

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 168 (2017)

**Heft:** 3

**Artikel:** Données LiDAR aériennes : pertinence de l'interprétation visuelle pour la foresterie

**Autor:** Parkan, Matthew

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1097475>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 02.05.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Données LiDAR aériennes: pertinence de l'interprétation visuelle pour la foresterie

Matthew Parkan Laboratoire des systèmes d'information géographique, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (CH)\*

## Données LiDAR aériennes: pertinence de l'interprétation visuelle pour la foresterie

Les relevés LiDAR aériens sont particulièrement bien adaptés à la cartographie, l'étude et la gestion de grandes étendues forestières. Les produits dérivés de cette technologie sont de plus en plus souvent utilisés par les gestionnaires pour établir un diagnostic général de l'état des forêts. Moins répandue est l'utilisation de ces produits pour la réalisation d'analyses détaillées sur des petites surfaces; par exemple la création de plans de référence détaillés en soutien à un inventaire ou un martelage. Dans ce contexte, l'interprétation visuelle directe est une approche qui présente un intérêt significatif, car elle est beaucoup plus simple à mettre en œuvre qu'une analyse algorithmique et peut renseigner rapidement sur des caractéristiques surfaciques (p. ex. délimitation, mixité), structurales (p. ex. stratification) et ponctuelles (p. ex. position et hauteur des arbres/fûts). Cet article examine trois points importants qui déterminent la pertinence de l'interprétation visuelle: les paramètres d'acquisition, la représentation interactive des données et l'identification des caractéristiques forestières. Il est montré que l'emploi de palettes de couleurs thématiques associé à la visualisation interactive des nuages de points 3D denses et/ou des vues en profil permet d'établir (pour toutes les strates) une cartographie détaillée et exacte d'une parcelle à l'échelle de l'arbre individuel.

**Keywords:** LiDAR, forest remote sensing, visual interpretation

**doi:** 10.3188/szf.2017.0127

\* CH-1015 Lausanne, courriel [matthew.parkan@epfl.ch](mailto:matthew.parkan@epfl.ch)

Depuis l'an 2000, la diminution des coûts d'acquisition associée à l'amélioration constante des instruments LiDAR a permis d'augmenter significativement la fréquence et la qualité des relevés 3D aériens. Ainsi, une part importante du territoire suisse a été couverte par une ou plusieurs campagnes de mesure qui fournissent un instantané synthétique de l'état général des canopées.

Dans ce contexte, le développement d'algorithmes capables d'effectuer automatiquement des mesures dendrométriques fines sur de grandes surfaces présente un intérêt certain et offrira à terme un complément relativement peu onéreux aux inventaires forestiers terrestres. Toutefois, dans leur état actuel, les algorithmes de détection et de caractérisation d'arbres individuels – indispensables pour la réalisation d'analyses détaillées – sont encore loin d'approcher les performances analytiques du cerveau humain. Ainsi, si la création et l'analyse automatique de quelques produits dérivés génériques (p. ex. modèle numérique de hauteur/canopée, délimitation approximative des lisières, détection des cimes) sont maintenant assez bien maîtrisées en pratique, il n'en

va pas de même pour des produits plus spécifiques et complexes (p. ex. carte détaillée des arbres individuels, essences, strates) destinés par exemple à des applications localisées plus opérationnelles comme l'inventaire et le martelage. Or, la résolution de plus en plus élevée des relevés laser aériens (de quelques dizaines à centaines de points par mètre carré) signifie que les mesures se rapprochent d'une perception volumétrique réelle et que l'identification de caractéristiques à l'échelle de l'arbre par interprétation visuelle devient plus aisée. Malgré cela, les données issues du LiDAR aérien, pourtant très riches en informations structurales, font rarement l'objet d'une analyse visuelle détaillée. Les praticiens se limitent souvent à quelques observations sommaires sur le modèle numérique de hauteur/canopée (MNH/MNC), alors qu'une analyse plus fine pourrait être accomplie en travaillant interactivement avec différents modes de représentation. La visualisation exploratoire des données joue aussi un rôle important dans la recherche, car elle permet d'établir un diagnostic rapide des artefacts présents (p. ex. erreurs de classification, bruit), d'évaluer le potentiel d'au-

tomatisation d'une tâche et de créer des observations de référence pour le développement et la validation de nouveaux algorithmes.

La suite de cet article présente trois phases fondamentales de l'interprétation visuelle des données LiDAR aériennes: 1) la connaissance des conditions d'acquisition (production des données), 2) la représentation des données et 3) l'identification de caractéristiques forestières (surfaciques, linéaires, structurales et ponctuelles).

### La connaissance des conditions d'acquisition

On constate souvent que des contraintes techniques (météo, topographie, neige, réglage des instruments, etc.), budgétaires et organisationnelles (planification, contrôles de qualité) engendrent un produit final suboptimal pour les applications forestières. Ainsi, la configuration idéale – c'est-à-dire une acquisition à haute densité réalisée avec un minimum de feuilles (en plaine, typiquement février-mars) et une faible hauteur de vol – est rarement totalement appliquée. Il est aussi commun qu'une campagne d'acquisition s'étende sur plusieurs mois et que les données résultantes contiennent un mélange de configurations (p. ex. des mesures effectuées à différents stades phénologiques), en fonction des secteurs et/ou sur un même site. Il faut donc adapter son interprétation à chaque site, selon les métadonnées locales. On peut noter, au passage, que la mise en place d'un protocole d'acquisition optimal (régionalisé) et la standardisation des métadonnées, à l'instar des démarches entreprises par les services forestiers et géologiques nord-américains (Heidemann 2014, White et al 2013, Gatzliolis & Andersen 2008), permettraient d'assurer une meilleure intégration du LiDAR dans la pratique forestière suisse.

