
**Inventaires forestiers par fusion
d'imagerie aérienne hyperspectrale et du LiDAR
WHFF (OFEV) - projet 2013.18
RAPPORT FINAL**

Demandeurs :

Matthew PARKAN

Prof. François GOLAY

Prof. Devis TUIA

Co-demandeurs :

Ingénieurs forestiers cantonaux romands

Groupe de travail intercantonal *LiDAR et forêts*

Laboratoire des Systèmes d'Information Géographique (LASIG)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

23 décembre 2018



Table des matières

1	Résumé des activités techniques et scientifiques	2
1.1	Choix des sites d'études et relevés de terrain	2
1.2	Création d'échantillons de référence	3
1.3	Segmentation des arbres individuels	5
1.3.1	État de l'art des méthodes de segmentation	5
1.3.2	Validation de la géométrie	5
1.3.3	Segmentation des feuillus	5
1.3.4	Segmentation des conifères	7
1.3.5	Détection des troncs	7
1.4	Dendrométrie	9
1.4.1	État de l'art sur la dendrométrie par LiDAR	9
1.4.2	Estimation indirecte du diamètre	9
1.4.3	Mesure directe du diamètre	10
1.5	Identification des essences	13
1.5.1	État de l'art sur l'identification des essences	13
1.5.2	Identification des essences	13
1.5.3	Détection du lierre	18
1.6	Développements méthodologiques et outils	19
1.6.1	Développement d'un standard pour le stockage des attributs d'in- ventaire dans le format ASPRS LAS	19
1.6.2	Développement d'une librairie et de tutoriels pour Octave/Matlab .	19
1.6.3	Développement d'une application d'inventaire virtuel	20
2	Résumé des activités de transfert des connaissances	21
3	Collaborations	26
4	Éléments livrables	28
5	Modifications apportées au plan de recherche initial	30
5.1	Thèmes de recherche	30
5.2	Données et sites d'étude	30
6	Conclusions et perspectives	31
7	Références	32

Aperçu

Projet

Titre :	<i>Inventaires forestiers par fusion d'imagerie aérienne hyperspectrale et du LiDAR</i>
Numéro de projet :	2013.18
Contexte :	Thèse de doctorat
Demandeurs :	Matthew Parkan (Laboratoire des Systèmes d'Information Géographique, EPFL) Prof. François Golay (Laboratoire des Systèmes d'Information Géographique, EPFL) Prof. Devis Tuia (LGRS, Université de Wageningen, Pays-Bas)
Co-demandeurs :	Ingénieurs forestiers cantonaux romands Groupe de travail intercantonal <i>LiDAR et forêt</i>
Institut hôte :	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) Laboratoire des Systèmes d'Information Géographique (LASIG)
Soutien cantonal :	Canton de Neuchâtel Canton de Vaud Canton du Valais Canton de Fribourg Canton du Jura Canton de Genève

Contact

Adresse postale :	EPFL ENAC IIE LASIG GC D2 414 (Bâtiment GC) Station 18 CH-1015 Lausanne Suisse
Bureau :	GCD2414
Tél. :	+41 (0)79 789 81 51
Email :	matthew.parkan@gmail.com

Résumé

Le projet propose comme objectif général l'estimation des paramètres d'inventaire forestier (p. ex. position du tronc, hauteur, surface terrière, surface de la couronne, espèces, etc.) à partir de la combinaison de Relevés altimétriques par Laser Aéroporté (RLA) et d'Imagerie Hyperspectrale (IH). La recherche s'articule autour de trois thèmes principaux : le développement de nouveaux algorithmes de segmentation d'arbres individuels, l'évaluation de méthodes de dendrométrie directe et indirecte, la classification d'espèces basée sur les caractéristiques du RLA et de l'IH. Une dépendance commune de ces sujets est la disponibilité de données de référence fiables pour la calibration et la validation (évaluation des erreurs) des algorithmes. Cette exigence est abordée par le développement d'une application interactive et de procédures pour faciliter l'extraction manuelle des arbres et l'identification visuelle des espèces à partir des nuages de points issus de RLA. Les résultats de cette recherche peuvent être utiles au domaine opérationnel de plusieurs façons : fournir des outils et des procédures pour caractériser les zones qui ne sont pas couvertes par les inventaires de terrain (p. ex. forêts privées, zones à faible accessibilité), agir comme support décisionnel (p. ex. préparation de plan de situation, identification de zones d'intervention prioritaire, etc) lors de la planification des relevés de terrain ou des coupes, améliorer l'intégration des mesures de terrain et de télédétection dans les inventaires forestiers.

Mots clés : Relevés altimétriques par Laser Aéroporté (RLA), LiDAR, inventaires forestiers, modélisation des arbres, segmentation de nuages de points, apprentissage automatique, Imagerie Hyperspectrale (IH)

Liste d'acronymes

ACP	Analyse en Composantes Principales
APEX	Airborne Prism EXperiment
CCS	Centre de Compétences en Sylviculture
DHP	Diamètre à Hauteur de Poitrine (1.3 m)
DFT	Digital Forestry Toolbox
IFN	Inventaire Forestier National
IHA	Imagerie Hyperspectrale Aérienne
MNC	Modèle Numérique de Canopée
MNF	Maximum Noise Fraction
MNH	Modèle Numérique de Hauteur
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
RANSAC	RANdom SAMple Consensus
RF	Random Forest
RLA	Relevés altimétriques par Laser Aéroporté
SITG	Système d'Information du Territoire à Genève
SITN	Système d'Information du Territoire Neuchâtelois
SVM	Support Vector Machine
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

1 Résumé des activités techniques et scientifiques

Les sections suivantes résument les principales contributions techniques et scientifiques développées dans la thèse. Le contexte, l'introduction technique, ainsi que le descriptif et la discussion des données, des méthodes et des résultats, ne sont pas présentés dans ce résumé; nous renvoyons le lecteur au rapport de thèse pour ces éléments.

1.1 Choix des sites d'études et relevés de terrain

La figure 1 ci-dessous indique les emplacements des sites d'étude sélectionnés. Afin d'assurer un suivi à long terme et de réduire la charge de travail liée aux relevés de terrain, il a été décidé d'employer des sites d'étude pré-existants établis par l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) et le Centre de Compétence en Sylviculture (CCS). Ces sites, tous couverts par des acquisitions LiDAR récentes, constituent un échantillon représentatif de la topographie et des structures forestières présentes en Suisse.

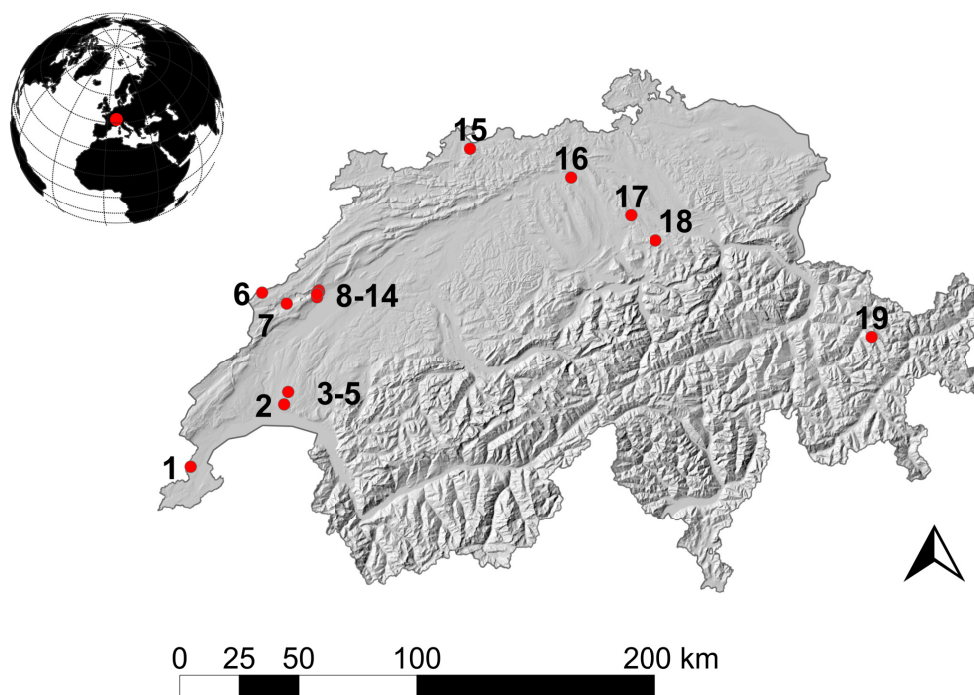
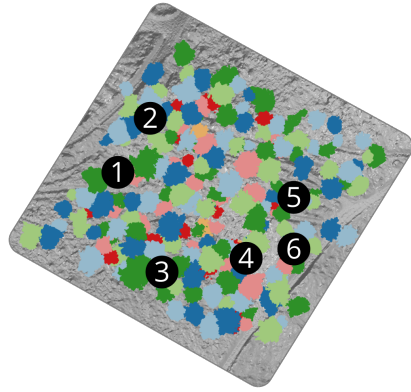


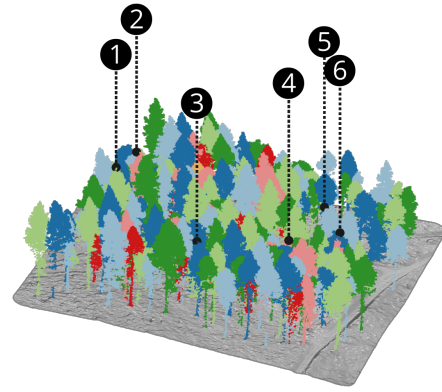
FIGURE 1 – Contexte géographique et carte des sites d'étude. L'astérisque à côté du nom des sites indique la disponibilité d'images hyperspectrales. **1** : Versoix, **2** : Sauvabelin*, **3** : Benenté*, **4** : Jorat sud*, **5** : Gésiaux*, **6** : La Brévine, **7** : Couvet, **8** : Cortaillod D4*, **9** : Boudry D20*, **10** : Boudry D19*, **11** : Boudry D1*, **12** : Chambrelie*, **13** : Rochefort*, **14** : Bevaix*, **15** : Grosszinggibrunn, **16** : Ottmarsingen, **17** : Sihlwald, **18** : Oberaegeri, **19** : Dischma. Modèle altimétrique fourni par l'Office Fédéral de Topographie (swisstopo).

