

FAUCON NOIR : RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR UNE ÉTUDE DE LA BIODIVERSITÉ PAR DRONE

Laurent Beaudoin¹, Antoine Gademer¹, Loïca Avanthey^{1,2}, Bernard Riera³, Jean-Paul Rudant⁴

1: Laboratoire ATIS, ESIEA, 9 rue Vésale, 75005 Paris, France

2: Laboratoire LTCI, Institut Mines-Télécom Télécom Paristech, 46 rue Barrault, 75013 Paris, France

3: Département d'Ecologie et Gestion de la Biodiversité, MNHM-CNRS, 1 avenue du Petit Château, 91800 Brunoy, France

4: Laboratoire ESYCOM, Université de Marne-la-Vallée mon lieu, 5 boulevard Descartes, 77454 Marne-la-Vallée, France

Résumé

L'étude de la biodiversité des écosystèmes et de leur dynamique est un enjeu majeur de notre siècle de transition climatique. Pour cela, il est nécessaire de réaliser un suivi précis de l'évolution des populations, basé sur une cartographie régulière et à haute résolution pour recueillir des informations à l'échelle des individus étudiés. Dans cet article, on s'intéresse au potentiel de la télédétection basse altitude utilisant un prototype de micro-drone avec une charge cartographique dédiée développée au laboratoire. Les retours d'expérience sur un site d'étude classé en zone Natura 2000 montrent un potentiel très utile pour les gestionnaires de la réserve, tant du point de vue de l'exploitation des données brutes que des nuages de points 3D générés à partir de celles-ci.

Mots clés : Biodiversité, cartographie dynamique, microdrone, nuages de points 3D

Abstract

The study of ecosystems biodiversity and their dynamics is a major challenge of our climate transition century. For this purpose, it is necessary to perform an accurate population trends monitoring based on regular and high resolution mapping to gather information at the level of individuals studied. In this article, we point the potential of low altitude remote sensing using a micro-drone prototype with a dedicated load mapping developed in the laboratory. The feedback on the study area classified as Natura 2000 site shows a very useful potential for reserve managers, both from the point of direct raw data exploitation as well as the exploitation of 3D point clouds generated from it.

Keywords : Biodiversity, dynamic cartography, microdrone, 3D point clouds

1. Introduction

La cartographie de la végétation est un enjeu majeur pour l'étude de la biodiversité. Si cette cartographie peut se faire régulièrement, l'étude de la dynamique de l'écosystème devient alors possible et ouvre la porte à une meilleure compréhension des interactions complexes que l'on observe chez les espèces végétales entre elles, avec leur milieu et les espèces animales dont elles forment l'habitat. Cette connaissance est un préalable à l'élaboration de modèles permettant aux décideurs de surveiller et d'anticiper l'évolution des situations potentiellement à risque. La section suivante se propose de faire un bref rappel sur la classification des espèces végétales, puis nous présenterons les moyens classiques mis en œuvre et leurs limitations. Ensuite, nous présenterons le drone Faucon Noir ainsi que la charge utile cartographique dédiée permettant d'obtenir des données complémentaires à celles issues des moyens classiques de télédétection. Enfin nous ferons un retour d'expérience basé sur l'étude d'un site classé Natura 2000 au niveau de l'exploitation directe des données brutes ainsi que le potentiel des nuages de points 3D réalisés à partir de celles-ci pour l'estimation de paramètres dendrométriques.

2. Cartographie dynamique de la biodiversité et des écosystèmes

2.1. Classification des espèces végétales

Critères statiques et contraintes

Depuis l'époque des grands naturalistes comme Linné et Buffon qui ont posé les bases de l'observation des espèces et de leur classification (McNeill et al., 2006), les biologistes ont tenté, par une observation rigoureuse, de préciser ces classifications en se basant sur la forme des individus (classification populaire), sur leurs propriétés (classification phénotypique) ou plus récemment sur leur parenté génétique (classification phylogénétique) (Stuessy, 2009).

La discrimination fiable des espèces reste une problématique importante. Au sein d'un éco-système, nous pouvons faire une première distinction d'échelle. On parle d'arbuste pour tous les arbres mesurant jusqu'à 7-8 mètres maximum. Les arbrisseaux, quant à eux sont des plantes vivaces¹ ramifiées dès la base et de petite hauteur. Contrairement aux arbustes, ces derniers ne possèdent pas