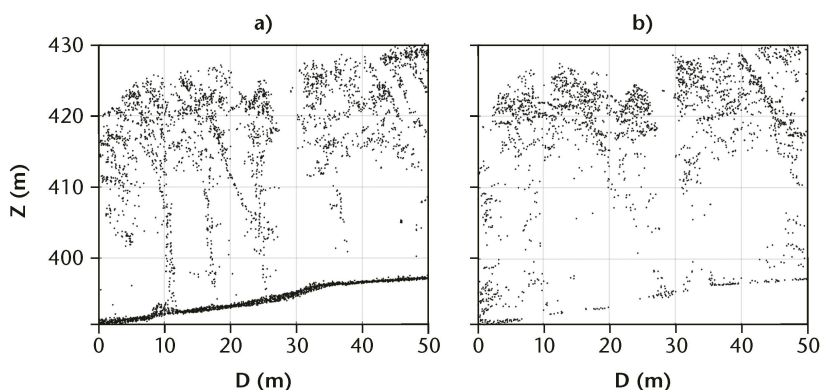


Fig. 1 Extraits de vues en profil illustrant la différence entre deux configurations d'acquisition sur la forêt de la colline de Dorigny (Ecublens, Vaud). (a) vol effectué en mars 2012 (sans feuilles), densité moyenne de 30 points/m<sup>2</sup>, Optech ALTM Gemini. (b) vol effectué en octobre 2015 (avec feuilles), densité moyenne de 14 points/m<sup>2</sup>, Trimble AX60. Les éléments situés sous la canopée (p. ex. terrain, troncs, branches principales) sont bien moins apparents dans l'acquisition de 2015. Données: Office d'information du territoire vaudois

Les paragraphes ci-dessous passent en revue les principaux paramètres intéressants pour la foresterie et leur significativité pour l'interprétation; soit le stade phénologique, la densité des points, la hauteur de vol et le traitement de l'intensité des échos.

Le stade phénologique détermine la distance de pénétration du laser à travers la canopée et influence donc la distribution verticale des échos. Un vol réalisé avec feuilles réduit la pénétration du laser avec pour conséquence une modélisation médiocre des structures sous-jacentes à la canopée et donc l'augmentation de l'erreur associée au modèle de hauteur/canopée (figure 1). La possibilité de différencier le feuillage persistant et caduc dépend aussi de la période de vol. En effet, la plupart des instruments LiDAR fonctionnent dans la bande de lumière proche infrarouge qui est fortement réfléchi par les pigments photosynthétiques. Ainsi, dans les acquisitions sans feuilles, la végétation à feuillage persistant (p. ex. conifères, houx, lierre, ronces) engendre des échos qui contrastent avec le reste des éléments (figure 4d).

Combinée au stade phénologique, la densité des points va déterminer le détail des structures végétales observables (figure 1) et la qualité du modèle de hauteur/canopée. Ce paramètre est dépendant de la configuration de vol (hauteur, vitesse, recouvrement des bandes), de réglages instrumentaux (énergie émise, fréquence des impulsions, nombre d'échos par impulsion, digitalisation du retour d'onde) et des post-traitements (p. ex. filtrage des points mesurés avec des angles de scan trop larges). Plus la densité de points est faible, plus grande est la dépendance à l'interpolation lors du calcul des modèles d'élévation (terrain et surface), avec pour effet une augmentation de l'incertitude sur les hauteurs. La densité de points est souvent inhomogène, soit à cause d'un changement volontaire de résolution (par exemple une différenciation entre les zones urbaines, rurales et/ou montagneuses), soit à cause de la variabilité du recouvrement des lignes de vol. On peut encore signaler que la densité de points très élevée dans certaines acquisitions récentes (>100 points/m<sup>2</sup>) permet parfois de mesurer le diamètre du tronc des grands arbres directement sans faire appel à des estimations allométriques (figure 7).

La hauteur de vol de l'aéronef et l'angle de scan du rayon laser déterminent la distance entre le capteur et la surface observée. Associée à la divergence du rayon laser (spécifiée dans la fiche technique de l'instrument), cette distance détermine à son tour la taille de l'empreinte projetée sur les surfaces visées. La diminution de la hauteur de vol réduit l'empreinte (concentre l'énergie de l'impulsion) et permet généralement une meilleure pénétration du laser à travers la canopée, mais réduit la probabilité d'avoir des échos multiples. A l'inverse, l'augmentation de la hauteur de vol élargit l'empreinte (diffuse l'énergie de l'impulsion), ce qui augmente la probabilité

d'obtenir des échos multiples, mais peut diminuer la distance de pénétration. La hauteur de vol influence aussi la précision des points mesurés. Généralement, la fonction qui relie la hauteur de vol à la précision planimétrique et altimétrique des points 3D est indiquée dans la fiche technique de l'instrument. Dans tous les cas, la précision des points est inversement proportionnelle à la hauteur de vol.