1.2 Création d'échantillons de référence

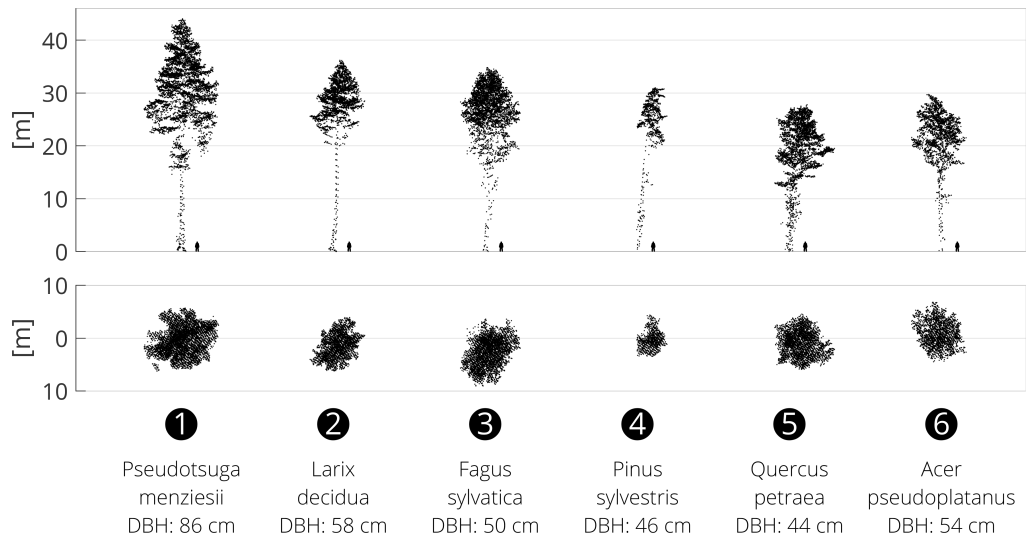
La majorité des publications scientifiques récentes ont mis en évidence le manque de données de référence fiables pour la calibration et la validation de modèles et d'algorithmes (Yin and Wang, 2016). Pour répondre à ce besoin, une application d'inventaire virtuel (basée sur l'interprétation visuelle) a été développée (cf. section 1.6.3). Cette application a permis la création de plusieurs échantillons de référence incorporant au total 7281 arbres individuels extraits manuellement à partir des nuages de points LiDAR (une part significative de ces données de référence est mise à disposition librement, cf. section 4). Ces échantillons ont notamment permis d'effectuer une validation rigoureuse de la forme des arbres extraits par les algorithmes de segmentation. Ils ont également servi à la calibration de modèles de régression allométriques pour la prédiction du Diamètre à Hauteur de Poitrine (DHP) et de modèles de classification des essences. La description détaillée de ces données est présentée dans le **chapitre 2 du rapport de thèse**.



(a) Vue nadirale.



(b) Vue oblique.



(c) Exemples d'arbres individuels (Vue latérale et nadirale).

FIGURE 2 – Exemple d'inventaire virtuel sur le site de Boudry D20 (Neuchâtel). Le coloriage topologique permet de distinguer les arbres adjacents. Données LiDAR 2016 du SITN.

1.3 Segmentation des arbres individuels

La segmentation des arbres individuels est une étape fondamentale du processus d'inventaire automatique. En permettant une représentation unitaire (i.e. à l'échelle de l'arbre), cette étape facilite l'estimation de paramètres dendrométriques et dans certains cas la détermination de l'essence. Le **chapitre 3 du rapport de thèse** est consacré à cette thématique. Les sous-sections suivantes résument le travail présenté dans ce chapitre.

1.3.1 État de l'art des méthodes de segmentation

Un état de l'art détaillé des méthodes de segmentation d'arbres individuels est présenté dans le **chapitre 3.1 du rapport de thèse**. La revue et l'évaluation d'algorithmes de référence existants a montré qu'ils produisaient des résultats valables pour les forêts de conifères (qui ont une cime bien marquée), mais qu'il étaient généralement inadaptés aux forêts de feuillus, aux forêts mixtes et aux forêts avec une structure complexe en générale. Un manque de standards dans les méthodes de validation des résultats a aussi été noté.

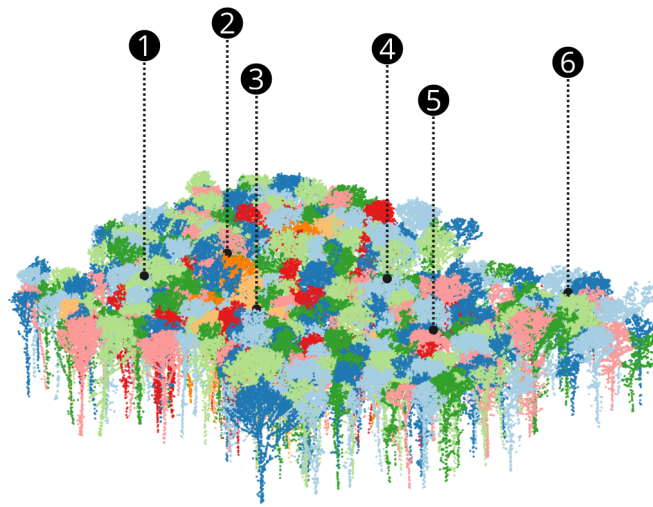
1.3.2 Validation de la géométrie

La validation des algorithmes de segmentation d'arbres individuels est particulièrement problématique, car elle nécessite la connaissance de la position et de la géométrie exacte de chaque arbre. En l'absence de ces informations, la majorité des études se limitent généralement à une validation qualitative ou quantitative basée uniquement sur la correspondance de position des troncs (Yin and Wang, 2016). Cette approche de validation est incomplète, car elle ne garanti pas que la segmentation est représentative de la géométrie réelle de l'arbre. Par ailleurs, les résultats des études sur la segmentation automatique des arbres sont rarement comparables, car ils sont fortement liés à la complexité de la structure forestière considérée (p. ex. un peuplement mélangé avec une structure irrégulière est plus difficile à traiter qu'un peuplement pur en futaie).

Dans ce contexte, une méthode rigoureuse, basée sur l'utilisation des données de référence présentées dans la section 1.2, a été développée pour valider le résultat des algorithmes de segmentation. En outre, une méthode de quantification objective de la difficulté d'un problème de segmentation en forêt a été développée. Ces thématiques sont présentées dans le **chapitre 3.2 du rapport de thèse**.

1.3.3 Segmentation des feuillus

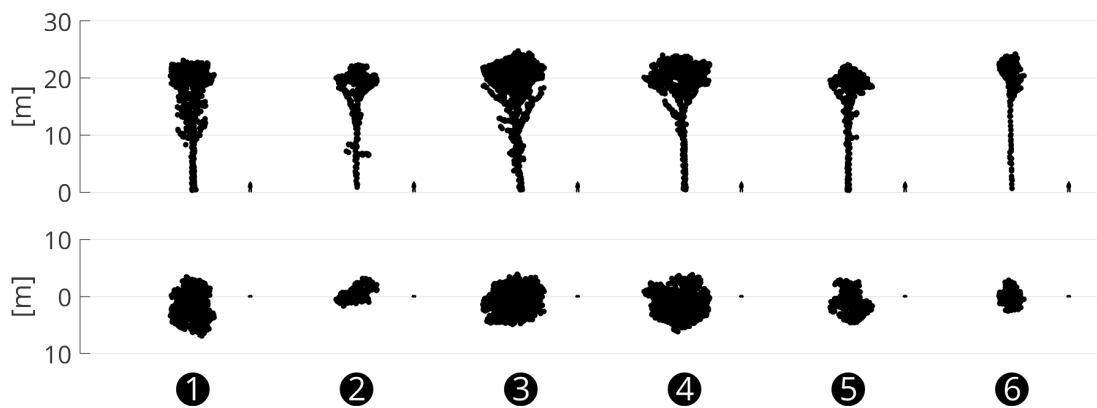
Un algorithme de segmentation, appelé vote géodésique, adapté aux forêts de feuillus (acquisitions LiDAR sans feuilles) a été développé et validé. La validation sur les sites de Sauvabelin, Benenté, Versoix, Boudry D20 a montré que l'algorithme produit de bons résultats, en particulier pour les futaies régulières (cf. figure 3). La description de l'algorithme et les résultats détaillés sont présentés dans le **chapitre 3.3 du rapport de thèse**. Ce travail a aussi fait l'objet d'une publication scientifique à l'occasion de la conférence internationale *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* en juillet 2015 et a reçu le prix "Interactive Symposium Paper Award" (cf. Parkan and Tuia (2015)).