1. Une plante vivace possède un cycle de vie qui dépasse deux ans, en opposition aux plantes annuelles et bisannuelles.

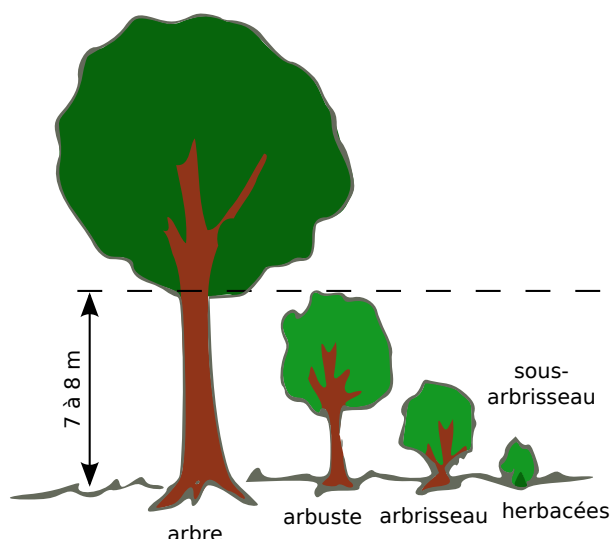


FIGURE 1: Distinctions d'échelle entre les plantes.

Source : Gademer

de tronc principal distinct, leurs troncs multiples font généralement moins de cinq centimètres. Les herbacées, pour leur part, se définissent en opposition aux plantes ligneuses comme les arbres ou arbrisseaux qui produisent du bois. On retrouve ces distinctions sur la figure 1.

Au regard de la petite taille et de la forte densité des deux derniers représentants de l'échelle que nous venons de citer, le risque de mauvaise classification est grand. D'autant plus que certaines espèces présentent des phénotypes très proches et d'autres encore sont fortement intriquées avec leurs parasites ou avec les autres plantes qui partagent leur milieu. Tous ces critères sont autant de contraintes qui les rend difficile à distinguer les unes des autres.

Critères dynamiques

Pour améliorer la discrimination, cette vision statique des espèces peut être complétée par une vision dynamique des individus au sein de leurs écosystèmes. En effet, l'étude de la dynamique des milieux naturels cherche à comprendre les interactions des espèces entre elles et avec leur milieu, ainsi que l'évolution dans le temps de ces interactions. Cela nécessite de s'appuyer aussi bien sur des connaissances en taxinomie et en physiologie qu'en climatologie, géologie ou pédologie. Il est alors possible de s'appuyer sur les caractéristiques phénologiques des espèces végétales, c'est-à-dire l'influence des variations climatiques et des saisons sur les phénomènes cycliques de la plante, comme la germination ou la floraison : certaines plantes annuelles ou bisannuelles ne sont visibles que pendant une partie de l'année et, chez les plantes vivaces, les espèces d'apparence proche se distinguent beaucoup plus clairement durant leur floraison. De plus, comme elles ne fleurissent pas obligatoirement au même moment, le risque de confusion diminue.

Les besoins de cette discipline sont donc particuliers

puisqu'elle exige à la fois un suivi spatial précis et une série de classifications temporelles *instantanées* adaptées au rythme de vie des individus.

2.2. Méthodes de cartographie des espèces végétales

L'évolution dynamique des écosystèmes est ainsi étudiée par l'élaboration répétée de cartes d'occupation des sols qui intègrent les paramètres spatio-temporels de la classification : l'emplacement, l'étendue ainsi que les paramètres de surface biophysique (espèce, âge, état de santé, etc.) et géophysiques (type de sol, humidité, exposition, etc.) de chaque groupe d'individus sont identifiés et annotés. Ces cartes sont autant de représentations de l'état de la zone d'étude au moment de sa réalisation.

Ce type d'études, comme celles décrites par Heller et Zavaleta (2009), peuvent s'étendre sur de longues périodes allant jusqu'à plusieurs dizaines d'années. En botanique, où les espèces ont généralement des espérances de vie relativement longues (environ 50 ans pour les arbrisseaux, une centaine d'années ou plus pour les arbres), la périodicité des cartes dynamiques est de l'ordre de trois à dix ans. On remarquera que de nombreuses espèces d'adventices sont annuelles ou bisannuelles et ont donc des cycles d'évolution beaucoup plus rapide. Nous noterons donc que lorsque l'on se place dans le contexte de prévision de risque, il est nécessaire que la périodicité des cartes dynamiques soit encore plus rapprochée lors des études classiques des écosystèmes.

Cartographie manuelle

Souvent, faute d'une alternative technique permettant de saisir cette réalité terrain, la cartographie dynamique du vivant est réalisée manuellement via l'annotation de cartes papier par une équipe réduite de chercheurs et d'étudiants. Comme nous l'avons rapidement constaté au contact des botanistes du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN)², on comprend que cela implique une logistique fastidieuse et que les coûts humain et financiers de cette cartographie deviennent alors un facteur limitant la qualité et la quantité des observations et par conséquent de la portée du travail d'analyse et d'interprétation, malgré l'utilisation de techniques statistiques et de la définition d'un échantillon représentatif des sites à étudier.

De plus, une cartographie submétrique sur quelques hectares pouvant durer plusieurs mois, les superficies des zones d'étude couvertes sont souvent faibles. À titre d'exemple, l'équipe du MNHN met environ cinq semaines à raison de deux botanistes pour couvrir les deux hectares de leur zone d'étude. Dans ces conditions, la moindre limitation de ressources se traduit alors très vite par une réduction de la zone cartographiée, pénalisant de ce fait la qualité statistique de l'étude finale.