Le dernier paramètre important est l'intensité des échos laser. Une calibration adéquate de l'intensité des échos assure la comparabilité de mesures réalisées sous différentes conditions (p. ex. hauteur de vol, topographie, instruments différents). Elle est notamment importante pour tout traitement ou interprétation lié à la persistance du feuillage et à la taille des structures végétales interceptées par le laser. Cependant, la calibration/correction rigoureuse de l'intensité nécessite une modélisation relativement complexe (Kashani et al 2015) qui est rarement mise en œuvre dans la pratique. Seule la correction liée à la distance entre le capteur et la surface observée est parfois appliquée. En outre, par manque d'intérêt pour cet attribut, il est fréquent que ni les mandataires, ni les clients, n'y accordent de l'attention. Si bien que les traitements appliqués ne sont souvent pas spécifiés dans les métadonnées et nécessitent une prise de contact ultérieure avec le mandataire, voire directement avec le fabricant de l'instrument.

Plusieurs auteurs (p. ex. Næsset et al 2005, Orka et al 2010, Hyyppä et al 2005, Disney et al 2010, Jakubowski et al 2013, White 2013) ont effectué des recherches sur l'influence des conditions d'acquisition sur les produits dérivés du LiDAR, nous renvoyons le lecteur à leurs travaux pour davantage de détails.

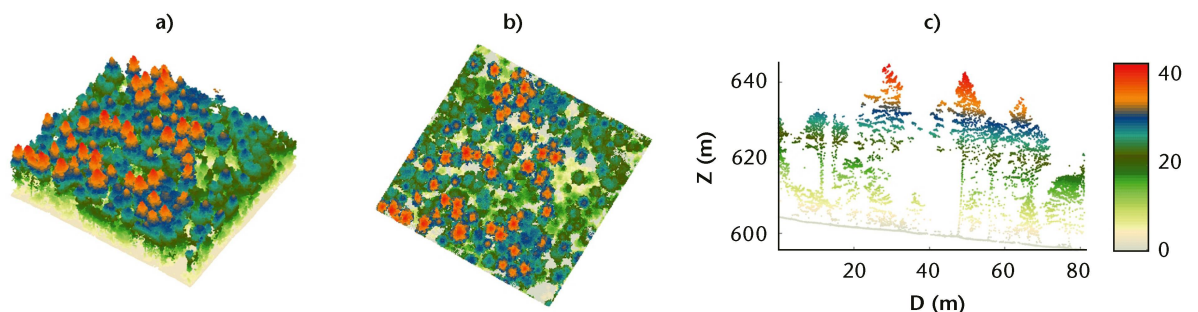
## La représentation des données

La représentation est un aspect-clé de l'interprétation des produits dérivés du LiDAR aérien. Les trois formes de représentation les plus communes

(figure 2) sont le nuage de point 3D, le modèle d'élévation image (c.-à-d. terrain, surface, hauteur/canopée) et le profil altimétrique (vue en coupe). Chacune comporte des avantages et des biais qu'il faut prendre en compte lors de l'interprétation visuelle.

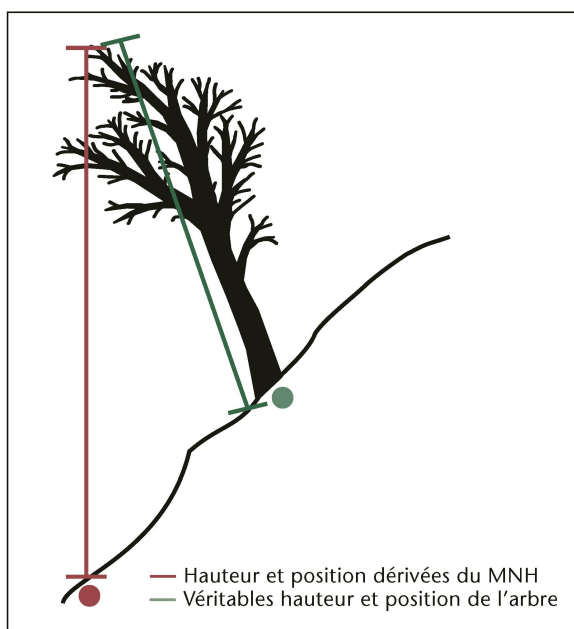
Le nuage de points 3D (figure 2a) est une représentation qui requiert de l'interactivité (translation, rotation, zoom, transition entre vue orthographique ou en perspective, affichage différencié des classes de points) pour être exploitable et qui perd son utilité sur papier. Avec un point de vue éloigné, cette représentation fournit simultanément une vue synthétique de la topographie et du couvert végétal, mais l'occlusion engendrée par les points situés au premier plan masque tous les éléments de fond. En vue nadirale orthographique (c.-à-d. sans effet de perspective) et avec une coloration représentant la hauteur, cette représentation est équivalente à une image (figure 2b). A l'inverse, un point de vue rapproché sur une étendue limitée et avec une inclinaison proche de l'horizontale facilite la perception volumétrique locale; ce qui est utile pour analyser l'architecture des arbres individuels (figure 7). Pour cet usage, il est particulièrement utile d'ajouter un référentiel d'échelle (p. ex. une silhouette humaine).

