



HAL
open science

Le scanner laser aéroporté en zone de montagne : localiser la ressource forestière et évaluer ses conditions de mobilisation

J.M. Monnet, N. Clouet, E. Mermin, F. Berger

► To cite this version:

J.M. Monnet, N. Clouet, E. Mermin, F. Berger. Le scanner laser aéroporté en zone de montagne : localiser la ressource forestière et évaluer ses conditions de mobilisation. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, 2011, Hiver 2011 (31), p. 49 - p. 54. hal-00600340

HAL Id: hal-00600340

<https://hal.science/hal-00600340>

Submitted on 14 Jun 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le scanner laser aéroporté en zone de montagne : localiser la ressource forestière et évaluer ses conditions de mobilisation

En zone de montagne, la gestion des peuplements forestiers est rendue difficile par les contraintes topographiques qui limitent les possibilités d'inventaire terrain et les opérations d'exploitation. Dans l'optique d'une mobilisation accrue des ressources forestières, la télédétection LiDAR représente une technique prometteuse pour cartographier les peuplements ainsi que leur accessibilité.

En zone de montagne, le relief accidenté engendre une variabilité très importante des facteurs affectant les espèces ligneuses : type de sol, disponibilité en eau, ensoleillement, mais également exposition à des stress externes comme les avalanches et les chutes de blocs rocheux. Cette variabilité des conditions de croissance se traduit par une forte hétérogénéité spatiale des massifs forestiers et rend difficile la délimitation de peuplements homogènes et l'estimation de leurs caractéristiques (surface terrière à l'hectare, densité de tiges, hauteur dominante, volume sur pied...). Les inventaires forestiers basés sur des méthodes statistiques (échantillonnage sur une grille régulière) fournissent des valeurs utilisables à l'échelle d'un massif mais peu pertinentes à l'échelle de travail concrète des gestionnaires forestiers qui planifient les opérations sylvicoles et d'exploitation. Les contraintes d'accessibilité et les difficultés de progression en terrain accidenté rendent impossible humainement et économiquement la densification de l'échantillonnage requise pour une description fine des peuplements. Ce manque d'in-

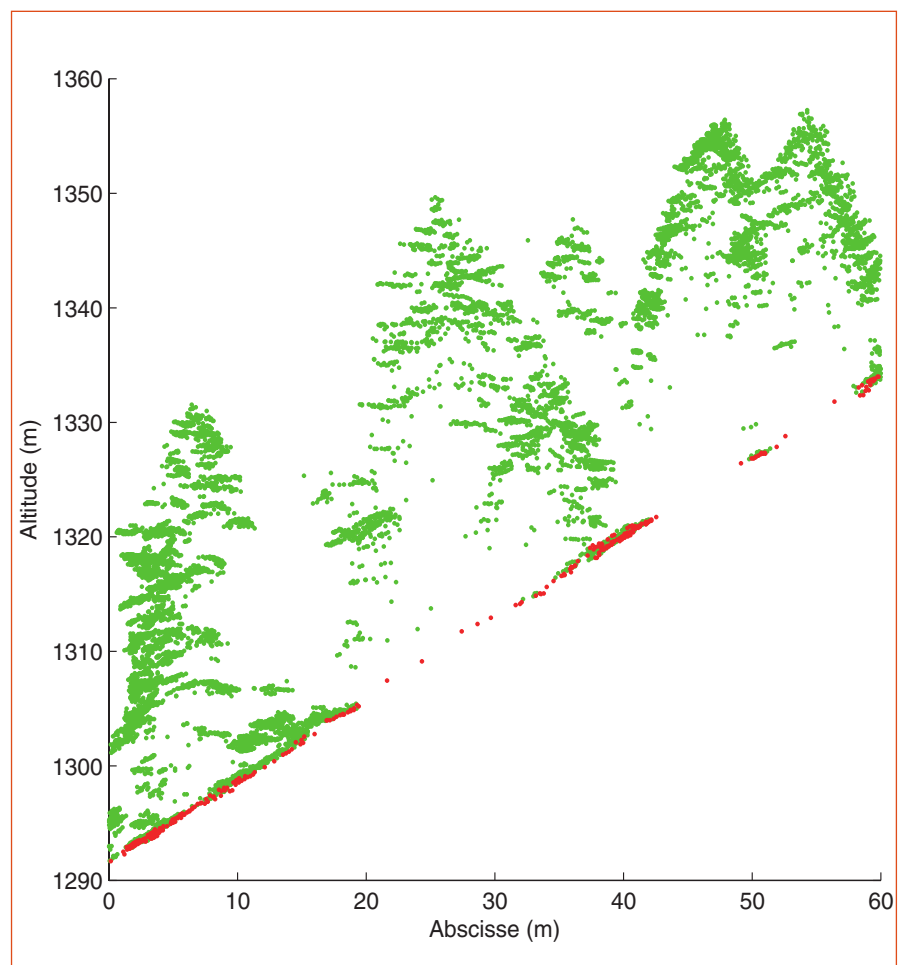


Fig. 1 : exemple de nuage de points LiDAR sur la forêt communale de Vaujany (transect dans le sens de la pente, épaisseur 4 m)
Les points classés « sol » et « sursol » sont représentés respectivement en rouge et en vert.

formation locale est d'autant plus handicapant que les objectifs de mobilisation accrue de bois supposent de s'intéresser à des zones aujourd'hui mal connues et souvent mal desservies.