Cette durée étendue de retranscription sur le terrain pose d'autres problèmes. Tout d'abord sur la précision de la cartographie. Le temps nécessaire à la description

2. Écologie tropicale de l'UMR 7179 département Écologie et Gestion de la Biodiversité. CNRS - MNHN.



FIGURE 2: Exemples de cartographies manuelles. En haut, un écologiste forestier mesure le diamètre des arbres près du Smithsonian Environmental Research Center (Source : ©K. Bauer/SERC), carottage des sols par les membres du Muséum National d'Histoire Naturelle (Source : ©B. Riera/CNRS-MNHN), relevé du profil linéaire de hauteur du sol avec un rugosimètre à aiguilles, (Source : weru.ksu.edu), carte localisant différents groupes phytogéographiques (Source : ONF (2000))

de chacun des individus étant prohibitif, les botanistes définissent alors des groupes phytogéographiques — relativement homogènes — qu'ils caractérisent spatialement avec une précision de l'ordre de 20 centimètres. Ces groupes sont des approximations des caractéristiques floristiques des individus : les plants de *Calluna vulgaris* inférieurs ou supérieurs à 40 centimètres par exemple. Ils ne prennent cependant pas en compte l'éventuel mélange des espèces au sein d'un groupe, la densité des individus, leur âge précis ou leur état de santé.

Mais elle pose aussi des problèmes sur la fiabilité de la classification. Nous avons évoqué la possibilité de s'appuyer sur les caractéristiques phénologiques des espèces pour améliorer la distinction, mais cet avantage peut se transformer en inconvénient du fait de l'étalement de la cartographie dans le temps : sur un mois de travail, les mêmes phénomènes phénologiques peuvent modifier l'apparence des plantes et perturber l'observateur.

Ajoutons à cela que la cartographie manuelle est sujette à un fort biais subjectif qui augmente le degré d'incertitude sur les données lors de la comparaison de cartes de la même zone d'étude mais réalisées sans concertation par des observateurs différents.

On notera aussi que, faute d'une visibilité statistique suffisante, les espèces peu représentées et/ou à durée de vie courte, ne peuvent pas intégrer la cartographie, au détriment de l'analyse de l'écosystème complet.

On retiendra que la cartographie manuelle des groupes phytogéographiques est un travail minutieux qui doit s'adapter aux cycles naturels des espèces que l'on cherche à identifier et que si une approche floristique, basée sur les individus serait beaucoup plus riche et plus intéressante pour les botanistes, elle reste souvent inaccessible avec les moyens actuels à leur disposition. Enfin, le suivi à long terme impose souvent un changement des observateurs du terrain ce qui peut induire des changements d'affectation des groupements observés sur le terrain dans la classification des communautés végétales.

Cartographie par télédétection

Une autre manière de réaliser ces cartes consiste à employer des techniques avancées d'imagerie. En effet, nous avons pu observer des bénéfices considérables dans le suivi de la dynamique des écosystèmes par l'usage de la télédétection (Jensen, 2007). On peut voir plus particulièrement dans l'article de Lu (2006) le potentiel de la télédétection pour l'évaluation de la biomasse végétale au-dessus du sol — soit l'ensemble des ressources vivantes (arbres, buissons, plantes, etc.) dans un espace donné.

La télédétection offre la possibilité d'effectuer une cartographie plus rapide que la cartographie manuelle et permet donc d'envisager plusieurs observations à des moments différents du cycle phénologique (floraison, feuillaison, coloration des feuilles, etc.) et ainsi une bien meilleure identification/différenciation des individus³, ainsi que l'i-

3. Si la callune et la bruyère sont difficile à différencier à l'oeil nu, elles n'ont ni la même fleur ni la même époque de

dentification de certaines plantes au cycle court⁴ (visible uniquement durant quelques mois).

Il faut cependant préciser qu'une des limites de ce système est généralement l'inadéquation entre l'échelle de mesure sur le terrain et l'échelle des images acquises. Si la télédétection spatiale permet des observations sur de grandes échelles spatiales et temporelles, elle manque généralement de précision pour comprendre les phénomènes complexes en jeu. Il est alors généralement nécessaire de certifier les données par des relevés sur le terrain, ce que nous nommons communément *vérités terrain*. Nous pouvons citer les travaux de Houghton et al. (2007) et Muukkonen et Heiskanen (2007) qui cherchent à établir une relation entre les mesures locales obtenues lors des relevés terrain et les caractéristiques (de signature spectrale, de texture ou de volume) des données acquises par les satellites afin d'extrapoler cette relation à l'étude des territoires beaucoup plus vaste.

