



Développement du potentiel du lidar embarqué sur systèmes légers pour la gestion des forêts privées françaises

Intitulé Français et Anglais (à renseigner dans IrsteAccueil):

Développement du potentiel du lidar embarqué sur systèmes légers pour la gestion des forêts privées françaises

Developing the potential of lidar systems for UAVS and light aircrafts for the management of French private forests

Résumé français et anglais (à renseigner dans IrsteAccueil):

Ce travail de thèse a pour objectif d'apporter des solutions permettant aux acteurs du secteur forestier privé d'appliquer la politique forestière nationale qui vise à assurer une gestion durable des écosystèmes forestiers. L'amélioration des connaissances sur l'état des forêts privées, qui représentent près des $\frac{3}{4}$ des forêts françaises, est un point de départ indispensable à la mise en œuvre de cette politique au travers de l'élaboration de plans simples de gestion. Le potentiel du Lidar aéroporté (ALS) pour apporter une partie des informations requises est démontré. Mais, en pratique, les produits issus de cette technologie restent inaccessibles pour le secteur forestier privé en raison des coûts d'acquisition des données élevés, du manque de flexibilité de mise en œuvre des systèmes aéroportés et de méthodes d'analyse nécessitant un investissement important pour le recueil de données de référence terrain. Dans ce contexte, l'enjeu de ce travail est donc de développer une chaîne opérationnelle allant de l'acquisition des données jusqu'à l'élaboration de produits adaptés aux besoins du secteur forestier privé, en s'appuyant sur des systèmes récents d'acquisition légers embarqués sur drone ou ULM qui permettent de réduire les coûts de la donnée. Il s'agira alors de développer des méthodes d'extraction d'informations adaptées aux besoins des forestiers à partir de ces données qui sont assez différentes des données Lidar aéroportées, avec une plus forte densité de points et une géométrie d'acquisition spécifique. On cherchera aussi à développer des approches d'apprentissage profond (deep learning) et d'adaptation de domaine (domain adaptation) pour permettre de valoriser des jeux de données Lidar et terrain préexistants lors de la construction de modèles de prédiction de paramètres forestiers. L'objectif est ici de limiter la quantité de relevés terrain nécessaire à l'analyse d'un nouveau jeu de données Lidar. En cas de succès, ces approches particulièrement novatrices pourraient avoir un impact majeur sur l'utilisation opérationnelle des données Lidar, qu'elles soient acquises depuis des systèmes légers ou depuis des avions.

Abstract:

The objective of this thesis is to provide solutions enabling private forest sector stakeholders to apply the national forest policy that aims at ensuring sustainable management of forest ecosystems. Improving knowledge on the state of private forests, which accounts for nearly three-quarters of

French forests, is an essential starting point for the implementation of this policy through the development of Simple Management Plans. The potential of airborne Lidar (ALS) to provide part of the required information has been demonstrated. However, in practice, products derived from ALS remain inaccessible to the private forest sector due to the high costs of data acquisition, the lack of flexibility of traditional airborne acquisition system operation and the significant investment in field reference data collection needed to properly analyze Lidar data. In this context, this work focuses on the implementation of an operational chain, from data acquisition to the development of products meeting the information requirements of the private forest sector, and based on the use of light systems embedded on UAV or ultralight aircrafts to acquire data at lower costs and when necessary. Methods will have to be developed to process this new lidar data in a way enabling to extract information meeting foresters' needs. Indeed, such data are quite different from airborne Lidar data, with higher point densities and a specific geometry of acquisition. Another research challenge will be to develop deep learning and domain adaptation approaches to enable the mobilization of pre-existing Lidar and field data sets when building a model to predict forest parameters on a new study site. The aim is to limit the amount of field work needed to analyze a new Lidar dataset. If successful, these particularly innovative approaches would have a major impact on the operational use of Lidar data, whether acquired from light systems or from aircraft.