(a) Arbres individuels (coloriage topologique).



(b) Exemples de segments obtenus avec l'algorithme de vote géodésique (extraction automatique).
Vue latérale (première ligne) et nadirale (deuxième ligne).



(c) Les segments de référence correspondants tirés des données présentées dans la section 1.2
(extraction manuelle). Vue latérale (première ligne) et nadirale (deuxième ligne).

FIGURE 3 – Arbres individuels extraits avec l'algorithme de vote géodésique sur le site
d'étude de Versoix. . Données LiDAR 2017 du SITG.

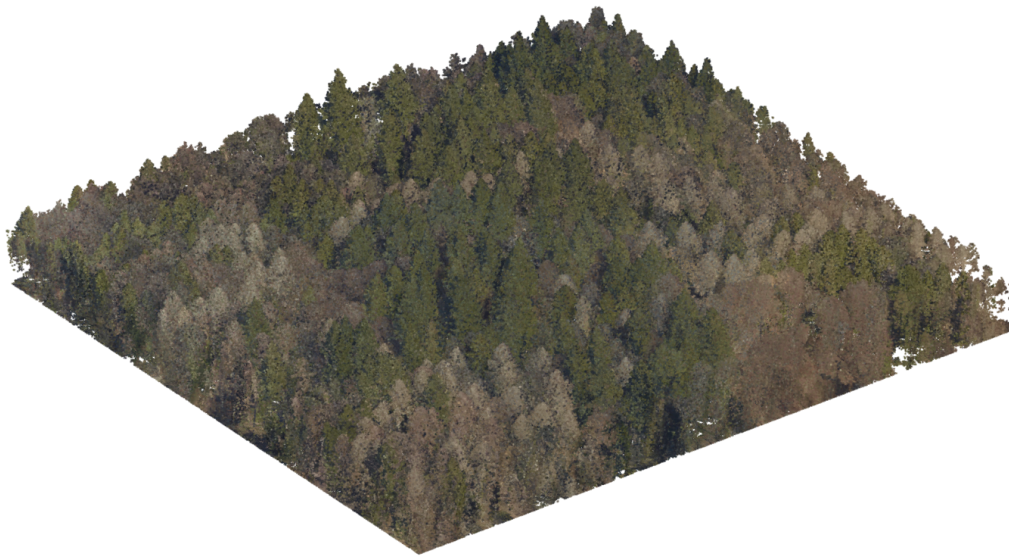
1.3.4 Segmentation des conifères

La segmentation des conifères ayant déjà fait l'objet d'une recherche très importante dans la communauté scientifique (notamment scandinave et nord-américaine), cette thématique n'a pas été considérée comme prioritaire. Néanmoins, deux méthodes existantes ont été implémentées et utilisées comme base de comparaison : l'algorithme des bassins versants (avec initialisation par marqueurs) et une version modifiée de l'algorithme de référence décrit par Li et al. (2012).

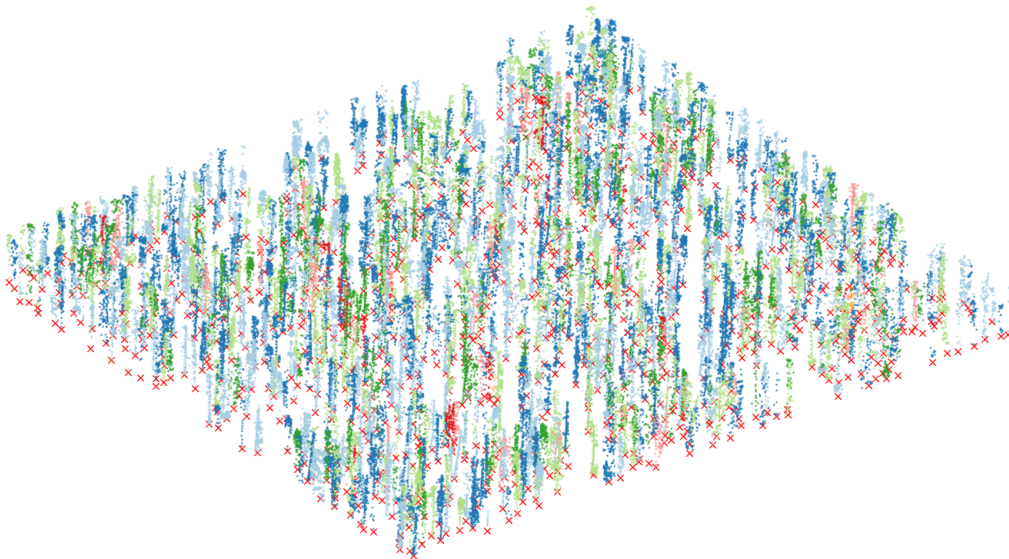
Une méthode d'estimation automatique de l'erreur de segmentation basée sur la comparaison de segments similaires (apprentissage ensembliste) a été développée. Cette méthode permet aussi de réduire de façon significative l'erreur de segmentation dans les forêts de conifères. Le **chapitre 3.4 du rapport de thèse** présente cette méthode en détails. Ce travail a aussi fait l'objet d'une publication scientifique (Parkan and Tuia, 2018).

1.3.5 Détection des troncs

Un algorithme de détection des troncs basé sur l'analyse morphologique de strates horizontales du nuage de points a été développé et évalué. Cette méthode est adaptée aux acquisitions sans feuilles et fonctionne particulièrement bien dans les futaies (cf. figure 4). La description de l'algorithme et les résultats détaillés sont présentés dans le **chapitre 3.5 du rapport de thèse**.



(a) Nuage de points 3D (altitude normalisée par rapport au terrain).



(b) Troncs détectés.

FIGURE 4 – Troncs détectés avec la méthode d'analyse morphologique en strates sur le site de Boudry D20. Un coloriage topologique est utilisé pour distinguer les troncs adjacents. Données LiDAR 2016 du SITN.

1.4 Dendrométrie

La hauteur (totale et du fût), le volume et la surface de la couronne peuvent être estimés à partir du nuage de points 3D segmenté (cf. section 1.3). L'estimation du diamètre à hauteur de poitrine (ou de la surface terrière) est plus compliquée. Celle-ci peut se faire soit par mesure directe dans le nuage de points (cf. section 1.4.3), soit indirectement par régression (cf. section 1.4.2) à partir d'une ou plusieurs variables prédictives (relations allométriques). Ces deux approches sont abordées dans le **chapitre 4 du rapport de thèse**.

1.4.1 État de l'art sur la dendrométrie par LiDAR

Un état de l'art détaillé sur les méthodes d'estimation indirectes et directes du diamètre des troncs est présenté dans le **chapitre 4.1 du rapport de thèse**. Il met principalement en évidence le peu de recherche effectuée jusqu'à maintenant sur la mesure directe du diamètre dans les nuages de points issus du LiDAR aérien. Cette thématique est donc considérée comme prioritaire, par rapport aux méthodes d'estimation indirecte.

1.4.2 Estimation indirecte du diamètre

L'estimation indirecte du diamètre est nécessaire, lorsque les troncs sont insuffisamment échantillonnés dans le nuage de points (p. ex. lors d'une acquisition avec feuilles ou en présence de forêts de conifères denses). Outre le choix de modèles allométriques, la principale difficulté avec cette approche est la définition de variables prédictives corrélées au diamètre du tronc (p. ex. hauteur, diamètre et volume de la couronne, surface spécifique, essence, etc) et pouvant être dérivées des segments avec une fiabilité suffisante.

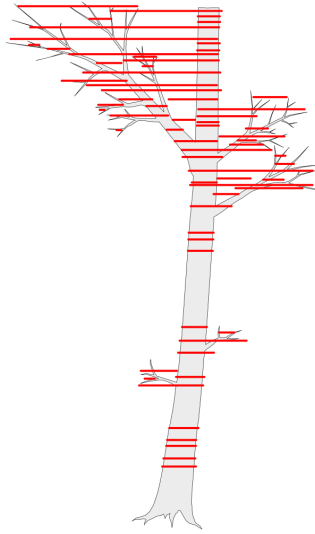
Duncanson et al. (2015) et Jucker et al. (2016) ont démontré, dans une analyse à l'échelle globale, que l'utilisation de la hauteur comme seule variable indépendante pour prédire correctement le diamètre ou la biomasse est insuffisante. L'inclusion de variables liées aux dimensions de la couronne ainsi que l'utilisation de variables moyennées par catégorie de diamètre (p. ex. tout les 10 cm) permet d'améliorer significativement les prédictions. Le calcul de modèles de régressions spécifiques par division (angiosperme ou gymnosperme) ou par genre est aussi suggéré par ces auteurs. En suivant ces recommandations, plusieurs modèles allométriques ont été évalués sur la base des données de référence présentées dans la section 1.2. Les résultats de cette évaluation sont présentés dans le **chapitre 4.3 du rapport de thèse**. Ils montrent qu'il est généralement possible d'estimer le diamètre du tronc avec une erreur inférieure à 10%, à condition d'avoir à disposition une estimation fiable de la hauteur totale de l'arbre et du diamètre de la couronne.