Les modèles numériques de terrain (MNT), de surface (MNS) et de hauteur/canopée (MNH/MNC) sont des images qui permettent de visualiser respectivement la topographie (figure 4c), la couverture du sol et la hauteur des objets (figure 2b). Tout comme le nuage de points 3D, ces représentations facilitent la vue d'ensemble et la compréhension du contexte spatial planimétrique. Toutefois, comme le MNH/MNC représente la différence d'altitude verticale entre la surface et le terrain, il est fortement biaisé par la pente du terrain et l'inclinaison des tiges. Outre l'erreur sur la hauteur des arbres, l'un des défauts de cette représentation est le décalage horizontal des cimes (figure 3). Khosravipour et al (2015) ont démontré que ce décalage parfois important ne dépendait pas seulement de la pente du terrain, mais aussi de la forme de la couronne et par extension de



**Fig. 2** Le marteloscope de Boudry division 20 est (Neuchâtel) représenté en (a) nuages de points 3D, (b) modèle de canopée image et (c) profil altimétrique. La palette de couleurs illustre la hauteur. Elle est composée d'un gradient de vert avec une saturation croissante de 0 à 25 m, suivie d'une palette divergente avec du bleu de 25 à 35 m et du orange/rouge (couleurs complémentaires au bleu/vert) pour les valeurs supérieures. Cette palette permet surtout de percevoir rapidement les extrêmes (grands arbres et éclaircies), mais nécessite plus d'attention pour la lecture des hauteurs intermédiaires. Données: Système d'information du territoire neuchâtois et Centre de compétence en sylviculture

**Fig. 3** Erreurs de position et de hauteur inhérentes au modèle de hauteur (canopée).

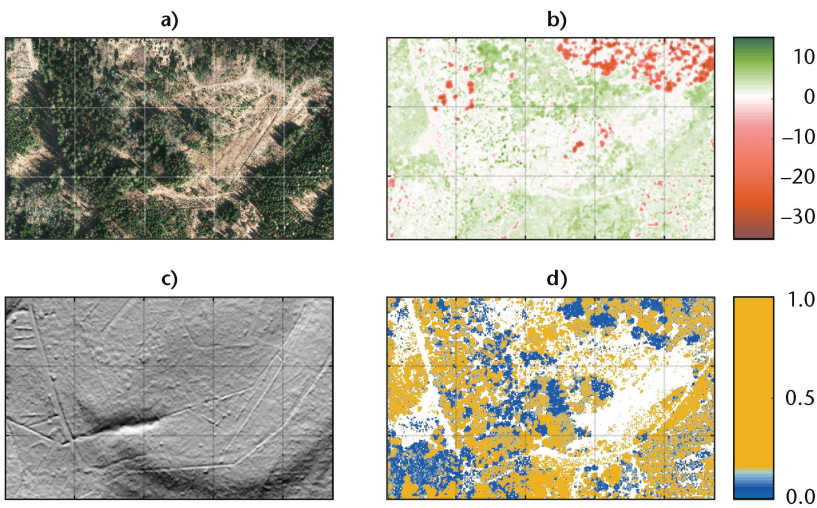


l'essence observée. Finalement, dans cette représentation, seuls les arbres qui ont une cime bien définie (en particulier les conifères) sont apparents. Ainsi, dans la plupart des cas, elle ne peut pas être utilisée pour repérer précisément la position des feuillus.

En termes de contenu en information structurale, la vue en profil (figure 2c) est une représentation intermédiaire entre le modèle de hauteur/canopée (pauvre en information structurale) et le nuage de points 3D (très riche en information structurale). C'est notamment la représentation qui permet le mieux d'apprécier la stratification de la forêt. Contrairement à un relevé d'arbres individuels sur le MNH/MNC dans lequel on utilise la position des cimes comme proxy, le relevé dans un profil permet de mesurer la position et la hauteur exactes des arbres (figure 5). L'erreur planimétrique associée au relevé de positions effectué de cette manière dépend de l'épaisseur et de l'orientation du profil, ainsi que de la précision du marquage réalisé par l'interprète. Comme l'épaisseur du profil détermine l'occlusion visuelle, il est préférable de ne pas utiliser une épaisseur plus grande que 1.5 m, afin d'éviter le masquage des points en arrière-plan et de restreindre l'erreur de marquage des tiges. Le choix de l'orientation du profil est aussi important. En présence d'arbres fortement inclinés, on utilisera une orientation la plus proche possible de celle des individus observés (figure 5b), afin de mesurer correctement la hauteur et l'inclinaison des fûts.