Contexte général et enjeux

Les forêts assurent de multiples fonctions qu'il est important de préserver pour les générations futures. Dans un contexte de changement climatique et d'érosion de la biodiversité, il est primordial de mettre en place des pratiques de gestion forestière permettant aux forêts de remplir leur rôle de puits de carbone et de réservoir de biodiversité, tout en continuant à assurer leurs fonctions de production et de récréation. En France près des $\frac{3}{4}$ des forêts appartiennent à des propriétaires privés. Ces forêts sont souvent très morcelées et parfois sous-exploitées. Vu les coûts associés à la détention d'un patrimoine forestier, parvenir à gérer durablement les forêts privées implique que leur gestion assure un minimum de rentabilité économique (<http://www.foret-de-bourgogne.org>). Le plan simple de gestion (PSG) est un outil qui définit, entre autres choses, des objectifs de gestion à moyen et long termes, ainsi qu'un plan d'intervention (<http://www.foretpriveefrancaise.com>). Dans une démarche de prise en compte de considérations environnementales au côté des considérations de production, les sylviculteurs ont besoin de disposer d'informations fiables sur leurs propriétés. La connaissance de la structure des peuplements forestiers, en plus de leur composition en essences, est particulièrement utile. De façon concrète, les gestionnaires s'appuient sur des informations synthétiques au niveau du peuplement (e.g., hauteur dominante, surface terrière) et sur des indicateurs de distribution des diamètres des arbres, parfois de leurs hauteurs, pour définir les objectifs de gestion d'un peuplement, déclencher des interventions sylvicoles ou encore estimer les volumes de bois ou la productivité. Par ailleurs certaines structures forestières favorisent la biodiversité en procurant une diversité d'habitats. La gestion peut ainsi être orientée de façon à préserver des conditions favorables à la biodiversité, en modélant un peuplement à partir de son état initial. Mais cela implique d'avoir une connaissance fine et spatialisée de la structure forestière. Dans ce contexte, la question de l'utilisation de la télédétection et en particulier de la technologie lidar pour produire une partie des connaissances nécessaires à la gestion des forêts privées se pose. Le potentiel de cette technologie pour caractériser la structure forestière, évaluer la ressource ou contribuer à l'étude de la biodiversité a déjà été démontré. Mais les capteurs utilisés jusqu'à présent,

principalement embarqués sur avion, entraînent des coûts élevés et un manque de flexibilité lors de l'étape d'acquisition. Et les méthodes développées demandent un investissement important pour le recueil de données de référence terrain. Ces deux points constituant des verrous pour développer l'utilisation du lidar aéroporté pour la gestion des forêts privées. L'utilisation de systèmes d'acquisition légers (drone, ULM) permet de lever les verrous au niveau des acquisitions. Leur potentiel pour être utilisés de façon opérationnelle pour la gestion forestière reste cependant à démontrer.

L'enjeu de ce travail est donc de développer une chaîne opérationnelle allant de l'acquisition des données jusqu'à l'élaboration de produits répondant aux besoins en information du secteur forestier privé, en s'appuyant sur les systèmes d'acquisition légers.

Conformité par rapport à la stratégie du département (TR, ADD) et liaison avec les inflexions du contrat d'objectifs

(Energie et territoires, inégalités environnementales et territoriales, biodiversité, services écosystémiques et ingénierie écologique, adaptation au changement global, santé environnement)

Ce projet de thèse a pour objectif d'apporter des solutions permettant au Centre National de la Propriété Forestière (CNPFF) et aux autres acteurs du secteur forestier privé de renforcer leur capacité à orienter la gestion des forêts privées dans le cadre de la politique forestière mise en œuvre par le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. Il s'inscrit ainsi parfaitement dans le modèle de recherche qui participe de l'identité d'Irstea.

L'amélioration des connaissances sur l'état des forêts privées est un point de départ indispensable à la mise en œuvre de cette politique, qui vise à assurer une gestion durable des écosystèmes forestiers en conciliant les dimensions économique, environnementale et sociale des forêts dans un contexte de changement global. De par sa contribution à la gestion durable des forêts, un lien pourrait être établi entre ce travail de thèse et les différentes actions de recherche affichées dans la nouvelle programmation d'Irstea. Mais en raison de sa position très amont, les actions de recherche auxquelles il contribuera le plus directement sont les suivantes :

- 1- Adaptation au changement global (inflexion 5)
- 2- Biodiversité, services écosystémiques, ingénierie écologique (inflexion 3)

En effet, pour faire face au changement global et atténuer certains de ses impacts, il est primordial d'adapter la gestion forestière pour permettre aux forêts de jouer un rôle actif dans la lutte contre le réchauffement climatique en renforçant leur capacité à stocker du carbone mais aussi en contribuant à la transition énergétique et la fourniture de matériaux renouvelables. Cette thèse ne vise pas à identifier et définir les stratégies de gestion qui permettront d'augmenter la résilience des peuplements forestiers aux impacts du changement climatique. Mais elle permettra aux forestiers, sur la base d'une description fine de l'état des écosystèmes forestiers et en tenant compte des connaissances sur les pratiques qui favorisent la résilience des écosystèmes, de choisir la stratégie de gestion à privilégier sur le moyen terme au niveau d'une propriété ou d'un groupe de propriétés dans un contexte territorial donné.