1.4.3 Mesure directe du diamètre

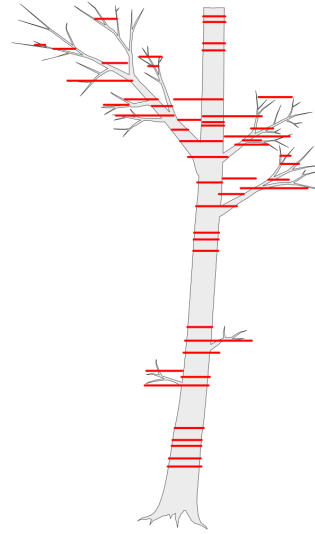
La mesure directe du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) possible, à condition que ce dernier soit échantillonné avec un nombre suffisant de points lors du relevé LiDAR aérien et que l'erreur de positionnement de ces points soit faible par rapport au diamètre. L'acquisition doit donc impérativement être réalisée sans feuilles et avec une densité de points élevée (> 100 points / m^2).

Une méthode permettant d'ajuster simultanément un modèle de défilement du diamètre (c. à. d. changement du diamètre avec la hauteur) et de courbure du tronc a été développée. Elle fonctionne en évaluant itérativement l'adéquation du modèle avec le nuage de points (algorithme Random Sample Consensus ou RanSAC), en respectant des contraintes imposées sur le diamètre à la base du tronc, le défilement et la courbure. Le modèle qui est le plus en adéquation avec le nuage de point est retenu. La figure 5 illustre la méthode et la figure 6 montre des exemples de résultats. La validation de la méthode, effectuée sur les données LiDAR du canton de Neuchâtel, montre que le diamètre est mesuré avec une erreur relative généralement inférieures à 5%, pour des arbres avec un DHP supérieur à 30 cm. La description et l'évaluation détaillée de la méthode est présentée dans le **chapitre 4.4 du rapport de thèse**.

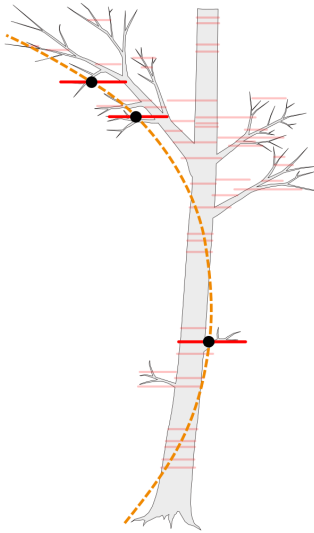
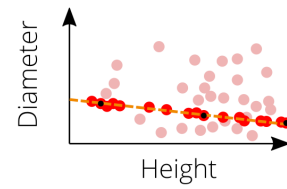
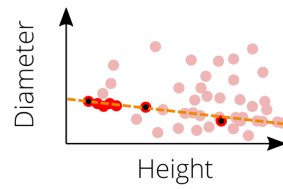
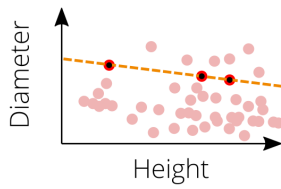
Par rapport à l'estimation indirecte (allométrie), l'estimation directe du DHP est intéressante, car elle ne nécessite pas une segmentation complète des arbres individuels; seule la segmentation/détection des troncs est nécessaire. Cette méthode est cependant peu applicable, pour la plupart des jeux de données LiDAR disponibles en Suisse souvent acquis avec feuilles et/ou avec une densité de points trop faible. On peut toutefois raisonnablement s'attendre à une augmentation significative de la résolution des relevés LiDAR aériens dans les prochaines années et donc à une meilleure pertinence des méthodes de mesure directe.



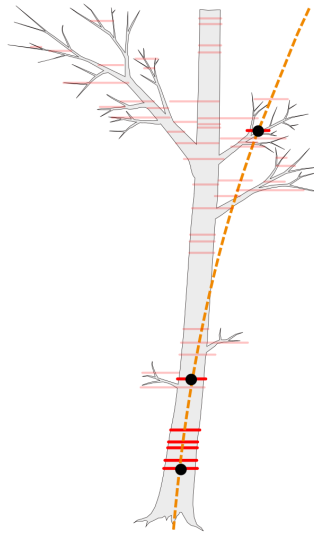
(a) Tous les cercles.



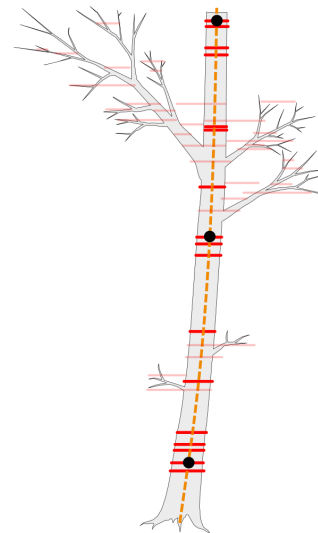
(b) Sous-ensemble de cercles obtenus après applications de contraintes sur le diamètre, le défilement et la répartition des points.



3 inliers



7 inliers



17 inliers

(c) A chaque itération, le RanSAC sélectionne aléatoirement $n_A + 1$ cercles (point noirs) qui définissent un modèle de défilement (première ligne) et de courbure du tronc (deuxième ligne). Le modèle qui correspond au meilleur consensus avec les cercles est retenu.

FIGURE 5 – Ajustement simultané de la courbe du tronc et du modèle de défilement du diamètre (c.à.d changement avec la hauteur).



(a) DHP = 56 cm



(b) DHP = 67 cm



(c) DHP = 53 cm



(d) DHP = 44 cm

FIGURE 6 – Exemples qualitatifs d’ajustement d’un modèle de tronc au nuage de points

1.5 Identification des essences

L'identification des essences implique l'utilisation de descripteurs issus du LiDAR et de l'imagerie hyperspectrale. Ces descripteurs, calculés sur les données de référence présentées dans la section 1.2, servent ensuite à distinguer neuf essences (espèces confondues) : le pin sylvestre, la sapin, le sapin de Douglas, l'épicéa, le mélèze, le chêne, le hêtre, le frêne et l'érable. Cette thématique est abordée dans le **chapitre 4 du rapport de thèse**.

1.5.1 État de l'art sur l'identification des essences

Un état de l'art détaillé sur l'identification des essences à l'aide du LiDAR et/ou de l'imagerie hyperspectrale aérienne est présenté dans le **chapitre 5.1 du rapport de thèse**. Il met en évidence que la plupart des études qui utilisent ces technologies concernent les forêts tempérées et la Taïga. Faute de moyens techniques et de financement, les forêts humides tropicales et subtropicales sont relativement peu étudiées. IL est aussi noté que le potentiel du système hyperspectral APEX (utilisé dans cette étude) pour la cartographie de distribution des essences, n'a pas été évalué exhaustivement jusqu'à maintenant.

1.5.2 Identification des essences

Une analyse exploratoire a d'abord été effectuée pour établir la séparabilité structurale et spectrale des neuf essences d'intérêt. Les figures 7, 8 et 9 illustrent quelques caractéristiques spécifiques aux essences considérées. Cette analyse est présentée en détails dans le **chapitre 5.3 du rapport de thèse**. Cette analyse initiale a permis d'identifier des descripteurs potentiels permettant de distinguer les essences.

Deux algorithmes de classification statistique ont été évalués : les machines à vecteur de support (en anglais : Support Vector Machine, abrégé SVM) avec kernel linéaire ou Gaussien et les forêts d'arbres décisionnels (en anglais : Random Forest, abrégé RF). Ces algorithmes ont été appliqués à trois ensembles de descripteurs :

- **Descripteurs dérivés du LiDAR.** Un ensemble de descripteurs de forme, de répartition spatiale des points, d'intensité et d'opacité a d'abord été établi. Une distinction a été faite entre les descripteurs qui varient avec l'échelle (p.ex. hauteur, volume) et ceux qui ne varient pas (p. ex. intensité). Une procédure de sélection de variables a ensuite été appliquée pour supprimer les descripteurs superflus ; 13 descripteurs ont été retenus pour le modèle final.
- **Descripteurs dérivés de l'imagerie hyperspectrale.** Un ensemble de descripteurs basés sur des indices de végétation, une analyse en composantes principales (ACP) et une transformée de bruit minimum (en anglais : Minimum Noise Transform, abrégé MNF) a d'abord été établi. Une procédure de sélection de variables a ensuite été appliquée pour supprimer les descripteurs superflus ; les 20 premières composantes de la transformée de bruit minimum ont été retenus pour le modèle final.
- **Descripteurs dérivés de la combinaison du LiDAR et de l'imagerie hyperspectrale.** L'ensemble des descripteurs sélectionnés lors des évaluations indépendantes listées plus haut a été utilisé.

Les deux algorithmes de classification (SVM et RF) ont produit des résultats similaires. Le tableau 1 résume les différentes combinaisons de descripteurs et d'algorithmes

de classification évalués, ainsi que les scores moyens obtenus. Des scores de rappel (sensibilité) et de précision (fiabilité) supérieurs à 80% ont été systématiquement obtenus pour toutes les essences, sauf l’érable et le frêne. Il est probable que le manque de données de calibration pour ces deux essences soit à l’origine des scores plus faibles obtenus, plutôt qu’une défaillance de la méthode de classification. On note aussi que la combinaison des descripteurs LiDAR et hyperspectraux engendre un gain de performances d’environ 5%, par rapport à l’utilisation de descripteurs issus du LiDAR ou de l’imagerie hyperspectrale seulement.