Mode	Caractéristiques	Colorations
Image	Hauteur approximative de la canopée (biaisée en pente) et position des arbres remarquables. Délimitation approximative des lisières/clairières.	Contraste de chromaticité (vert-rouge et/ou jaune/orange-bleu) avec une/ plusieurs valeurs seuils permettant de marquer la transition à une hauteur importante (p. ex. jeune forêt, arbres remarquables). Cf. figure 2b.
	Accroissement/abattement de la canopée.	Contraste de chromaticité (vert-rouge ou jaune/orange-bleu) avec une valeur seuil/neutre (blanc). Cf. figure 4b.
	Mixité des forêts.	Contraste de chromaticité (vert-rouge ou jaune/orange-bleu) avec une valeur de divergence qui marque le passage du feuillage caduc au feuillage persistant. On utilisera de préférence uniquement la valeur des premiers échos normalisée par un maximum de référence (typiquement un quantile proche de 1) pour accentuer le contraste. Cf. figure 4d.
	Surface et forme relative des couronnes.	Contraste de luminance (niveaux de gris).
	Topographique du sol (p. ex. layons, ornières, canaux de drainage).	Contraste de luminance (niveaux de gris) et ombrage (avec éventuellement variation interactive de l'azimut et de l'élévation de l'éclairage). Cf. figure 4c.
Profil altimétrique (vue en coupe)	Position et hauteur exacte du fût/totale des arbres individuels.	Monochromatique (blanc/noir) ou contraste de chromaticité (vert-rouge ou jaune/orange-bleu) en fonction de l'intensité des échos. Cf. figure 5.
	Délimitation exacte des lisières/clairières.	
	Stratification et renouvellement.	Contraste de chromaticité (vert-rouge ou jaune/orange-bleu) en fonction de l'intensité des échos.
	Identification des essences et architecture des arbres. Présence de lierre.	
Nuage de points	Contexte topographique.	Contraste de chromaticité, de luminance ou drapage de couleurs de l'orthophoto. Cf. figure 2a.
	Hauteur relative des canopées.	
	Position des arbres remarquables. Identification des essences et architecture des arbres.	Monochromatique (blanc/noir) ou contraste de chromaticité (vert-rouge ou jaune/orange-bleu) en fonction de l'intensité des échos. Cf. figure 7.

**Tab. 1** Recommandations de représentations pour l'interprétation visuelle de différentes caractéristiques forestières.



**Fig. 4** Forêts de Corcelles-le-Jorat (Vaud). (a) Orthophoto de référence, mars 2012. (b) Différences de hauteurs (en mètres) des canopées entre mars 2012 et novembre 2015. (c) Modèle de terrain ombré. (d) Intensité relative des premiers échos permettant de différencier la persistance du feuillage (bleu: caduc, orange: persistant). Données: Office d'information du territoire vaudois

Dans chacune des représentations évoquées plus haut, la couleur peut être employée pour illustrer un attribut. La palette de couleurs utilisée joue un rôle prépondérant dans l'interprétation (tableau 1); elle doit donc être adaptée à la nature de l'attribut représenté, à l'information que l'on cherche à transmettre et au support utilisé pour la lecture (interactif ou statique, en couleurs ou en nuances de gris). Les palettes qui utilisent un contraste de luminance (gradient de niveaux de gris) permettent de mieux percevoir les détails, les formes géométriques (p. ex. aspect des couronnes) et la profondeur (p. ex. topographie fine), mais conviennent moins bien à la lecture d'une valeur exacte (p. ex. hauteur, intensité). A l'inverse, l'utilisation d'un contraste de chroma-

maticité (gradient de couleurs) est plutôt adaptée à la distinction de catégories (p. ex. classification des points, numéro de l'écho, nombre d'échos) et à la lecture de valeurs continues (p. ex. hauteurs). Dans beaucoup de cas, on utilisera un compromis qui combine des contrastes de luminance et de chromaticité (Ware 2010). L'œil humain étant particulièrement sensible à la couleur jaune, on peut en outre utiliser cette couleur pour mettre en évidence des éléments importants (p. ex. arbres remarquables).

## L'identification de caractéristiques forestières

### Caractéristiques surfaciques et linéaires

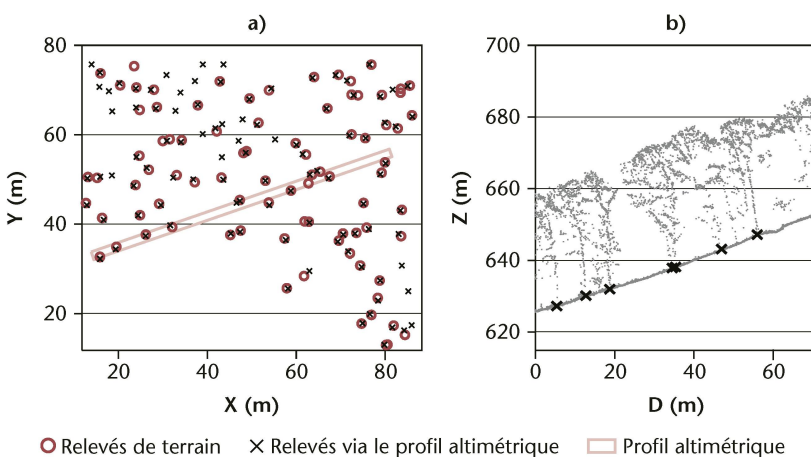
Avec le modèle de hauteur/canopée (figure 2b), on peut notamment effectuer une délimitation approximative des lisières, des clairières, des peuplements (hauteurs homogènes) et repérer les arbres remarquables. En superposant quelques éléments cartographiques supplémentaires (p. ex. courbes de niveau, sentiers, rivières), ce modèle peut aussi être utilisé comme plan de référence sur le terrain et servir à reporter approximativement des observations. Il devient toutefois difficile à interpréter en présence de forêts denses et/ou très homogènes. Des relevés réalisés à deux époques permettent entre outre l'identification des zones d'accroissement ou d'abattement (figure 4b). Lors d'une telle analyse diachronique, il est important de connaître le stade phénologique pendant lequel chacun des relevés LiDAR a été effectué. Si les deux relevés ont été effectués à des stades opposés (avec et sans feuilles), il faut éviter de surinterpréter des petites différences de hauteur car elles ne traduisent pas forcément un accroissement/abattement réel.