Par ailleurs, la gestion forestière doit aujourd'hui prendre en compte aux côtés de la valorisation économique de la ressource, les services environnementaux et écosystémiques rendus par la forêt. Dans son rôle d'appui auprès des propriétaires forestiers privés, le CNPF a pour mission de favoriser la prise en compte de ces aspects dans la gestion des forêts privées. Là encore une connaissance fine de l'état du milieu est indispensable pour choisir les modes de gestion à même de favoriser ces services aux côtés de la fonction de production. Les connaissances sur la façon dont la composition spécifique, la maturité et la structure forestière impactent la biodiversité ne cessent de progresser et il est possible de s'appuyer sur ces connaissances pour façonner la forêt en favorisant l'émergence de milieux propices à la biodiversité.

Le travail envisagé est ainsi en phase avec les inflexions du contrat d'objectifs de l'établissement et s'inscrit dans la nouvelle stratégie du département Territoires. Il contribuera notamment à trois des axes directeurs du département, i.e. les axes « Développement et ressources territoriales », « OAD et SI pour l'agriculture de précision et la gestion territoriale » et « Evaluation des fonctions et services écosystémiques et arbitrage entre eux ». En effet il a pour objectif de développer l'économie productive dans le secteur forestier en s'appuyant sur des outils d'aide à la décision (OAD) territoriaux pour gérer la ressource en tenant compte des différentes fonctionnalités de la forêt et de son rôle dans l'atténuation du changement climatique et le maintien de la biodiversité. Au niveau des OAD (centré sur la production de cartes de la ressource évaluée sous différents angles, i.e. production, stockage de carbone et biodiversité) un accent sera mis en particulier sur l'utilisation de jeux de données d'archive pour optimiser le processus de production de l'information.

Etat de l'art :

Le lidar (light detection and ranging) est en effet une technologie particulièrement intéressante pour mesurer la structure de la végétation (Durrieu et al. 2015; Lim et al. 2003; Van Leeuwen and Nieuwenhuis 2010). Cette technologie est basée sur l'émission-réception d'impulsions laser avec mesure du temps mis par la lumière laser pour atteindre une cible puis revenir au niveau du capteur après la rétrodiffusion par la cible qui produit un « écho ». Un positionnement précis du système à l'aide d'un GPS différentiel et d'une centrale inertielle – qui mesurent respectivement la position du système dans l'espace et son orientation - permet de géoréférencer le signal retour et d'en déduire la position des cibles interceptées par le faisceau lidar. Les données sont généralement délivrées par les prestataires de service sous forme d'un nuage de points 3D. Chaque point correspond à une cible à l'origine d'un écho d'intensité suffisamment importante, i.e. groupe de feuilles, branche ou tronc pour la végétation (Chauve et al. 2009; Wagner et al. 2006). L'utilisation du lidar est passée du domaine de la recherche à des applications opérationnelles dans certains contextes favorables, qui sont généralement caractérisés par un accès facilité à la donnée (par exemple données en open source dans certains pays) combiné à la relative simplicité des peuplements comme dans la plupart des pays d'Europe du Nord (Naesset 2007; White et al. 2013; Wulder et al. 2008). En France, plusieurs projets récents ont permis de proposer des modèles de prédiction de paramètres forestiers adaptés au contexte forestier français, y compris des modèles d'estimation de paramètres synthétiques de la structure tels que la hauteur dominante et la surface terrière (par ex. le projet ANR FORESEE (2010-2014) piloté par le FCBA) (Bouvier et al. 2015; Monnet et al. 2015; Véga et al. 2016). Ces résultats ont poussé l'ONF à acquérir des données lidar sur des sites pilotes afin d'évaluer la faisabilité de leur intégration lors de l'élaboration de plans d'aménagement. Les méthodes pour estimer de façon fiable les types structuraux restent cependant à développer. L'utilisation de profils