La sensibilité de l’identification des essences à l’erreur de segmentation a aussi été étudiée. Il a ainsi été montré qu’il est possible de prendre en compte cette erreur lors de la calibration du modèle de classification. Le cas échéant, seule une diminution modérée des performances de la classification est observée.

TABLE 1 – Comparaison des scores (normalisés entre 0 et 1) obtenus avec différents algorithmes de classification et combinaisons de descripteurs. **Abréviations :** **IHA** : Imagerie Hyperspectrale Aérienne, **RLA** : Relevé par Laser Aéroporté, **SVM** : Support Vector Machine (machine à vecteurs de support), **RF** : Random Forest (forêts d’arbres décisionnels), **OA** : Overall Accuracy (Exactitude globale), **K** : kappa, \bar{p} : moyenne de la précision des 9 classes, \bar{r} : moyenne du rappel des 9 classes, \bar{F} : moyenne du score F des 9 classes, **IE** : descripteurs Invariants à l’Echelle, **VE** : descripteurs Variants à l’Echelle, **BM** : Transformée de Bruit Minimal, **IV** : Indices de Végétation, **#** : Nombre de descripteurs.

Classif.	Descripteurs			Scores				
	IHA	RLA	#	OA	K	$\bar{r} \pm \sigma$	$\bar{p} \pm \sigma$	$\bar{F} \pm \sigma$
RF	-	VE + IE	46	0.89	0.88	0.82 ± 0.19	0.82 ± 0.17	0.81 ± 0.18
	-	IE	36	0.9	0.89	0.82 ± 0.22	0.84 ± 0.18	0.81 ± 0.21
	BM	-	20	0.85	0.82	0.78 ± 0.21	0.79 ± 0.16	0.78 ± 0.18
	BM + IV	-	35	0.85	0.83	0.79 ± 0.21	0.80 ± 0.14	0.78 ± 0.17
	BM	VE + IE	46	0.93	0.92	0.90 ± 0.09	0.88 ± 0.16	0.89 ± 0.13
	BM + IV	VE + IE	81	0.93	0.92	0.90 ± 0.09	0.89 ± 0.15	0.89 ± 0.12
	BM	IE	56	0.95	0.94	0.93 ± 0.06	0.90 ± 0.14	0.91 ± 0.10
	BM + IV	IE	71	0.95	0.94	0.93 ± 0.06	0.89 ± 0.17	0.90 ± 0.12
SVM (lin.)	-	IE	36	0.90	0.88	0.72 ± 0.41	0.70 ± 0.40	0.71 ± 0.41
	BM	-	20	0.84	0.81	0.76 ± 0.24	0.77 ± 0.18	0.76 ± 0.22
	BM	IE	56	0.95	0.94	0.88 ± 0.18	0.88 ± 0.18	0.88 ± 0.18
SVM (gauss.)	-	IE	36	0.91	0.89	0.74 ± 0.40	0.82 ± 0.31	0.73 ± 0.39
	BM	-	20	0.85	0.82	0.76 ± 0.25	0.77 ± 0.22	0.76 ± 0.24
	BM	IE	56	0.95	0.94	0.91 ± 0.10	0.90 ± 0.15	0.90 ± 0.13

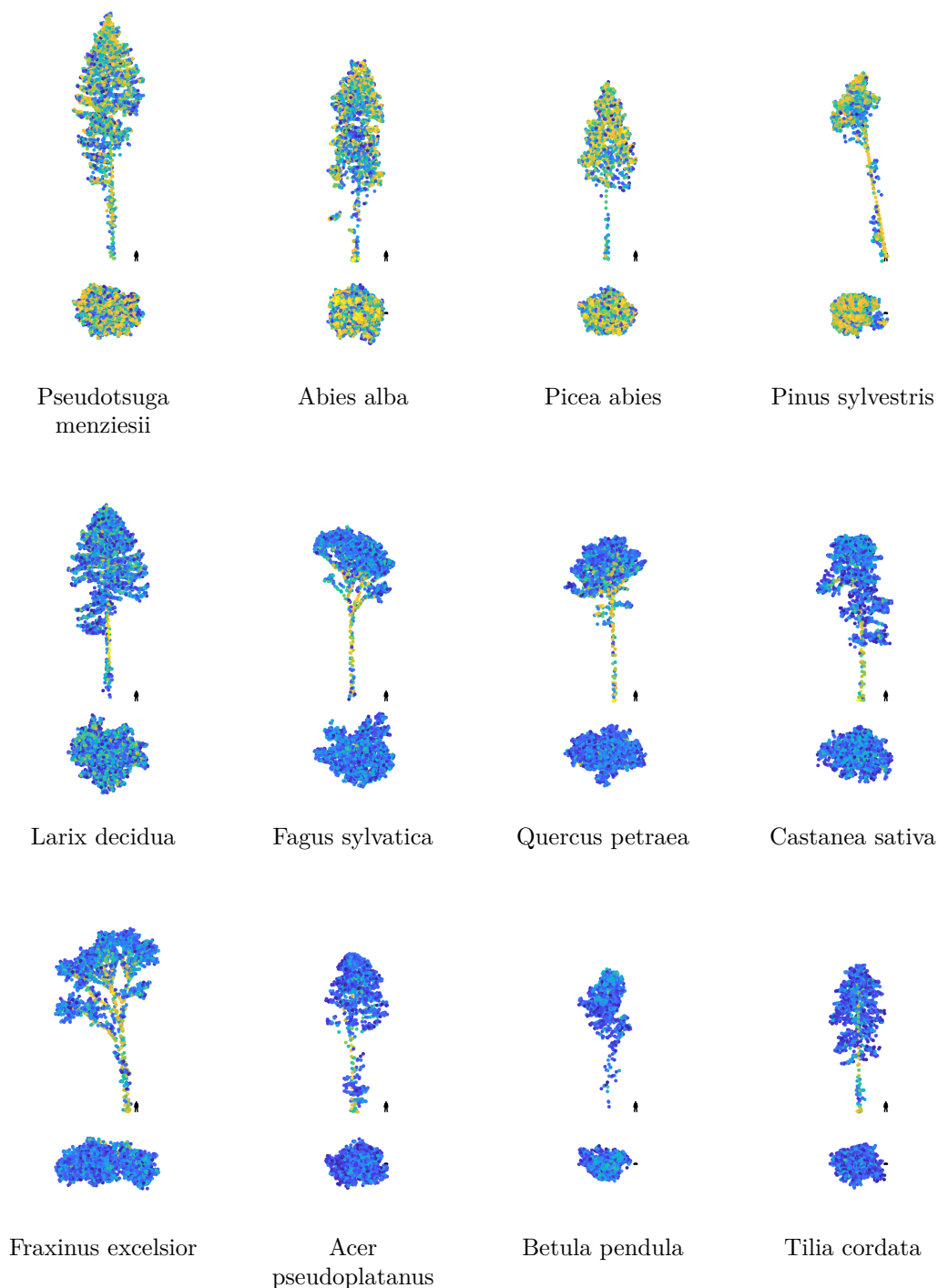


FIGURE 7 – Exemples d’essences fréquemment rencontrées (vue latérale et nadirale). **La couleur représente l’intensité des échos LiDAR (acquisition sans feuilles).** On remarque que les couronnes des arbres à feuillage caduc ont une intensité faible par rapport aux structures larges et/ou opaques (troncs, branches principales, feuillage persistant). La hauteur relative des arbres est indiquée par la silhouette humaine (1.8 m).