En observant un modèle de terrain ombré à haute résolution (<50 cm), il est possible d'identifier certaines caractéristiques linéaires comme les sentiers, les ornières, les canaux de drainage, les layons et parfois les endains de rémanents (figure 4c). Ces éléments topographiques fins qui ne sont généralement pas cartographiés (ou plus à jour) peuvent par exemple renseigner sur la compaction et le régime hydrique des sols. Ils permettent aussi de faciliter l'orientation sur le terrain (utilisés comme plan lors d'un martelage ou d'un inventaire) et de planifier une desserte favorisant l'utilisation des tracés déjà existants pour les engins forestiers.

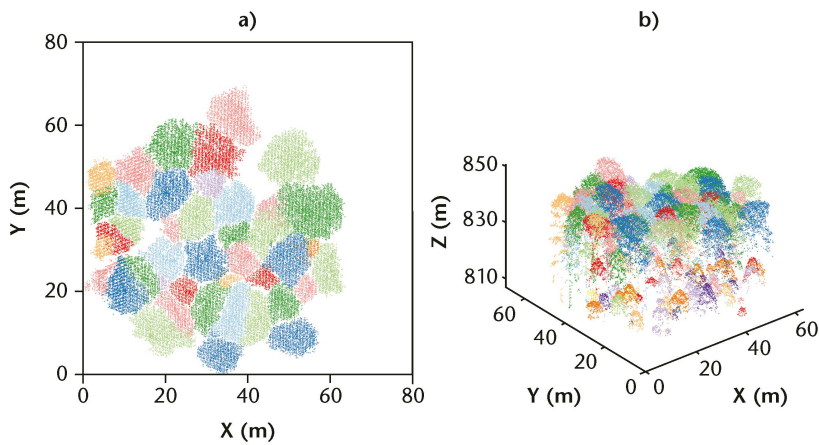
Finalement, l'interprétation de l'intensité des premiers échos permet de différencier le feuillage persistant et caduc dans la canopée et donc d'évaluer le degré de mixité d'un secteur (figure 4d).

### Caractéristiques ponctuelles et structurales

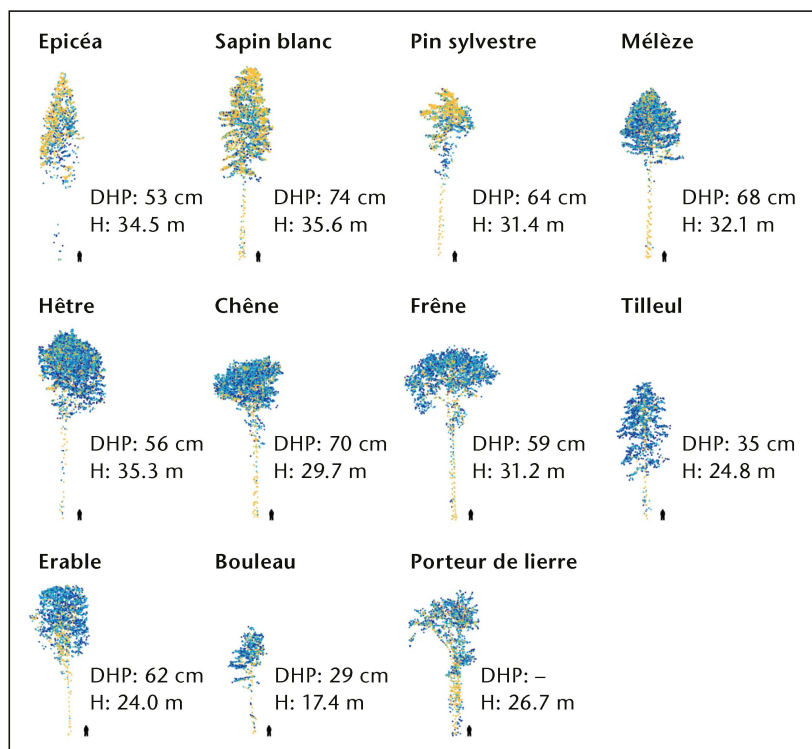
Il est possible d'établir un plan de référence très détaillé et exact en annotant la position et la