Un autre point critique concerne la précision de cette cartographie. En effet, si les cartographies forestières peuvent s'appuyer en partie sur l'imagerie aérienne ou satellite (Houghton et al., 2007; Muukkonen et Heiskanen, 2007), la cartographie des arbrisseaux et des herbacées ne peut généralement être effectuée que par l'annotation manuelle lors des relevés terrain. On comprend que la petite taille de ces plantes — entre 20 centimètres et 1 mètre —, ainsi que leur forte densité et degré d'intrication, ne permettent pas les approches classiques, basées sur l'interprétation des images de télédétection, qui sont utilisées pour dénombrer les arbres. Enfin, ces images ont une résolution compatible pour les études de changement des paysages, mais qui n'est pas suffisante pour détecter les changements des communautés végétales au sein du même type de paysage ni pour un suivi d'une petite population d'une dizaine des individus dispersés, en plus du coût élevé d'acquisition de ce type de données.

Cartographie à l'échelle des individus

C'est dans ce contexte que nous nous sommes interrogés sur l'intérêt d'un nouveau concept intégrant potentiellement les avantages de l'imagerie (notamment la rapidité et le coût plus faible de l'acquisition par rapport à l'acquisition manuelle), allant de l'analyse comparée ou l'extraction automatique de paramètres de surface, aux méthodes de relevés terrain, tout en conservant l'auto-certification de la réalité terrain, l'aspect quantitatif des paramètres biophysiques ou géophysiques mesurés ainsi que la souplesse d'adaptation aux conditions extérieures. Ce nouveau concept allait permettre d'améliorer significativement l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques lors des missions terrain.

Pour que cela fonctionne, il est nécessaire de travailler avec des données (images) à l'échelle des individus.

floraison. Deux observations à deux époques judicieusement choisies permettraient de les différencier facilement.

4. Comme les crucifères ou les rumex acetosella

3. Le système Faucon Noir pour une cartographie locale centimétrique

3.1. Un porteur de type quadricoptère

Le cadre opérationnel visé reste restreint à des zones de faible étendue géographique (quelques hectares à quelques dizaines d'hectares). Par contre, la résolution souhaitée des images sur la parcelle, en accord avec les thématiques, est de l'ordre du centimètre. Cette haute résolution impliquant une fauchée des images réduite, la couverture systématique de la zone d'étude doit pouvoir être effectuée à terme de manière semi-automatique. Ainsi, nous avons privilégié un porteur agile, doté d'une manœuvrabilité importante pour réagir sans problème aux rafales de vent tout en étant capable de suivre un plan de vol composé de nombreuses lignes brisées. Du point de vue opérationnel la capacité de pouvoir décoller et atterrir dans un petit périmètre directement sur zone, ainsi que de pouvoir effectuer un vol stationnaire ou aussi lent que désiré sont des avantages importants. Cependant, la plupart de ces systèmes, aussi appelés VTOL pour Vertical Take Off and Landing, ont une endurance généralement limitée car ils consomment énormément d'énergie pour se maintenir en l'air et une capacité d'emport qui n'atteint pas celle des ailes fixes et des porteurs captifs. Parmi les VTOL, les multirotors se distinguent des hélicoptères par une capacité d'emport de matériel plus importante. De plus, grâce à leurs hélices courtes, ils sont plus faciles et moins dangereux à manipuler. Mais contrairement aux hélicoptères qui assurent leur stabilité mécaniquement grâce à la barre de Bell et à leurs longues hélices, les multirotors sont naturellement instables, ce qui est généralement compensé par un asservissement électronique actif. Puisque l'hélice est à pas fixe pour un moteur de type multirotors, la portance générée est directement proportionnelle à la vitesse de rotation. Cette simplification mécanique simplifie grandement la modélisation du système et le développement et l'implémentation en embarqué des algorithmes de contrôle et de commande et explique le vif succès de ces plateformes en peu d'années. Concrètement, pour que la plateforme monte, il suffit que tous les moteurs tournent plus vite. Le roulis ou le tangage est obtenu en introduisant un gradient entre le moteur droit et gauche ou avant et arrière. Le lacet s'obtient lui en introduisant un gradient entre paire de moteurs opposées. Du point de vue de l'asservissement, un simple algorithme de type Proportionnel, Intégral Dérivé (PID) effectué à une fréquence de quelques centaines de hertz suffit pour gérer l'essentiel des situations opérationnelles normales.

Pour pouvoir bénéficier d'un système totalement adapté à nos contraintes et profiter complètement des interactions entre porteur et charge utile (récupération de la position GPS, de l'attitude, de l'altitude...), nous avons développé notre propre prototype de quadricoptère, appelé Faucon Noir (Gademer et al., 2010; Gademer, 2010).