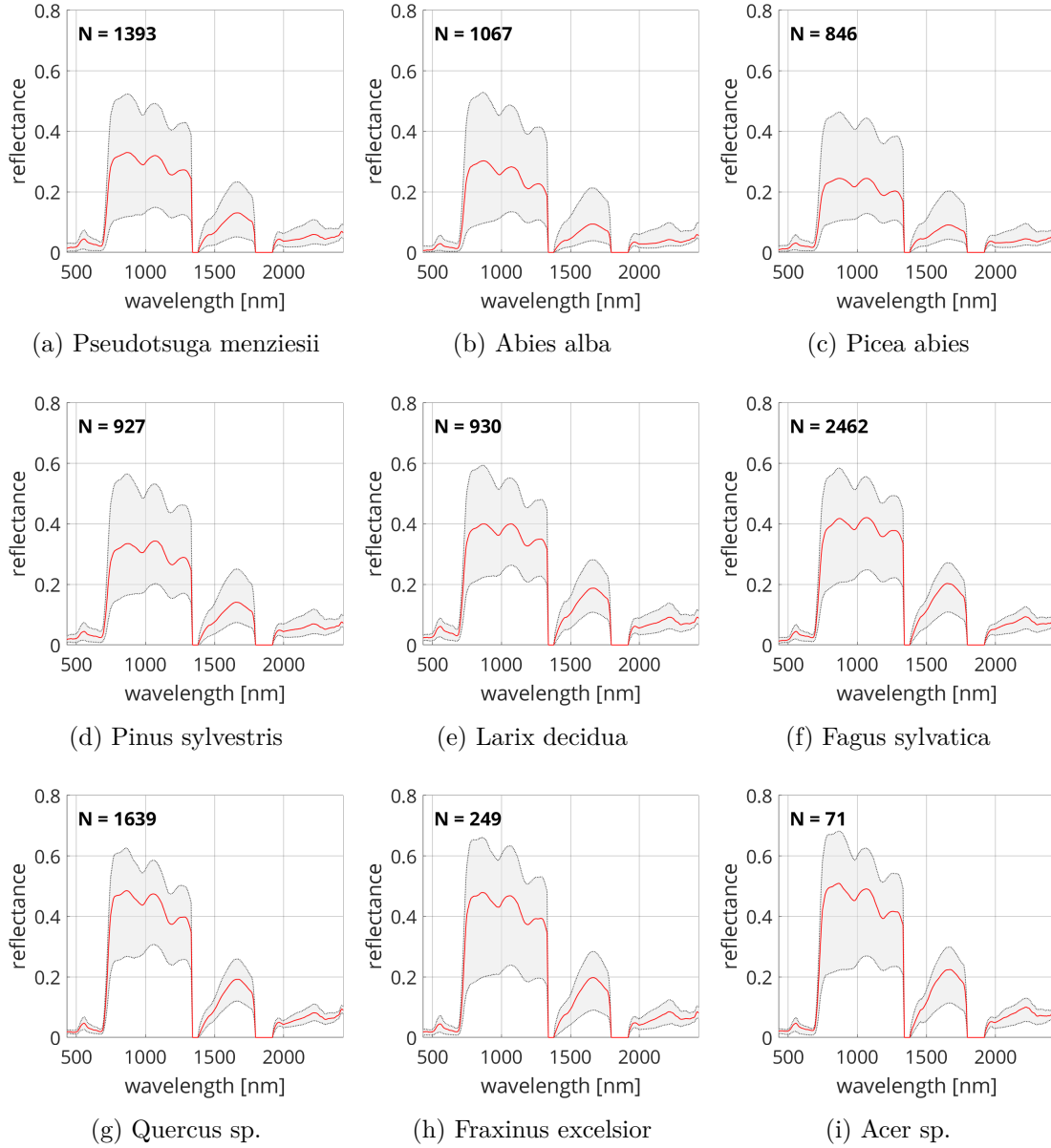


FIGURE 8 – Courbes de réflectance pour les neuf essences considérées (diverses classes d'âge) obtenues avec le système d'imagerie hyperspectral APEX. La ligne rouge indique la réflectance médiane. La zone grise représente l'intervalle entre les quantiles de réflectance inférieurs (5%) et supérieurs (95%). Le nombre de pixels N utilisé pour calculer les courbes de réflectance est indiqué dans le coin en haut à gauche de chaque graphique.



FIGURE 9 – Trois exemples de composition de couleurs pour les neuf essences d'intérêt (classes d'âges mélangées) réalisées à partir de la réflectance mesurée avec le système APEX en juillet 2014. Les couleurs sont basées sur les valeurs de réflectance médiane. La composition en fausse couleurs dans la colonne de droite combine une estimation du contenu en carotènes $CAR = (\rho_{515}^{-1} - \rho_{565}^{-1}) \cdot \rho_{780}$, en chlorophylle $CHL = (\rho_{550}^{-1} - \rho_{780}^{-1}) \cdot \rho_{780}$ et en eau $W = 1 - \frac{\rho_{1193}}{\rho_{1126}}$ (cf. Gitelson et al. (2006); Schneider et al. (2017)).

1.5.3 Détection du lierre

Le lierre (*Hedera Helix*) est une liane arbustive (non-parasitaire) spontanée dans les forêts tempérées du plateau suisse. Il a un rôle important dans l'écosystème forestier, notamment à cause de sa floraison et fructification tardive (septembre-octobre) qui contribue à l'alimentation de certains insectes et oiseaux. A l'inverse, dans certaines régions d'Amérique du Nord, le lierre est parfois considéré comme invasif car il inhibe le renouvellement en sous-bois. La cartographie du lierre présente donc un intérêt significatif en écologie forestière. L'emploi de la méthode de segmentation présentée dans la section 1.3.3 associée à des critères géométriques et radiométriques (i.e. liés à l'intensité) caractérisant le fût permet de discerner les arbres à feuillage caduc où le lierre est significativement développé.

Cette thématique de recherche a fait l'objet d'un travail de semestre à l'EPFL (disponible sur demande) : "Amrari S. et Vos K., *Potentiel du scanner laser aérien pour la cartographie du lierre en forêt*, Design Project, LASIG, EPFL, juin 2016".

1.6 Développements méthodologiques et outils

1.6.1 Développement d'un standard pour le stockage des attributs d'inventaire dans le format ASPRS LAS

Le format ASPRS LAS développé par la société américaine de photogrammétrie est le plus couramment utilisé pour le stockage des nuages de points LiDAR. Ce format prévoit la possibilité de définir des registres supplémentaires pour des applications thématiques.

En se basant sur ce mécanisme, une nouvelle spécification décrivant un registre spécifique aux inventaires forestiers a été développée. Cette spécification permet de stocker les attributs physiques et biologiques des arbres individuels directement dans les fichiers LAS. Elle a notamment été employée avec les données de référence présentées dans la section 1.2. La spécification est présentée dans le **chapitre 2** et dans l'**annexe G** du rapport de thèse.

1.6.2 Développement d'une librairie et de tutoriels pour Octave/Matlab

L'ensemble des analyses et traitements effectués ont nécessité le développement de diverses fonctions de lecture/écriture, de manipulations des données LiDAR/hyperspectrales et d'algorithmes de segmentation et de classification. Ces fonctions ont été implémentées dans le langage de programmation Matlab couramment employé de le domaine de la recherche scientifique. Une partie de ces fonctions ont été rendues compatibles avec GNU Octave (l'équivalent libre de Matlab) et elle est distribuée librement (licence GNU GPL) sous le nom de *Digital Forestry Toolbox*¹.

1. Parkan, M., *Digital Forestry Toolbox - A collection of tools for Octave/Matlab*, <http://mparkan.github.io/Digital-Forestry-Toolbox/>, 2017.

1.6.3 Développement d'une application d'inventaire virtuel

La création de jeux de donnée de référence (cf. section 1.2), ainsi que la validation qualitative des algorithmes de segmentation nécessite certaines fonctionnalités qui ne sont pas directement disponibles dans les outils existant (p. ex. CloudCompare, Displaz, Fugro Viewer, etc). Une application nommée *treeScope* a été développée pour répondre à ce besoin. L'application permet d'extraire manuellement les arbres d'une parcelle, de calculer automatiquement quelques indicateurs dendrométriques de base (hauteur, volume, surface de la couronne) et d'attribuer des informations récoltées sur le terrain (p. ex. essence, diamètre du tronc, état sanitaire). Elle peut aussi être employée pour visualiser l'extraction automatique des arbres et si nécessaire la corriger.

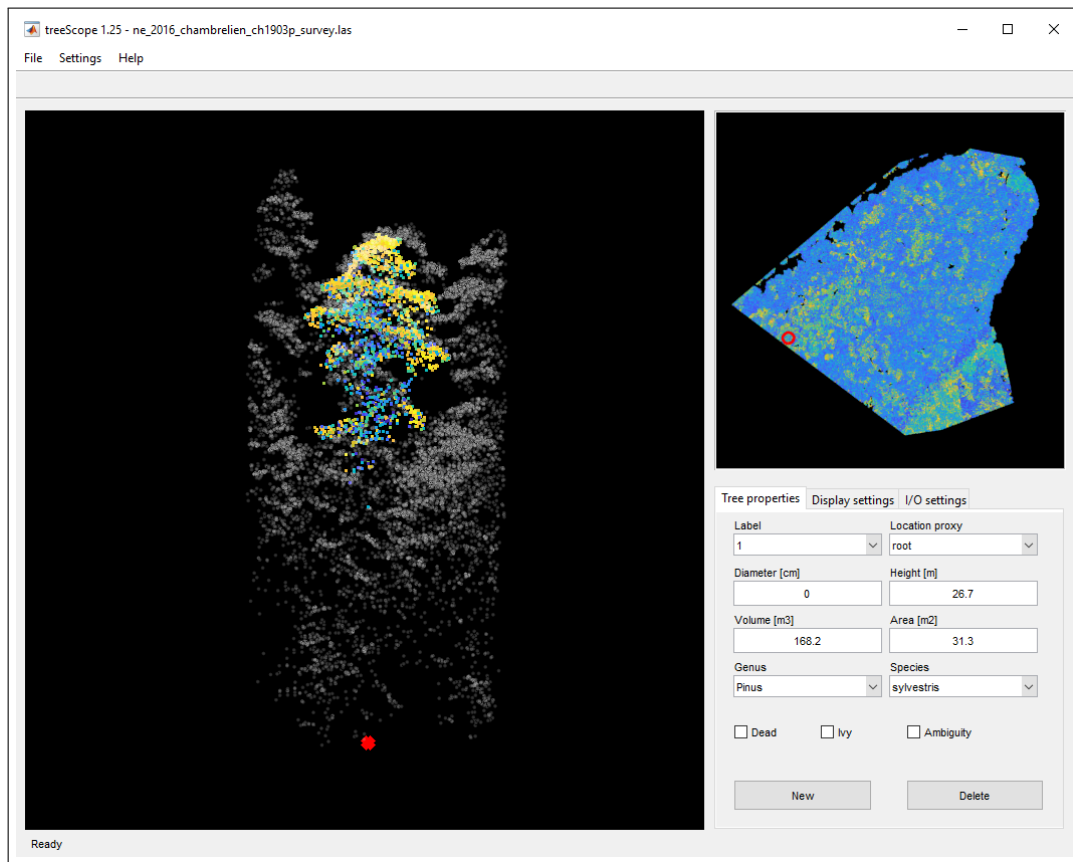


FIGURE 10 – Application *treeScope* pour les inventaires virtuels.