de LAI (Leaf Area Index) calculés à partir de Lidar (Bouvier et al. 2015; Vincent et al. 2017) offre des perspectives intéressantes pour la qualification de ces types structuraux. En parallèle, les connaissances sur l'impact des pratiques de gestion sur la biodiversité progressent (Bouget et al. 2012; Kuuluvainen 2009; Paillet et al. 2010). Les approches visant à intégrer les informations de la structure forestière en 3D mesurée par télédétection dans les recherches dans le domaine de la biodiversité et dans l'étude du lien entre biodiversité et pratiques de gestion se développent (Bergen et al. 2009; Bouvier et al. 2017; Müller and Brandl 2009; Vierling et al. 2008). Les informations de structure spatialisée apportées par le lidar constituent ainsi un atout pour prendre en compte simultanément et de façon intégrée les objectifs de production et de services écosystémiques lors de l'établissement de plan de gestion.

Cependant, si le lidar aéroporté a prouvé son potentiel pour contribuer à fournir des informations utiles à la gestion durable des forêts, son utilisation en forêt privée n'est pas envisageable à court terme, en l'absence d'une couverture nationale et régulière non encore planifiée. En effet, le morcellement de cette forêt, la dispersion dans l'espace et le temps des sites à caractériser qui en résulte donne lieu à un rapport coût / flexibilité des acquisitions qui est trop élevé pour pouvoir envisager de couvrir par Lidar aéroporté les surfaces concernées au moment d'établir ou de réviser un plan de gestion pour une propriété ou un groupe de propriétés. Depuis quelques années les Lidar embarqués sur systèmes légers (drone et ULM) se développent et offrent la flexibilité recherchée permettant ainsi de réduire significativement le coût à l'hectare des données (Matese et al. 2015). Le potentiel des Lidar embarqués sur drone pour le suivi des écosystèmes forestier a commencé à être exploré (Wallace et al. 2012; Wallace et al. 2014). Par ailleurs le couplage avec des données optiques est possible et peut amener un complément d'information précieux pour décrire les peuplements forestiers, en particulier en termes de composition (Getzin et al. 2012; Tang and Shao 2015). Faire appel à des capteurs embarqués sur drones apparaît donc comme une solution intéressante à explorer. Cependant envisager l'utilisation opérationnelle de données lidar drone pour gérer les forêts privées demande de lever trois verrous. D'une part les données ont des caractéristiques différentes des données Lidar aéroporté, i.e. une plus forte densité de points et une plage d'angles d'acquisitions plus large, qui impliquent de vérifier l'efficacité des méthodes de traitement existantes et de les adapter le cas échéant. D'autre part il est important de poursuivre les efforts pour parvenir à caractériser finement la structure de la végétation pour la gestion de la ressource en bois (e.g., estimation des distributions des hauteurs ou des diamètres à hauteur de poitrine) mais aussi pour des questions de valeur écologique des peuplements (Wang et al. 2010). Enfin il est primordial de travailler sur notre capacité à remobiliser des jeux de données de référence existants, incluant données de terrain et extraits de nuages de points associés, afin de réduire l'effort d'acquisition de nouveaux jeux de données terrain pour calibrer et valider les modèles de prédiction des attributs forestiers lors d'une nouvelle étude.

Objectifs du travail

L'objectif de cette thèse est de développer des méthodes et des produits pour apporter aux sylviculteurs des informations leur permettant d'optimiser leurs actions pour atteindre les objectifs de gestion durable visés par les professionnels de la forêt privée. Pour cela on s'appuiera sur le potentiel offert par les systèmes lidar légers, couplés le cas échéant avec des imageurs optiques, pour décrire et cartographier les peuplements à un coût supportable pour ces propriétaires.

Trois sous-objectifs sont identifiés:

- 1- Valider la capacité à transférer une partie des méthodes développées pour le traitement des données ALS aux cas des données acquises par des systèmes embarqués sur un drone ou un ULM ;
- 2- Développer de nouvelles méthodes pour améliorer les produits et proposer de nouveaux produits en tirant parti de la plus forte densité de points et de la plus grande variabilité d'angles de visée qui caractérisent les données acquises avec ces nouveaux systèmes lidar ;
- 3- Optimiser les coûts en développant des approches permettant de capitaliser et remobiliser de l'information de terrain collectée sur des placettes de référence lors d'études antérieures et stockée dans des bases de données avec les extraits de nuages de points correspondants et contemporains des relevés de terrain, on s'attachera à développer des méthodes permettant de remobiliser ces données d'archive pour l'analyse de nouveaux jeux de données Lidar.