**Fig. 5** Marteloscope de Sauvabelin (Lausanne, Vaud). (a) Plan de comparaison des relevés d'arbres réalisés sur le terrain (seuil d'inventaire DHP = 15 cm) et via l'interprétation des profils altimétriques. (b) Profil altimétrique (orienté perpendiculairement aux courbes de niveau) et tiges marquées correspondant à l'empreinte du profil visible sur le plan. En traduisant le profil sur toute l'étendue du secteur d'intérêt, il est possible de relever précisément la position, la hauteur (totale/fût) et l'inclinaison de la plupart des arbres. Données: Office d'information du territoire vaudois



**Fig. 6** Extrait de segmentation (découpage) manuelle des arbres du bois de Benenté (Montheron, Vaud). La coloration permet uniquement de distinguer les arbres adjacents. (a) Vue nadirale montrant la strate supérieure (canopée). Le phénomène de timidité des couronnes est visible. (b) Vue oblique montrant les deux strates (futaie de hêtres et sapins blancs en sous-bois). Données: Office d'information du territoire vaudois



**Fig. 7** Segmentation (découpage) manuelle de quelques arbres à partir de l'acquisition LiDAR de mars 2016 (densité: 50–70 points/m<sup>2</sup>) réalisée sur le canton de Neuchâtel illustrant quelques essences fréquemment rencontrées dans les forêts suisses. La couleur des points 3D est en fonction de l'intensité des échos (bleu: faible, jaune/orange: forte). Le diamètre provient des relevés de terrain et la hauteur a été mesurée dans le nuage de points. L'échelle de la figure ne permet pas de distinguer le branchage principal, bien qu'il soit visible avec une vue plus rapprochée. Seule la visualisation interactive permet de correctement interpréter la structure des branches principales pour identifier l'essence. Données: Système d'information du territoire neuchâtelois et Centre de compétence en sylviculture

hauteur des arbres sur des profils altimétriques successifs (figure 5). De manière analogue, la segmentation (découpage) manuelle interactive d'un nuage de points 3D permet d'isoler chaque arbre (figure 6) et de quantifier la surface et le volume des couronnes.

Ces méthodes, particulièrement bien adaptées aux futaies, évitent aussi les erreurs géométriques

liées au MNH/MNC évoquées précédemment. Les profils altimétriques permettent en outre de différencier la hauteur totale et la hauteur du fût.

Ces caractéristiques ponctuelles peuvent ensuite être agrégées à l'échelle de la parcelle observée pour déterminer le nombre de tiges, la distribution des hauteurs ou pour établir une délimitation de lisière plus précise que celle obtenue via le modèle de hauteur image (MNH/MNC). Finalement, les différentes strates (y c. les jeunes arbres) peuvent aussi être identifiées sur des profils altimétriques et fournir des indications sur le renouvellement en sous-bois.

Pour l'identification des essences, quelques indicateurs géométriques et radiométriques (liés à l'intensité) peuvent être dérivés du LiDAR. Toutefois, pour la plupart, ces indicateurs nécessitent un traitement additionnel et ne sont pas directement apparents en observant des profils altimétriques ou des points 3D. Par contre, certaines des indications préconisées pour la photo-interprétation forestière (Sayn-Wittgenstein 1978, Boutin et al 1953) et pour l'analyse de l'architecture des arbres restent valables pour le LiDAR aérien.

Une première distinction entre les arbres à feuillage persistant et caduc est rapidement effectuée en observant la différence d'intensité des échos (faible pour le feuillage caduc, forte pour le feuillage persistant). La distinction des principaux conifères (épicéa, sapin blanc, pin sylvestre) au stade mature est ensuite relativement aisée, en observant la forme distincte de leur couronne et de leur cime respective: couronne étroite et cime pointue pour l'épicéa, couronne plus large et cime aplatie pour le sapin blanc, couronne irrégulière et lacunaire pour le pin sylvestre (figure 7).

Pour les arbres à feuillage caduc, sauf le mélèze dont la couronne conique large est facilement identifiable, la forme des couronnes n'est pas aussi distincte et il est nécessaire de se focaliser sur l'architecture des branches principales. Ces structures, larges par rapport à l'empreinte du laser, ont une plus grande probabilité de produire des échos uniques avec une forte intensité que les structures fines. En analysant la densité (ouverture), la ramification, l'orientation des axes et la sinuosité de ces branches, il est parfois possible d'identifier l'essence, quoique cette interprétation reste généralement plus ambiguë que pour les conifères (figure 7).

Finalement, les arbres où le lierre est bien développé, intéressants pour la biodiversité, sont identifiables grâce à l'intensité forte des échos et à l'aspect anormalement large des structures principales (figure 7).