L'architecture du système est composée d'une couche bas niveau basée sur un microcontrôleur temps réel pour prendre en charge tous les dispositifs vitaux comme le

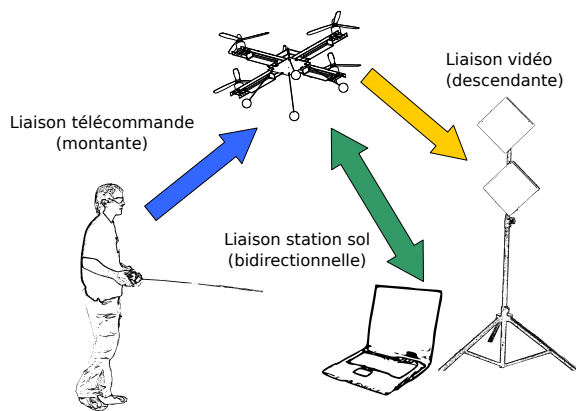


FIGURE 3: Liaisons montantes et descendantes entre le sol et le drone.

Taille (L×l×h) en <i>cm</i>	70 × 70 × 35
Poids (hors charge utile)	1.6 <i>kg</i>
Poids max. charge utile	1 <i>kg</i>
Puissance max.	1 <i>kW</i>
Endurance	20 minutes
Hauteur de vol max. en manuel	80 <i>m</i>
Hauteur de vol max. en automatique	150 <i>m</i>

TABLE 1: Principales caractéristiques du drone Faucon Noir.

contrôle de la stabilité ou la communication avec le pilote et une couche haut niveau basée sur un ordinateur embarqué sous linux et dédiée aux tâches complexes mais non vitales comme la navigation sur points GPS ou l'enregistrement des données en vol par exemple. Conçu pour être adaptable, le système de base peut être complété par des périphériques à la demande.

En ce qui concerne les liaisons entre le vecteur et le sol, celles-ci sont au nombre de 3 : la première est de type télécommande d'aéromodélisme et relie le pilote au vecteur. Cette liaison montante est prioritaire sur toutes les autres. La seconde est descendante et permet d'avoir un retour vidéo direct. La troisième est montante pour le contrôle de la charge utile ou d'un changement de plan de vol (ordres de haut niveau) et descendante pour la télémesure (figure 3).

Outre les aspects matériels, notre retour d'expérience nous a convaincu de compléter le système par une suite de logiciels, chacun dédié à une phase bien spécifique de l'opération : sa préparation, la définition d'un plan de vol préalable, le retour en temps réel des données de télémesure et de contrôle du drone et de sa charge utile. Les principales caractéristiques physiques du drone Faucon Noir sont résumées au tableau 1.

La figure 4 montre le drone Faucon Noir en vol pendant la mission.

3.2. La charge utile cartographique

3.2.1. Une solution multi-caméras

En considérant la vitesse de vol de notre appareil, la taille de l'échantillon au sol (GSD) de 1 cm maximum



FIGURE 4: Le drone Faucon Noir en vol pendant la mission.

que nous avons choisi nous impose un délai de 6 secondes (vitesse minimale) à 3 secondes (vitesse maximale) entre deux prises de vue pour obtenir un recouvrement dans l'objectif d'effectuer de la stéréo-reconstruction (60% au minimum). Cette contrainte est atteignable pour la plupart des appareils photographiques numériques du commerce.

En revanche, d'un point de vue opérationnel, l'instabilité des plateformes de type micro drone rendent la fiabilité du recouvrement difficile. Nous avons donc choisi de développer une charge utile dédiée à la cartographie. De type multi-caméras, elle permet de prendre des prises de vues simultanément et assure donc l'obtention de couples stéréoscopiques synchronisés.

On peut distinguer trois types de systèmes multi-caméras (Petrie, 2008) :

- les systèmes "en éventail" qui regroupent plusieurs caméras alignées perpendiculairement à l'axe de vol et présentant de forts angles d'incidences et donc de fortes déformations géométriques.
- les systèmes "en bloc" regroupant des caméras présentant des angles d'incidence très faibles, peu de déformations.
- les systèmes "en croix de malte", constitués d'une caméra verticale, entourée de plusieurs caméras obliques. Ce type de système est particulièrement recherché pour des applications de défense et sécurité (Petrie (2009) ainsi que pour la cartographie de l'occupation des sols (Lemmens et al., 2008) en raison de la facilité de photo-interprétation visuelle des images obliques.

Notre charge utile est composée de trois appareils alignés dans l'axe de vol. L'orientation des appareils avant et arrière est réglable en vol et nous permet d'obtenir selon les besoins de la mission la configuration de type "croix de malte" ou "bloc" (figure 5).

