

3. La gestion des périphéries et des activités anthropiques

Un problème récurrent des aires protégées est la pression anthropique extrêmement forte exercée en périphérie de celles-ci. En RDC, les activités telles que la production de « makala » (charbon de bois), les brûlis destinés à convertir



Production de makala aux abords du parc des Virunga



Saisie de makala produit illégalement dans le parc lors d'un contrôle à la sortie des Virunga



Envahissement grandissant des parcs par les cultures et les villages

les espaces en terrains cultivés et en pâturage pour les animaux domestiques contribuent au déboisement des zones naturelles protégées et à leur appauvrissement en faune sauvage. Le développement d'une cartographie de la périphérie des aires protégées et des terroirs villageois ainsi que la détection des empiètements illégaux dans les parcs à l'aide d'images à haute résolution acquises par drone permettra d'avoir une vision plus globale du problème et de cibler les zones prioritaires.



Ortho-image géoréférencée obtenue à partir d'un vol drone. Ces images permettent une détection précise et un suivi des activités humaines de la zone. La progression des zones de cultures sur brûlis dans la forêt est aisément cartographiable

Le survol régulier de ces zones offrira un suivi et permettra aux acteurs de la conservation de mieux comprendre leur dynamique afin de prendre les mesures de gestion qui s'imposent ainsi que d'accéder facilement à une base de données cartographiques et de la mettre à jour efficacement.



Le nombre de pêcheurs installées sur le lac Edouard devient progressivement incontrôlable et les normes établies en coopération avec le parc ne sont pas respectées

4. La lutte anti-braconnage

Dans les aires protégées, les drones pourraient constituer un outil complémentaire efficace pour la lutte anti-braconnage classique. Les éco-gardes courent un grand danger au quotidien dans leur travail de sécurisation des parcs et disposent de peu de moyens face à la pression grandissante des braconniers. Notre objectif est de développer une méthode combinant repérage aérien et actions de terrain pour mieux adapter la riposte et diminuer les risques auxquels sont exposés les éco-gardes et cibler au mieux les actions. Si de nombreuses initiatives visant à développer la technologie dans ce sens sont déjà en cours un peu partout dans les pays du Sud (WWF, 2013 ; Mulero-Pázmány *et al.*, 2014), peu de résultats et de méthodes concrètes ont été documentés. Cependant, il serait intéressant de développer un parallèle avec les méthodes proposées pour le contrôle des frontières et des activités illégales d'autres régions du monde. Coulter *et al.* (2012) proposent une méthode comparant les valeurs des pixels obtenues pour une succession d'images acquises par drone dont la fraction commune est importante, des valeurs différentes à celles attendues au même endroit indiquant un mouvement. Cette méthode permet d'acquérir des données en temps quasi réel et de détecter un déplacement suspect rapidement. D'autres possibilités de repérer les braconniers et leurs campements en temps réel via les airs seront étudiées, notamment à l'aide de surveillance

vidéo avec caméra thermique au cours de vols nocturnes, ainsi que l'établissement de stations de contrôle relais pour augmenter la portée des drones. Une fois validée et étudiée par l'équipe de contrôle, l'observation pourrait ensuite faire l'objet d'une communication aux équipes de terrain prêtes à l'action. Ces renseignements acquis à distance permettront une action ciblée, rapide et appropriée, l'équipe pouvant évaluer la menace avant de la traiter. Ces méthodes ne remplaceront certes pas l'observation d'indices lors de patrouilles mais ils permettront de couvrir à moindre frais de grandes surfaces.

Conclusion

Le développement de l'ensemble de ces nouvelles méthodes de suivi de la faune et de surveillance des aires protégées axées sur un seul matériel est un bon compromis au regard de la situation en RDC. En effet, cela permettrait d'assurer un suivi efficace beaucoup plus fréquent et régulier tout en tenant compte de certaines contraintes imposées par le manque de moyens important dans le pays. Cependant, la situation n'est pas encore idéale et si on peut supposer que les performances matérielles augmenteront rapidement durant la prochaine décennie, notamment au niveau de l'autonomie et du traitement du volume important des images, il est maintenant essentiel de développer rapidement les méthodologies.

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 & Synergies Development) pour son soutien et son apport logistique dans ce projet, ainsi que les différents partenaires, dont l'ICCN, y prenant part de près ou de loin. Merci aussi aux relecteurs pour leur travail de révision et la pertinence de leurs remarques.

Bibliographie

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. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **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. and Eba'a A.R., eds. *Les forêts du Bassin du Congo. Etat des forêts 2010*. Luxembourg : Office des publications de l'Union européenne, 63-93.

Bouché P., Douglas-Hamilton I., Wittemyer G., Nianogo A. J., Doucet J.-L., Lejeune P. and Vermeulen C., 2011. Will Elephants Soon Disappear from West African Savannas? *PLoS ONE*, **6**:e20619.