## Conclusion

En se familiarisant avec les conditions de production et de représentation des données LiDAR,

puis en suivant quelques règles d'interprétation, il est possible d'identifier visuellement des caractéristiques forestières utiles pour l'étude et la gestion des forêts. L'avènement de traitements automatisés fournissant des produits complexes «clé en main» ne signifie pas que l'interprétation visuelle des produits de base est une méthode désuète. Pour les applications opérationnelles, particulièrement, en soutien par exemple à un inventaire ou un martelage, la résolution de plus en plus élevée des données combinée au développement d'outils de visualisation interactifs (p. ex. guichets cartographiques 3D en ligne) signifie que les compétences visuelles développées par les forestiers sur le terrain sont aussi valorisables pour l'interprétation des données LiDAR aériennes. ■

*Soumis: 5 octobre 2016, accepté (avec comité de lecture): 20 décembre 2016*

## Références

- ANDERSEN HE, REUTEBUCH SE, MCGAUGHEY RJ (2006) A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Can J Remote Sens* 32: 355–366.
- BOUTIN J ET AL (1953) La photographie aérienne et ses applications forestières. *Rev for fr* (11): 746.
- DISNEY MI, KALOGIROU V, LEWIS P, PRIETO-BLANCO A, HANCOCK S ET AL (2010) Simulating the impact of discrete-return lidar system and survey characteristics over young conifer and broadleaf forests. *Remote Sens Environ* 114: 1546–1560.

- GATZLIOS D, ANDERSEN HE (2008) A guide to LiDAR data acquisition and processing for the forests of the Pacific Northwest. Portland: Pacific Northwest Research Station. 32 p.
- HEIDEMANN HK (2014) Lidar base specification (version 1.2). Sioux Falls: U.S. Geological Survey. 67 p.
- HYYPÄ H, YU X, HYYPPÄ J, KAARTINEN H, KAASALAINEN S ET AL (2005) Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas. *Int Arch Photogramm Remote Sens* 36: 85–90.
- JAKUBOWSKI MK, GUO Q, KELLY M (2013) Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy. *Remote Sens Environ* 130: 245–253.
- KASHANI AG, OLSEN MJ, PARRISH CE, WILSON N (2015) A review of LiDAR radiometric processing: from ad hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration. *Sensors* 15: 28099–28128.
- KHOSRAVIPOUR A, SKIDMORE AK, WANG T, ISENBURG M, KHOSHESHAM K (2015) Effect of slope on treetop detection using a LiDAR canopy height model. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 104: 44–52.
- NÆSSET E (2005) Assessing sensor effects and effects of leaf-off and leaf-on canopy conditions on biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. *Remote Sens Environ* 98: 356–370.
- ORKA HO, NÆSSET E, BOLLANDSÅS OM (2010) Effects of different sensors and leaf-on and leaf-off canopy conditions on echo distributions and individual tree properties derived from airborne laser scanning. *Remote Sens Environ* 114: 1445–1461.
- SAYN-WITTGENSTEIN L (1978) Recognition of tree species on aerial photographs. Information report 118. Ottawa: Canadian forest service. 97 p.
- WARE C (2008) *Visual Thinking: for Design*. Burlington: Morgan Kaufmann. 197 p.
- WHITE JC, WULDER MA, VARHOLA A, VASTARANTA M, COOPS NC ET AL (2013) A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. Ottawa: Canadian forest service. 39 p.

## Luftgestützte LiDAR-Daten: Bedeutung der visuellen Interpretation für die Forstwirtschaft

Luftgestützte LiDAR-Daten eignen sich hervorragend für die Kartografie, das Studium sowie das Management von grossen Waldflächen. Produkte, die auf dieser Technologie basieren, werden immer häufiger genutzt, um eine Übersicht über den Waldzustand möglich zu machen. Weniger verbreitet sind solche Produkte für die Analyse kleiner Waldflächen, zum Beispiel in Form von detaillierten Plänen als Grundlage für Inventuren und Anzeichnungen. In diesem Kontext ist die direkte visuelle Interpretation von grossem Interesse, da sie sich viel einfacher realisieren lässt als eine, die auf automatischen Algorithmen beruht. Darüber hinaus ermöglicht die visuelle Interpretation eine schnelle und zuverlässige Identifikation von flächigen (z.B. Wald- und Bestandesgrenzen, Mischung), strukturellen (z.B. Schichtung) und punktuellen (z.B. Position und Höhe von Bäumen/Schäften) Merkmalen. Im Artikel werden drei wichtige Punkte beleuchtet, die die Genauigkeit der visuellen Interpretation bestimmen: die Eingangsdaten, die interaktive Darstellung und die Identifikation von Waldmerkmalen. Die Verwendung von thematischen Farbpaletten in Verbindung mit der interaktiven Visualisierung der 3-D-Punktwolken bzw. Querschnitte ermöglicht es, (für alle Schichten) eine detaillierte und genaue Karte einer Parzelle im Massstab eines einzelnen Baums zu erstellen.

## Airborne LiDAR data: relevance of visual interpretation for forestry

Airborne LiDAR surveys are particularly well adapted to map, study and manage large forest extents. Products derived from this technology are increasingly used by managers to establish a general diagnosis of the condition of forests. Less common is the use of these products to conduct detailed analyses on small areas; for example creating detailed reference maps like inventories or timber marking to support field operations. In this context, the use of direct visual interpretation is interesting, because it is much easier to implement than automatic algorithms and allows a quick and reliable identification of zonal (e.g. forest edge, deciduous/persistent ratio), structural (stratification) and point (e.g. tree/stem position and height) features. This article examines three important points which determine the relevance of visual interpretation: acquisition parameters, interactive representation and identification of forest characteristics. It is shown that the use of thematic color maps within interactive 3D point cloud and/or cross-sections makes it possible to establish (for all strata) detailed and accurate maps of a parcel at the individual tree scale.