2 Résumé des activités de transfert des connaissances

Les tables 2 à 6 ci-dessous résument les activités formelles de transfert des connaissances réalisées entre février 2014 et décembre 2018. Les catégories d'activités suivantes ont été incluses :

- Présentation/participation lors de conférences, cours de formation professionnelle et forums
- Organisation de réunions annuelles de discussion "*LiDAR et Forêts*" et accueil de chercheurs externes
- Réunions d'échange avec des professionnels du milieu forestier et géomatique
- Supervision de projets d'étudiants/stagiaires liés à la thématique de la thèse

Ces activités ponctuelles sont complétées par une correspondance régulière avec des scientifiques et professionnels du milieu forestier, ainsi que le maintien et la mise à jour périodique du site internet "*LiDAR et Forêts*" destiné essentiellement à la pratique.

TABLE 2 – Activités de transfert des connaissances pour 2014

Date	Lieu	Contexte	Format	Accès
02.05.2014	Lausanne, Suisse	Cours <i>Forêt-bois-paysage</i> , marteloscope Sauvabelin	Discussion	-
06.05.2014- 08.05.2014	EPFL, Lausanne, Suisse	Présentation de la recherche de C. Mallet et N. Chehata (IGN, France)	Présentation orale / Discussion	lien
07.05.2014	Boudry, Suisse	Réunion de discussion LiDAR et forêts 2014	Présentation orale	lien
17.06.2014	HEPIA, Genève, Suisse	Journée des Laboratoires SIG de Suisse Romande (LSSR)	Présentation orale	-
05.11.2014- 07.11.2014	Riva del Garda, Italie	Conférence ForestSat 2014	Présentation orale	-
17.11.2014- 18.11.2014	EPFL, Lausanne, Suisse	Présentation de la recherche de M. Dalponte (Fondazione Edmund Mach)	Discussion / Séminaire IEE EPFL	-

TABLE 3 – Activités de transfert des connaissances pour 2015

Date	Lieu	Contexte	Format	Accès
20.03.2015	Olten, Suisse	Forum " <i>Planification et gestion des forêts</i> ", cours FoWaLa 248	Présentation orale	lien
30.06.2015	WSL, Birmensdorf, Suisse	WSL and SLF Applied Remote Sensing Lectures	Discussion	-
07.07.2015- 10.09.2015	EPFL / SFFN (NE) / SITN, Suisse	Stage de développement d'un outil de délimitation des forêts	Co-supervision du stagiaire	-
27.07.2015- 31.07.2015	Milano, Italie	Conférence IGARSS 2015	Poster / Article	lien
10.09.2015	EPFL, Lausanne, Suisse	Réunion de discussion LiDAR et forêts 2015	Présentation orale	lien

TABLE 4 – Activités de transfert des connaissances pour 2016

Date	Lieu	Contexte	Format	Accès
08.05.2016	-	Mise en ligne de la suite d'outils <i>Digital Forestry Toolbox</i>	Site web	lien
01.02.2016- 01.07.2016	EPFL, Lausanne, Suisse	Projet de recherche semestriel EPFL (10 crédits) sur la détection automatique du lierre par LiDAR aérien	Supervision des étudiants	rapport sur demande
06.09.2016	Boudry, Neuchâtel	Réunion de discussion avec P. Junod	Discussion	-
18.11.2016	EPFL, Lausanne, Suisse	Réunion de discussion LiDAR et forêts 2016	Présentation orale / Discussion	lien
21.11.2016	Lausanne, Suisse	Exposition didactique sur les arbres remarquables de Lausanne	Mise à disposition de résultats et animations 3D	-
20.09.2016- 15.04.2017	EPFL, Lausanne, Suisse	Projet semestriel EPFL sur la classification des espèces en milieu urbain	Supervision de l'étudiant	-

TABLE 5 – Activités de transfert des connaissances pour 2017

Date	Lieu	Contexte	Format	Accès
07.03.2017	EPFL, Lausanne, Suisse	Relevés aériens en forêt par l'entreprise Corvus Monitoring	Conseils / Discussion	-
05.2017	EPFL, Lausanne, Suisse	Travail de Pierre Cothureau sur la détection du rajeunissement par LiDAR	Conseils / Discussion	-
9.10.2017-12.10.2017	VirginiaTech, Virginie, USA	Conférence Silvilaser	Poster / Discussion	-
16.11.2017	Université, Fribourg, Suisse	Cours FoWaLa sur le contrôle de l'efficacité des mesures en faveur de la biodiversité	Présentation / Discussion	-

TABLE 6 – Activités de transfert des connaissances pour 2018

Date	Lieu	Contexte	Format	Accès
12.03.2018	DGAN, Genève, Suisse	Mise à jour de l'inventaire d'arbres urbains	Présentation orale / Discussion	-
23.03.2018	SFFN, Couvet, Suisse	Réunion du SFFN	Présentation orale / Discussion	-
05.06.2018	EPFL, Lausanne, Suisse	Projet de M. Yves Kazemi sur les îlots de chaleur et le régime hydrique des sols urbains	Discussion / Conseils	-
16.10.2018	HAFL, Berne, Suisse	Synoptique de la télédétection forestière en Suisse	Discussion	-
31.10.2018	DGAN, Genève, Suisse	Mise à jour de l'inventaire d'arbres urbains	Discussion	-
10.09.2018	Neuchâtel, Suisse	Réunion SITN/SFFN	Présentation et workshop	-
15.11.2018	EPFL, Lausanne, Suisse	Journée romande de la géoinformation	Présentation orale	-
16.11.2018	WSL, Birmensdorf, Suisse	Cours FoWaLa sur la télédétection forestière	Présentation orale / Discussion	-
7.12.2018	EPFL, Lausanne, Suisse	Travail de brevet de technicien en géomatique. Construction d'un ouvrage en forêt.	Conseils / Discussion	-

3 Collaborations

La table 7 ci-dessous résume les principales collaborations techniques et scientifiques (formelles) établies pour la période de février 2014 à décembre 2018. Certaines des collaborations préétablies et implicites avec les différents services forestiers et de géomatique des cantons impliqués dans le projet ne sont pas listées ici.

TABLE 7 – Collaborations établies pour la période de février 2014 à décembre 2018

Organisation	Interlocuteur(s)	Type(s) de collaboration
Laboratoire de topométrie (TOPO), EPFL	G. Vincent, K. Barbieux, P.-Y. Gilliéron	Support technique pour les relevés de terrain (scanner laser)
Institut G2C, HEIG-VD	G. Chapotte	Support technique pour les relevés de terrain (scanner laser)
Institut de géomatique et d'analyse du risque, Univ. de Lausanne	M.-H. Derron	Support technique pour les relevés de terrain (scanner laser)
Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL)	C. Ginzler, F. Sutter, P. Brang	Projet de création de données de référence LiDAR, Accès aux relevés de terrain pour le site LWF du Jorat (Vaud), mise à disposition des relevés laser du Bois de Chênes (Nyon, Vaud)
Remote Sensing Laboratories, Univ. de Zürich	R. Leiterer, H. Torabzadeh, F. Schneider	Échange d'outils, accès aux relevés de terrain pour le site de Laegeren (ZH), discussions scientifiques
Centre de Compétences en Sylviculture (CCS)	P. Junod	Accès aux relevés de terrain pour les sites de Sauvabelin et Boudry (martelosopes)
BSF Swissphoto	S. Landtwing	Support technique pour l'interprétation des valeurs d'intensité des echos LiDAR
Favre, développement et foresterie Sàrl	C. Favre	Échange de données, essais et évaluation de différentes méthodes/instruments de mensuration forestière
Corvus Monitoring Sàrl	J. Lieb	Échange de données, recommandations pour le traitement de données photogrammétriques, essais d'algorithmes pour estimer la volumétrie
Service des Parcs et Domaines, Ville de Lausanne	M. Rosselet	Échange de données, recommandations pour la mensuration d'arbres remarquables, discussions techniques

4 Éléments livrables

La table 8 ci-dessous résume les éléments livrables. Les données provenant des guichets cartographiques cantonaux (e.g. OIT Vaud, SITN Neuchâtel, etc), des instituts de recherche (e.g. RSL, WSL, etc) et des centres de formation professionnelle (e.g. FWB-CCS) qui n'ont pas été produites spécifiquement pour les besoins du projet ne font pas partie des éléments livrables et ne sont donc pas listées ici :