Les appareils de prise de vues doivent avoir une bonne qualité d'image, supporter les réglages manuels, tout en restant les plus petits et légers possibles. Shortis et al. (2006), Habib et Morgan (2005) et Remondino et Fraser (2006) montrent que la qualité des images produites par les appareils photographiques numériques non professionnels est satisfaisante pour des applications de téléédé-

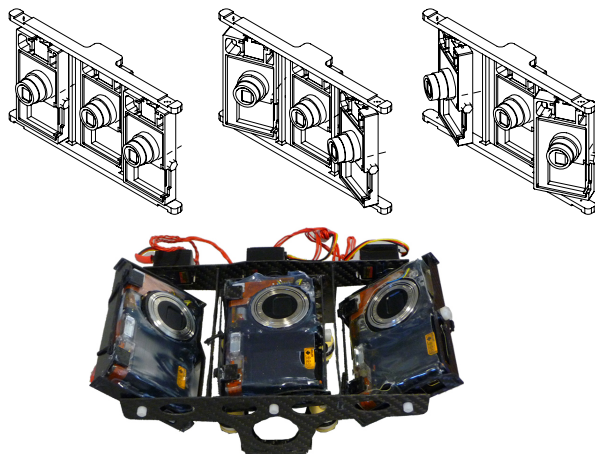


FIGURE 5: Orientation modulable des appareils de prise de vue et la charge utile cartographique.

tection. Les déformations dues aux optiques non professionnelles peuvent être considérées comme acceptables avec des systèmes de lentilles fixes si l'on prend la peine d'effectuer une calibration avant le vol. Nous avons donc choisi trois appareils photographiques numériques compacts de poids inférieur à 200 grammes permettant ainsi de respecter la contrainte d'une charge utile inférieure à 1 kilogramme.

3.2.2. Le contrôle de la charge utile

Le contrôle d'un appareil photographique recouvre les opérations courantes d'allumage et de déclenchement de l'acquisition et dans notre cas, la datation et la validation des prises de vues. Un autre point pour la géolocalisation des données concerne la synchronisation des prises de vues entre les appareils eux-mêmes et avec les autres capteurs du système. C'est d'autant plus important que les quadrirotors sont des porteurs qui peuvent changer de position extrêmement rapidement.

Généralement les systèmes proposés dans le commerce ne s'occupent que du déclenchement : les appareils doivent être allumés manuellement et les utilisateurs doivent se contenter de la datation interne de l'appareil. Les systèmes de déclenchement automatisés (mécaniques, infrarouge) ne s'avèrent pas répondre à nos critères. Lors de nos tests avec une télécommande infrarouge nous nous sommes rendus compte que la fréquence de prise de vue était très basse, que la synchronisation était déplorable et que l'ordre de prise de vue pouvait être ignoré si l'appareil photographique n'était pas prêt.

Nous avons donc choisi une solution intrusive qui consiste à se connecter directement sur l'électronique interne de l'appareil photographique. Notre carte de contrôle électronique utilise les capacités des micro-contrôleurs pour servir de relais, analyser les signaux provenant de l'appareil et communiquer avec le reste du système. Elle peut déclencher électroniquement les prises de vues de manière simultanée et les dater dès que le signal d'acquisition est émis, le tout avec une précision de l'ordre de 20 milliseconde. L'appareil photographique numérique

devient alors un périphérique totalement contrôlable.

4. Retours d'expérience

4.1. Cas d'étude : le site de la forêt des Trois Pignons

Dans le cadre de cet article, nous présenterons nos travaux effectués en collaboration avec une équipe du Muséum d'Histoire Naturelle⁵ qui visaient à étudier l'évolution de la dynamique de la végétation sur la zone test de la Mare aux Joncs située dans la forêt domaniale des Trois-Pignons, près de Fontainebleau, au sud est de la région parisienne. Cette zone de quatre hectares située à la frontière entre la lande et la forêt est principalement peuplée d'arbrisseaux (< 80 cm) et de graminées ainsi que d'arbres isolés produisant des rejets.

Jusqu'ici la cartographie de cette zone était effectuée principalement par des relevés terrains complétés par des ortho-images aériennes fournies par l'IGN. Pour ces relevés, les botanistes ne considèrent que les individus supérieurs à 10 cm de diamètre lors de leur expertise sur le terrain. Néanmoins l'identification formelle des espèces de ces individus nécessite parfois de reconnaître des éléments structuraux de quelques centimètres. En considérant une luminosité moyenne et une ouverture de diaphragme standard, nous avons fixé le temps d'exposition entre 1/400 s et 1/800 s, ce qui fixe une vitesse de vol maximum de l'ordre de 7 à 15 km/h et élimine de fait la plupart des porteurs à aile fixe qui nécessitent une vitesse supérieure pour leur sustentation.