Bouché P., Mange R.N.M., Tankalet F., Zowoya F., Lejeune P. and Vermeulen C., 2012. Game over! Wildlife Collapse in Northern Central African Republic. *Environ. Monit. Assess.*, **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 (Belgique).

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., Lippitt 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, 19-23 Mars, 2011, Sacramento, California*.

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. *Int. J. Remote Sens.*, **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. *Afr. J. Ecol.*, **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*. Luxembourg : Office des publications de l'Union européenne, 115-128.

Eisenbeiss H., 2009. *UAV photogrammetry*. Zurich : ETH.

Ferreira S.M., and Aarde R.J., 2009. Aerial Survey Intensity as a Determinant of Estimates of African Elephant Population Sizes and Trends. *S. Afr. J. Wildl. Res.*, **39**:181-91.

Finn, R.L. and Wright D. 2012. Unmanned Aircraft Systems: Surveillance, Ethics and Privacy in Civil Applications. *Computer L. Secur. Rev.*, **28**:184-194.

Getzin S., Wiegand K. and Schöning I., 2012. Assessing Biodiversity in Forests Using Very High-resolution Images and Unmanned Aerial Vehicles. *Methods Ecol. Evol.*, **3**:397-404.

Grenzdörffer G.J., 2013. UAS_based automatic bird count of a common gull colony. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XL-1/W2. UAV-g2013, 4-6 September 2013, Rostock, Germany.**

Haarbrink, R.B. and Koers E. 2006. Helicopter UAV for Photogrammetry and Rapid Response. In : *2nd Int. Workshop "The Future of Remote Sensing", ISPRS Inter-Commission Working Group I/V Autonomous Navigation, 36:1*.

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 Sens.*, **4**:1573-1599.

Hodgson A., Kelly N., and Peel D., 2013. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Surveying

Marine Fauna: A Dugong Case Study. *PLoS ONE* **8**:e79556.

Hunt, E. R., Hively W.D., Fujikawa S.J., Linden D.S., Daughtry C.S.T. and McCarty G.W. 2010. Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. *Remote Sens.*, **2**:290-305.

Israël M., 2011. A UAV-based Roe Deer Fawn Detection System. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XXXVIII-1**.

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. *Afr. J. Ecol.*, **29**: 188-195.

Jones G.P., Pearlstine L.G. and Percival H.F., 2006. An Assessment of Small Unmanned Aerial Vehicles for Wildlife Research. *Wildl. Soc. Bull.*, **34**:750-758.

Koh L.P. and Wich S.A., 2012. Dawn of Drone Ecology: Low-cost Autonomous Aerial Vehicles for Conservation. *Trop. Conserv. Sci.*, **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*. *Aquat. Mamm.*, **35**:347-357.

Lelong, C.C.D., Burger P., Jubelin G., Roux B., Labbé S. and Baret F. 2008. Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots. *Sensors*, **8**:3557-3585.

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. *Trop. Conser. Sci.*, **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. and Sassen T., 2014. Remotely Piloted Aircraft Systems as a Rhinoceros Anti-Poaching Tool in Africa. *PLoS ONE*, **9**:e83873.
- Niethammer U., James M.R., Rothmund S., Travelletti J. and Joswig M., 2012. UAV-based Remote Sensing of the Super-Sauze Landslide: Evaluation and Results. *Eng. Geol.*, **128**:2–11.
- Norton-Griffiths M., 1978. *Counting mammals*. The African Elephant Specialists Group (Eds J.J.R. Grimstell), 2nd 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 Biol.*, **18**:1253-1269.
- Sardà-Palomera F., Bota G., Violo C., Pallarés O., Sazatornil V., Brotons L., Gomáriz S. and Sard 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. *Wildl. Soc. Bull.*, **31**:1015–1020.
- Sugiura R., Noguchi N. and Ishii K., 2005. Remote-sensing Technology for Vegetation Monitoring Using an Unmanned Helicopter. *Biosyst. Eng.*, **90**:369–379.
- 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 Sens.*, **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, (15/12/2014).
- Verhoeven, G., Doneus M., Briese C. and Vermeulen C. 2012. Mapping by Matching: A Computer Vision-based Approach to Fast and Accurate Georeferencing of Archaeological Aerial Photographs. *J. Archaeol. Sci.*, **39**:2060–2070.
- Vermeulen C., 2013. Enjeux autour des forêts congolaises. *Conjonctures congolaises 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. *J. Wildl. Manage.*, **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 Sens.*, **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.
- Wiegman, D.A. and Taneja N. 2003. Analysis of injuries among pilots involved in fatal general aviation airplane accidents. *Accident Anal. Prev.*, **35**:571–577.
- 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, USA).
- 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. *J. For.*, **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, 31 Octobre 2013, The National Press Club, Washington DC, 31*.
- Xiang H. and Tian L., 2011. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosyst. Eng.*, **108**:174-190.