TABLE 8 – Livrables pour la période de février 2014 à décembre 2018

Type	Description	Format	Accès
Documents	<i>Parkan, Matthew, "Combined use of airborne laser scanning and hyperspectral imaging for forest inventories", 2018.</i>	Rapport de thèse	lien
	<i>Parkan, Matthew and Tuia, Devis, "Individual Tree Segmentation in Deciduous Forests Using Geodesic Voting", in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2015. IGARSS 2015. IEEE International, 2015.</i>	Article scientifique	lien
	<i>Parkan, M., Junod, P., Lugrin, R., Ginzler, C., 2018. A reference airborne LiDAR dataset for forest research. Remote Sensing (Submitted).</i>	Article scientifique	sur demande
	<i>Parkan, Matthew, "Données LiDAR aériennes : pertinence de l'interprétation visuelle pour la foresterie", in Journal Forestier Suisse, 2017.</i>	Article scientifique	lien
	Site internet " <i>LiDAR et Forêts</i> "	Site internet	lien
	Documents contractuels liés à l'acquisition APEX	Fichiers PDF, XLSX	sur demande
Données	Images hyperspectrales APEX - Lausanne (Vaud) et Boudry (Neuchâtel), Juillet 2014	Fichiers IMG (BSQ) / HDR	sur demande
	Inventaires virtuels de référence (arbres individuels labellisés manuellement)	Fichiers LAS	lien
	Relevés scanner laser terrestre au Bois de Sauvabelin (Vaud), au Bois de Chênes (Vaud) et au Bois de Boudry (NE)	Fichiers E57	sur demande
	Cartes des sites d'études et de couverture de données	Projet QGIS	sur demande
	Exemples d'extraction des arbres individuels	Fichiers LAS	sur demande
	Exemples de classification de persistance du feuillage	Fichiers LAS	sur demande
	Table d'équivalence des codes floristiques IPNI et IFN suisse	Fichier XLSX ou CSV	sur demande
Outils	<i>Digital Forestry Toolbox</i>	Code et tutoriels Octave/Matlab	lien
	<i>treeScope</i>	Outil de segmentation	sur demande

5 Modifications apportées au plan de recherche initial

Plusieurs modifications ont été apportées au plan de recherche initial du 30.09.2013 :

5.1 Thèmes de recherche

Les modifications suivantes ont été apportées aux thèmes de recherche :

1. Abandon de l'utilisation de l'apprentissage statistique actif, suite aux récentes recherches effectuée par Persello et al. (2013, 2014). A priori intéressante d'un point de vue théorique, cette approche semble toutefois relativement difficile à implémenter en pratique lors des relevés de terrain et à intégrer avec le processus d'inventaire existant.
2. Abandon de la recherche sur les inventaires participatifs au profit d'une application d'inventaire orientée métier intégrant relevés terrestres et aériens (cf. section 1.6.3). Les initiatives d'inventaire participatif récentes (e.g. *OpenTree Map*, *Falling Fruit*, *Pericopsis*) montrent que cette approche a un certain succès dans les zones urbaines où la position des arbres est facile à déterminer et où la fréquentation du public est importante. Cependant, dans les forêts non-urbaines elle ne montre pas un succès important. Elle semble donc peu adaptée à ce contexte où des relevés professionnels semblent finalement plus réalistes.

5.2 Données et sites d'étude

Les modifications suivantes ont été apportées aux sources de données et sites d'étude :

1. Les nouvelles acquisitions LiDAR 2015-2016 réalisées par les cantons de Vaud et Neuchâtel ont été intégrées à la recherche.
2. L'acquisition LiDAR réalisée en 2014 sur le canton de Zürich a été intégrée à la recherche.
3. L'acquisition LiDAR réalisée en 2017 sur le canton de Genève a été intégrée à la recherche.
4. Abandon de l'utilisation de données multispectrales issues du satellite WorldView 3, aucun échantillon n'ayant été obtenu (suite à la demande formelle envoyée en juillet 2014). En outre, les décalages souvent importants dûs aux erreurs d'orthorectification et de géoréférencement sur ce type d'image constitue une difficulté potentiellement importante pour leur co-référencement spatial avec les relevés LiDAR aériens.
5. La résolution spatiale des données fournies par le consortium APEX est plus faible que prévue (1.75 m annoncé, 2.5-3 m livré).

6 Conclusions et perspectives

Les apports et perspectives du travail de recherche sont présentés en détails dans le **chapitre 6 du rapport de thèse**. Plusieurs axes prioritaires ont été identifiés pour améliorer l'intégration des produits de la télédétection LiDAR dans les inventaires forestiers :

- Concernant la segmentation d'arbres individuels et/ou la détection des troncs, les algorithmes disponibles actuellement ne fournissent pas à l'heure actuelle un résultat suffisamment fiable dans les forêts avec une structure complexe. L'augmentation de la densité des points par unité de surface, la réalisation d'acquisition LiDAR lors de périodes sans feuilles et le développement de nouveaux algorithmes (en particulier basés sur les réseaux de neurones profonds) sont des solutions potentielles qui permettront d'améliorer de façon significative la fiabilité des inventaires forestiers assistés par LiDAR aéroporté.
- Concernant l'estimation du diamètre à hauteur de poitrine. L'estimation indirecte (allométrie) du diamètre reste la solution la plus pragmatique pour la plupart des données LiDAR à disposition actuellement. La mesure directe du DHP dans les nuages de points est déjà possible pour une partie des données très denses issues d'acquisitions LiDAR récentes. A l'avenir, la mesure directe sera favorisée par l'augmentation de la qualité des données LiDAR et pourra vraisemblablement remplacer l'estimation indirecte.
- Concernant l'identification des essences. Il a été montré que l'ajout d'information provenant de l'imagerie hyperspectrale (du système APEX) aux informations structurales provenant du LiDAR permettait d'améliorer significativement les performances d'identification des essences (augmentation d'environ 5% par rapport à l'utilisation du LiDAR seul). A cet effet, les acquisitions avec des systèmes intégrant une caméra multi/hyper-spectrales et un LiDAR sont une solution potentielle à privilégier par rapport aux acquisitions diachroniques avec des systèmes indépendants.
- Concernant les données. Une meilleure coordination avec les services forestiers et instituts de recherche spécialisés (p. ex. WSL), lors de la planification des acquisitions LiDAR est nécessaire, afin d'assurer la disponibilité de relevés terrestres simultanés, indispensables pour la calibration et la validation des algorithmes appliqués aux données de télédétection.
- Concernant le transfert des connaissances à la pratique. Il est nécessaire d'encourager la création de plateformes, de documents et d'événements permettant non-seulement la communication des travaux de recherche scientifique aux praticiens, mais aussi le transfert de compétences techniques permettant de reproduire les analyses et produits cartographiques (p. ex. via des ateliers informatiques).

7 Références

- Duncanson, L., Rourke, O., Dubayah, R., 2015. Small Sample Sizes Yield Biased Allometric Equations in Temperate Forests. *Scientific Reports* 5, 17153. doi :doi: 10.1038/srep17153.
- Gitelson, A.A., Keydan, G.P., Merzlyak, M.N., 2006. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. *Geophysical Research Letters* 33. doi :doi: 10.1029/2006GL026457.
- Jucker, T., Caspersen, J., Chave, J., Antin, C., Barbier, N., Bongers, F., Dalponte, M., van Ewijk, K.Y., Forrester, D.I., Haeni, M., Higgins, S.I., Holdaway, R.J., Iida, Y., Lorimer, C., Marshall, P.L., Momo, S., Moncrieff, G.R., Ploton, P., Poorter, L., Rahman, K.A., Schlund, M., Sonké, B., Sterck, F.J., Trugman, A.T., Usoltsev, V.A., Vanderwel, M.C., Waldner, P., Wedeux, B.M.M., Wirth, C., Wöll, H., Woods, M., Xiang, W., Zimmermann, N.E., Coomes, D.A., 2016. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Global Change Biology* , n/a–n/adoi :doi: 10.1111/gcb.13388.
- Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M.K., Kelly, M., 2012. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 78, 75–84.
- Parkan, M., Tuia, D., 2015. Individual tree segmentation in deciduous forests using geodesic voting, in : *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International, IEEE*. pp. 637–640.
- Parkan, M., Tuia, D., 2018. Estimating Uncertainty of Point-Cloud Based Single-Tree Segmentation with Ensemble Based Filtering. *Remote Sensing* 10, 335. doi :doi: 10.3390/rs10020335.
- Persello, C., Boularias, A., Dalponte, M., Gobakken, T., Naeset, E., Scholkopf, B., 2014. Cost-Sensitive Active Learning With Lookahead : Optimizing Field Surveys for Remote Sensing Data Classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52, 6652–6664. doi :doi: 10.1109/TGRS.2014.2300189.
- Persello, C., Dalponte, M., Gobakken, T., Naeset, E., 2013. Optimizing the ground sample collection with cost-sensitive active learning for tree species classification using hyperspectral images, in : *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International*, pp. 2091–2094. doi :doi: 10.1109/IGARSS.2013.6723224.
- Schneider, F.D., Morsdorf, F., Schmid, B., Petchey, O.L., Hueni, A., Schimel, D.S., Schaepman, M.E., 2017. Mapping functional diversity from remotely sensed morphological and physiological forest traits. *Nature Communications* 8, 1441. doi :doi: 10.1038/s41467-017-01530-3.
- Yin, D., Wang, L., 2016. How to assess the accuracy of the individual tree-based forest inventory derived from remotely sensed data : A review. *International Journal of Remote Sensing* 37, 4521–4553. doi :doi: 10.1080/01431161.2016.1214302.