Sites d'étude pressentis

Le site expérimental du CNPF situé près d'Ales, dans la région Occitanie : la proximité de ce site facilitera la réalisation d'expérimentations (acquisition de données avec des spécifications différentes ou à des dates différentes).

Des sites en région Bourgogne-Franche Comté seront aussi étudiés. La dynamique du secteur forestier privé de cette région, permettra en effet d'assurer la participation des propriétaires et gestionnaires et les établissements publics au service des propriétaires forestiers (CNPF, CRPF) pour identifier les produits d'intérêt et faciliter voire contribuer à la récolte des informations de terrain nécessaires au bon déroulement de la thèse.

Démarche pressentie par sous-objectif

- 1- Pour assurer la transférabilité de méthodes de l'ALS vers les données lidar drone ou ULM le doctorant s'appuiera sur la littérature et sur l'expérience d'Irstea et d'Info Géo Drones pour sélectionner les meilleurs modèles développés pour estimer hauteur dominante, volume de bois, biomasse aérienne et surface terrière. Le comportement de ces modèles sera évalué en fonction des conditions d'acquisitions afin d'en déterminer le domaine d'application. Les modèles pourront être adaptés pour mieux prendre en compte les spécificités des données lidar drone/ULM.
- 2- La plus forte densité de points et les angles de visées plus importants qui caractérisent les données lidar acquises depuis un drone ou un ULM apportent plus d'information sur les troncs et les rapprochent, par certains côtés, des données Lidar terrestre. Cela permet d'envisager la mise en place de méthodes de détection des arbres et l'amélioration de la prédiction des densités de tiges et des distributions des diamètres des troncs (dbh). Ces paramètres sont difficiles à estimer aujourd'hui à partir de données ALS. La forte densité de points permet aussi d'envisager des approches mixtes combinant approches à l'arbre et surfacique (niveau peuplement) pour tirer parti des avantages de chaque type d'approche et améliorer la prédiction de certains attributs forestiers. Le couplage avec les images optiques

pourra être exploité pour certains produits. L'aspect fusion des données Lidar/optique n'est cependant pas au centre du projet de thèse.

- 3- Une partie non négligeable du coût lors de l'analyse des données lidar réside dans l'acquisition de données de référence terrain contemporaines des acquisitions lidar. Ces données sont indispensables à la calibration/validation des modèles. La capacité à remobiliser des données existantes pour cette étape de calibration/validation constituerait une avancée significative en contribuant à lever le verrou que constitue le coût des données de base. Cette capacité dépend en grande partie de notre capacité à normaliser l'information Lidar afin de rendre comparables d'une acquisition à l'autre les informations dérivées du signal (profils de LAD, métriques lidar usuelles...).
 - a. Pour avancer dans la normalisation de l'information Lidar, des acquisitions avec des conditions de prises de vues différentes seront réalisées sur les mêmes placettes (densité de points, hauteur de vol). Le doctorant pourra par exemple rechercher des paramètres de structure lidar pertinents et peu sensibles à ces changements d'acquisition. De tels paramètres doivent permettre d'élaborer des modèles pour traiter de nouveaux jeux de données Lidar en s'appuyant sur des données d'archive et des jeux de données de référence restreints contemporains des dernières données lidar à analyser.
 - b. Une autre façon d'aborder cette problématique sera explorée et consiste à mobiliser des approches d'apprentissage profond (deep learning) appliquées à des simulations de données Lidar par modélisation de transfert radiatif sur des scènes forestières pourra aussi être exploré (Fan et al. 2016; Qi et al. 2016). On pourra aussi faire appel à des approches d'apprentissage automatique de type adaptation de domaine (domain adaptation) qui commencent à émerger dans le domaine de la télédétection (Persello 2013; Tuia et al. 2016). En cas de succès, ces approches particulièrement novatrices pourraient avoir un impact majeur sur l'utilisation opérationnelle des données Lidar, qu'elles soient acquises depuis des systèmes légers ou depuis des avions.