Un bilan qualitatif du potentiel des images acquises par le système Faucon Noir pour la cartographie de la végétation sur le site d'étude a été effectué par des botanistes du Muséum (Mobaied (2011)). La méthodologie retenue a consisté à comparer le résultat de la classification manuelle des types de végétation faite à partir des images de Faucon Noir aux relevés faits manuellement sur le terrain sur une grille décimétrique. Cette comparaison montre que quatre types de végétation (callune haute continue, callune ouverte discontinue, les formations à molinie et les zones boisées) parmi les sept types présents sont correctement distinguées. En revanche, les zones de bruyère cendrée, de petite oseille, les vasques sèches à mousses et lichens ne le sont pas. Par ailleurs, l'ensemble des arbres, rejets et plantules au sein de la lande ont été correctement recensés et géolocalisés. Enfin, concernant la gestion de la Réserve Biologique Dirigée, les deux menaces principales de la lande (le reboisement par les espèces ligneuses et l'apparition des graminées) ont été identifiées et qu'une cartographie automatique de la végétation (Bruyère, Graminée, Boisement) permettant de calculer automatiquement la surface au sol recouverte par chaque classe de végétation a pu être effectuée. Ces images présentent donc un fort intérêt pour positionner les arbres et les rejets et donc savoir la densité de ces individus sur une zone donnée, ce qui pourrait permettre aux gestionnaires de mieux planifier les interventions pour la

5. Tropical ecology, UMR 7179, Ecology and Management of Biodiversity department. CNRS - MNHN

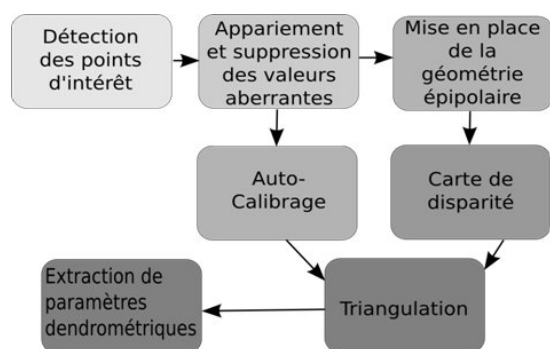


FIGURE 6: Synoptique de l'algorithme de reconstruction 3D.

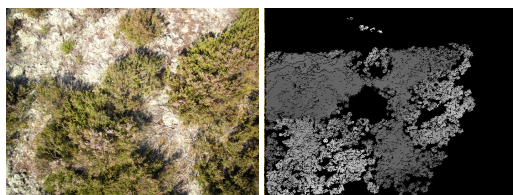


FIGURE 7: Image typique de la zone d'étude et carte de disparité obtenue.

gestion de ces milieux dans le cadre des programmes de maintien des landes.

4.2. Potentialités pour la mesure de paramètres dendrométriques à partir d'une reconstruction 3D

Pour compléter l'analyse qualitative précédente, nous nous sommes intéressés à l'estimation de paramètres dendrométriques à partir d'une reconstruction 3D de la zone. La méthodologie de réalisation de ce modèle 3D est présentée à la figure 6 (Petitpas (2011); Petitpas et al. (2010)). Les principales étapes de cette reconstruction sont : l'appariement de coins pour la mise en géométrie épipolaire (Bay et al. (2008)), puis l'obtention des cartes de disparité et la triangulation dans l'espace 3D euclidien au moyen d'un calibrage obtenu par ajustement de faisceaux (Oram (2001); Faugeras (2006); Hartley et Zisserman (2004)). La figure 7 montre une image typique de la zone et la carte de disparité obtenue (taux de recouvrement du couple d'images de l'ordre de 80%). La figure 8 illustre un exemple de nuage de points 3D obtenu sur un des arbres du site en vision latérale et verticale. Sans référentiel extérieur, les mesures effectuées dans l'espace 3D sont en pixels et non en centimètres. Une mesure physique sur place de la taille réelle d'objets car-

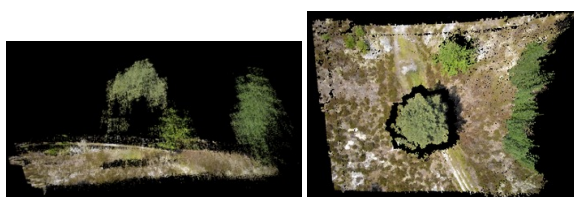


FIGURE 8: Nuage de point 3D obtenu sur un des arbres de la zone (vision latérale et verticale).

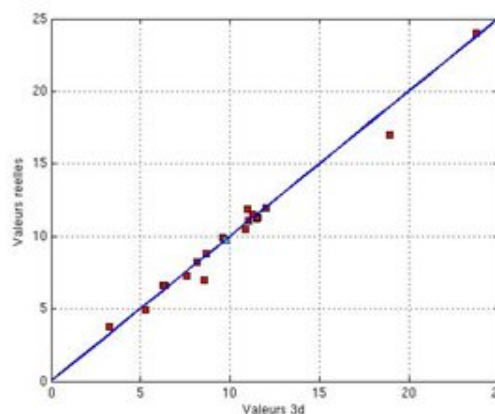


FIGURE 9: Relation entre la taille estimée depuis le modèle 3D et la réalité sur des objets de différentes tailles.

actéristiques permet de résoudre ce problème. La figure 9 montre une bonne correspondance entre la taille estimée par le modèle 3D et la réalité sur des objets de différentes tailles. La dendrométrie représente la caractérisation et les mesures physiques effectuées sur la végétation, comme la hauteur ou la forme. Ces données sont très importantes pour la caractérisation de la dynamique des écosystèmes et de leur diversité. Cependant, l'estimation de ces mesures se révèle souvent complexe sur le terrain. Néanmoins, plusieurs de ces paramètres, comme la surface terrière par exemple, peuvent être facilement estimés depuis les données 3D obtenues. Dans ce cadre, le potentiel des données acquises par le drone et la reconstruction 3D qui en découle présente un potentiel particulièrement intéressant.