Planning :

	Année 1				Année 2				Année 3			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Analyse bibliographique												
Acquisition des données	X		X		X							
Transfert méthodes ALS et évaluation												
Développement de nouvelles méthodes de traitement												
Apprentissage par deep learning et domain adaptation pour utiliser des données d'archives												
Valorisation												

Collaborations externes :

- Société Info Géo Drones (et indirectement Yellowscan qui fournira le lidar)
 - CNPF et CRPFs
 - FranSylva
 - Université de Sherbrooke (thèse qui démarre aussi sur lidar drone en forêt)
- D'autres collaborations avec des équipes de recherche sont susceptibles d'être établies (UMR Dynafor et LIRMM par exemple)

Valorisation :

- Publications envisagées avec choix des journaux (IF) :

- 1^{er} sous-objectif : 1 publication envisageable dans un journal forestier ou télédétection selon la portée des résultats (ASF ou Canadian journal of remote sensing)
- 2^{ème} sous-objectif : 1 publication dans une revue méthodologique : JSTARS ou ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
- 3^{ème} sous-objectif : 1 publication dans un journal informatique et 1 publication dans un journal thématique (RSE)

- Formation :

Valorisation d'une partie des résultats dans des formations (cf. projet de formation déposé en octobre 2017 au Labex Arbre par le CNPF et AgroParisTech sur l'utilisation des drones en forêt)

- Applications prévues :

Développement des activités de service d'Info Géo Drones dans le secteur forestier.

Organisation :

- Encadrement (pm à renseigner dans Irsteaccueil) :

Sylvie Durrieu (Irstea-UMR TETIS) , Marc Bouvier (Info Géo Drones)

Nom de l'équipe : UMR TETIS

Nom du HDR de l'équipe : Sylvie Durrieu (dépôt du dossier de demande d'habilitation prévu fin 2017 ou en mars 2018 pour une soutenance mi ou fin 2018)

- Financement (pm à renseigner dans Irsteaccueil) :

- Demi-bourse de thèse : non acquise (demande à faire auprès de la région Occitanie (AP en décembre) et de l'ADEME)
- Les données terrain seront mises à disposition par les acteurs de la forêt privée (CNPF, CRPF, Propriétaires ou coopératives) grâce à la collaboration du CNPF et de FranSylva.
- Apport IGD : temps d'encadrement (10% Marc Bouvier) et acquisition et prétraitement d'un jeu de données lidar drone (environ 3 * 100 ha)- Coût total de **31 k€**

- Profil du candidat recherché :

Double compétence en traitement du signal et en informatique (connaissances en apprentissage profond et en adaptation de domaine souhaitées)

Justification du choix des membres du comité de thèse (composition à renseigner dans Irsteaccueil) :

Membres pressentis:

- Marc Bouvier- IGD (co-encadrant)
- Dino Ienco- Irstea-TETIS (équipe SISO- encadrement sur la partie apprentissage automatique)
- Samuel Alleaume- Irstea-TETIS (équipe ATTOS- spécialiste drone)
- Emmanuel Pizzo- IGD
- Michel Chartier - CNPF/IDF
- Marc Deconchat - UMR Dynafor

Le comité de pilotage est constitué d'utilisateurs pour s'assurer de la pertinence des produits qui seront développés, de personnes compétentes en acquisition de données par systèmes légers pour identifier les meilleures configurations en termes de rapport qualité/prix pour l'acquisition des données et enfin de scientifiques qui pourront orienter les recherches en termes d'analyse de données Lidar et sur le volet apprentissage automatique.

Références Bibliographiques :

- Bergen, K., Goetz, S., Dubayah, R., Henebry, G., Hunsaker, C., Imhoff, M., Nelson, R., Parker, G., & Radeloff, V. (2009). Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114
- Bouget, C., Lassauce, A., & Jonsell, M. (2012). Effects of fuelwood harvesting on biodiversity—a review focused on the situation in Europe 1 1 This article is one of a selection of papers from the International Symposium on Dynamics and Ecological Services of Deadwood in Forest Ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 42, 1421-1432
- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R.A., & Renaud, J.-P. (2015). Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 156, 322-334
- Bouvier, M., Durrieu, S., Gosselin, F., & Herpigny, B. (2017). Use of airborne lidar data to improve plant species richness and diversity monitoring in lowland and mountain forests. *PloS one*, 12, e0184524
- Chauve, A., Vega, C., Durrieu, S., Bretar, F., Allouis, T., Deseilligny, M.P., & Puech, W. (2009). Advanced full-waveform lidar data echo detection: Assessing quality of derived terrain and tree height models in an alpine coniferous forest. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 5211-5228
- Durrieu, S., Véga, C., Bouvier, M., Gosselin, F., Renaud, J.-P., & Saint-André, L. (2015). *Optical remote sensing of tree and stand heights*. Taylor & Francis Group
- Fan, H., Su, H., & Guibas, L. (2016). A point set generation network for 3d object reconstruction from a single image. *arXiv preprint arXiv:1612.00603*
- Getzin, S., Wiegand, K., & Schöning, I. (2012). Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 397-404
- Kuuluvainen, T. (2009). Forest management and biodiversity conservation based on natural ecosystem dynamics in northern Europe: the complexity challenge. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 38, 309-315
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., & Flood, M. (2003). LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*, 27, 88-106

- Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S.F., Genesio, L., Vaccari, F.P., Primicerio, J., Belli, C., Zaldei, A., Bianconi, R., & Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. *Remote Sensing*, 7, 2971-2990
- Monnet, J.-M., Chirouze, E., & Mermin, É. (2015). Estimation de paramètres forestiers par données Lidar aéroporté et imagerie satellitaire RapidEye: Étude de sensibilité. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 211-212
- Müller, J., & Brandl, R. (2009). Assessing biodiversity by remote sensing in mountainous terrain: the potential of LiDAR to predict forest beetle assemblages. *Journal of Applied Ecology*, 46, 897-905
- Naesset, E. (2007). Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 22, 433-442
- Paillet, Y., Bergès, L., Hjältén, J., Ódor, P., Avon, C., BERNHARDT-RÖMERMANN, M., BIJLSMA, R.J., De Bruyn, L., Fuhr, M., & Grandin, U. (2010). Biodiversity differences between managed and unmanaged forests: meta-analysis of species richness in Europe. *Conservation biology*, 24, 101-112
- Persello, C. (2013). Interactive domain adaptation for the classification of remote sensing images using active learning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10, 736-740
- Qi, C.R., Su, H., Mo, K., & Guibas, L.J. (2016). Pointnet: Deep learning on point sets for 3d classification and segmentation. *arXiv preprint arXiv:1612.00593*
- Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26, 791-797
- Tuia, D., Persello, C., & Bruzzone, L. (2016). Domain adaptation for the classification of remote sensing data: An overview of recent advances. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4, 41-57
- Van Leeuwen, M., & Nieuwenhuis, M. (2010). Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research*, 129, 749-770
- Véga, C., Renaud, J.-P., Durrieu, S., & Bouvier, M. (2016). On the interest of penetration depth, canopy area and volume metrics to improve Lidar-based models of forest parameters. *Remote Sensing of Environment*, 175, 32-42
- Vierling, K.T., Vierling, L.A., Gould, W.A., Martinuzzi, S., & Clawges, R.M. (2008). Lidar: shedding new light on habitat characterization and modeling. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6, 90-98
- Vincent, G., Antin, C., Laurans, M., Heurtebize, J., Durrieu, S., Lavalley, C., & Dauzat, J. (2017). Mapping plant area index of tropical evergreen forest by airborne laser scanning. A cross-validation study using LAI2200 optical sensor. *Remote Sensing of Environment*, 198, 254-266
- Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., & Studnicka, N. (2006). Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60, 100-112
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., & Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing*, 4, 1519-1543
- Wallace, L., Lucieer, A., & Watson, C.S. (2014). Evaluating tree detection and segmentation routines on very high resolution UAV LiDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52, 7619-7628
- Wang, K., Franklin, S.E., Guo, X., & Cattet, M. (2010). Remote sensing of ecology, biodiversity and conservation: A review from the perspective of remote sensing specialists. *Sensors*, 10, 9647-9667
- White, J.C., Wulder, M.A., Vastaranta, M., Coops, N.C., Pitt, D., & Woods, M. (2013). The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning. *Forests*, 4, 518-536
- Wulder, M., White, J., Fournier, R., Luther, J., & Magnussen, S. (2008). Spatially Explicit Large Area Biomass Estimation: Three Approaches Using Forest Inventory and Remotely Sensed Imagery in a GIS. *Sensors*, 8, 529-560