5. Conclusion

Dans cet article, nous nous sommes intéressés à la cartographie de la végétation pour l'étude de la biodiversité et de la dynamique des écosystèmes à partir de données très basse altitude obtenues à partir d'un micro-drone. Dans un premier temps, nous avons fait un bref rappel sur la classification des espèces végétales et les méthodes classiques utilisées pour la réaliser. Puis nous avons présenté le système Faucon Noir composé d'un micro-drone de type quadricoptère et d'une charge utile cartographique dédiée. Enfin, nous avons présenté notre retour d'expérience sur une étude d'un site d'une zone classée Natura 2000 à partir de l'exploitation des données brutes et le potentiel des nuages de points 3D réalisés à partir de celles-ci pour effectuer des mesures de paramètres dendrométriques.

Références

- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L., 2008. Speeded-up robust features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding* 110 (3), 346–359.
- Faugeras, O., 2006. *Three-Dimensional Computer Vision A Geometric Viewpoint*. MIT press.

- Gademer, A., Décembre 2010. Réalité Terrain Étendue : une nouvelle approche pour l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques à l'échelle des individus. Thèse de doctorat, Laboratoire Acquisition et Traitement des Images et des Signaux (ATIS) & Laboratoire Géodésie, Télédétection et Modélisation des Connaissances (GTMC / Univ. Marne-la-Vallée), École doctorale Mathématique et STIC de l'Université Paris-Est.
- Gademer, A., Petitpas, B., Mobaied, S., Beaudoin, L., Riera, B., Roux, M., Rudant, J., 2010. Developing a low cost Vertical Take Off and Landing Unmanned Aerial System for centimetric monitoring of biodiversity - the Fontainebleau case. Dans : IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010. IGARSS 2010. pp. 600–603.
- Habib, A., Morgan, M., 2005. Stability Analysis and Geometric Calibration of off-the-shelf digital cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71 (6), 733–741.
- Hartley, R., Zisserman, A., March 2004. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
- Heller, N., Zavaleta, E., 2009. Biodiversity management in the face of climate change : a review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* 142 (1), 14–32.
- Houghton, R., Butman, D., Bunn, A., Krankina, O., Schlesinger, P., Stone, T., 2007. Mapping Russian forest biomass with data from satellites and forest inventories. *Environmental Research Letters* 2, 045032.
- Jensen, J., 2007. *Remote sensing of the environment : an earth resource perspective*. Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall.
- Lemmens, M., Lemmen, C., Wubbe, M., et al., 2008. *Pictometry : Potentials for Land Administration*.
- Lu, D., 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* 27 (7), 1297–1328.
- McNeill, J., Barrie, F., Burdet, H., Demoulin, V., Hawksworth, D., Marhold, K., Nicolson, D., Prado, J., Silva, P., Skog, J., et al., 2006. *International code of botanical nomenclature (Vienna Code)*.
- Mobaied, S., 2011. The spatiotemporal dynamics of vegetation and the distribution of biodiversity in forest-heathland interfaces. Implications for conservation management of nature reserves. Thèse, Muséum National d'Histoire Naturelle.
- Muukkonen, P., Heiskanen, J., 2007. Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data : A possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment* 107 (4), 617–624.
- ONF, 2000. *Étude écologique d'une lande de platière, non publié*.
- Oram, D., 2001. Rectification for any epipolar geometry. Dans : *Proc. British Machine Vision Conf.* pp. 653–662.
- Petitpas, B., 2011. Extraction de paramètres bio-géo-physiques de surfaces 3D reconstruites par multi-stéréo-restitution d'images prises sans contraintes. Thèse, Université Paris-Est de Marne-la-Vallée.
- Petitpas, B., Beaudoin, L., Roux, M., Rudant, J.-P., 2010. Roughness measurement from multi-stereo reconstruction. Dans : *PCV*.
- Petrie, G., 2008. Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Cameras. Dans : *VIII International Scientific & Technical Conference "From Imagery to Map : Digital Photogrammetric Technologies"*. Univ. of Glasgow, september 15-18, 2008 – Porec, Croatia.
- Petrie, G., Février 2009. Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Frame Cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, pp. 102–107.
- Remondino, F., Fraser, C., 2006. Digital camera calibration methods : considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (5), 266–272.
- Shortis, M., Bellman, C., Robson, S., Johnston, G., Johnson, G., 2006. Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Stuessy, T., 2009. *Plant taxonomy : the systematic evaluation of comparative data*. Columbia Univ Pr.