Dans de telles zones, le réseau de desserte a un fort effet structurant. Il facilite la caractérisation des peuplements et rend possible leur exploitation. Cependant, le réseau de desserte en zone de montagne se caractérise par un coût de construction et d'entretien très élevé (respectivement 13 à 67 €/m et 0.5 à 1 €/m/an (ONF, 2008)). Il est donc nécessaire d'évaluer a priori l'opportunité de la construction de nouvelles infrastructures de voirie forestière ou les possibilités de recours à des modes d'exploitation alternatifs comme le débardage par câble. Cela suppose de disposer d'informations précises et localisées sur :

- les peuplements forestiers, pour déterminer les volumes sur pied disponibles ;
- le relief, pour évaluer la possibilité de construction d'une nouvelle infrastructure et la proportion des peuplements effectivement rendue accessible.

Le laser scanner (ou LiDAR, acronyme de Light Detection and Ranging) aéroporté est une technique de télédétection permettant de caractériser les éléments de la surface terrestre sous la forme d'un nuage de points géoréférencés correspondant aux objets ou aux parties d'objets de la surface qui ont intercepté les impulsions laser émises par un scanner embarqué dans l'aéronef (figure 1 page précédente). Les données peuvent être utilisées pour produire un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à haute résolution (de l'ordre du mètre) et pour caractériser le couvert forestier. Dans les pays scandinaves, où les peuplements sont moins complexes et le relief moins accidenté, cette technologie est uti-

lisée pour la gestion opérationnelle des peuplements forestiers depuis le début des années 2000 (Næsset, 2004). Au Cemagref de Grenoble, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de ce type de données dans un objectif de valorisation des forêts de montagne. Il s'agit de valider le potentiel des données laser pour l'estimation des caractéristiques des peuplements complexes de montagne et pour la cartographie de leur accessibilité.

Des données laser aux variables forestières

Deux principales approches peuvent être utilisées pour caractériser les peuplements forestiers à partir des données laser.

L'approche « arbre » consiste à reconstituer l'enveloppe de la canopée à partir du nuage de

points puis à détecter les arbres via leurs sommets. Si cette première méthode permet d'envisager une gestion forestière de précision à l'échelle de l'arbre, ce qui représente une plus-value importante dans l'optique d'une mobilisation forestière par des techniques alternatives (exploitation par câble par exemple), elle présente toutefois certaines limites. Elle fonctionne bien pour les peuplements où chaque houppier est facilement individualisable et présente un sommet dominant (plantation résineuse par exemple), mais est plus difficile à mettre en œuvre pour les peuplements feuillus et notamment le taillis. Elle requiert par ailleurs des données laser à forte densité (>5 points/m²), dont le coût d'acquisition est plus élevé que pour un levé LiDAR à faible densité (~1 point/m²).

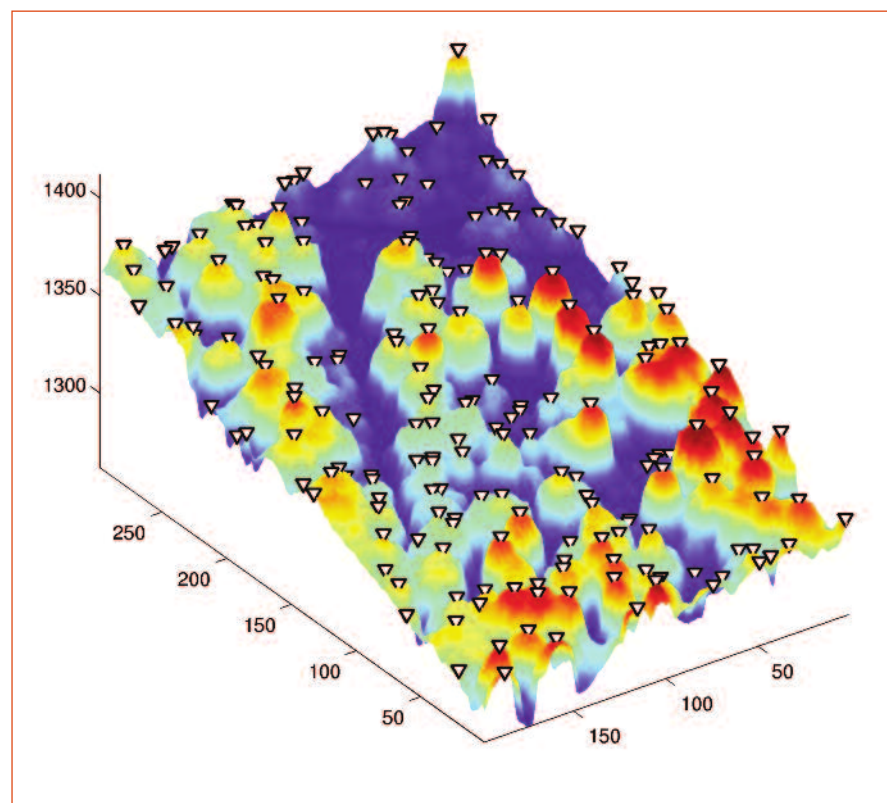


Fig. 2 : aperçu en perspective du MNS (reconstitution du couvert forestier à partir de données LiDAR), pour une zone de 100 m x 200 m en forêt communale de Vaujany

L'échelle de couleur correspond à la hauteur du couvert forestier (de bleu à rouge pour des hauteurs de 0 à 35 m), les triangles blancs sont les sommets d'arbres détectés.

L'approche « surfacique » consiste à établir des relations entre les statistiques locales du nuage de point (quantiles⁸ de hauteur, densité) et les variables forestières du peuplement (hauteur dominante, surface terrière et volume à l'hectare, nombre de tiges à l'hectare). Elle ne permet pas de fournir des informations à l'échelle de l'arbre, mais elle est aussi robuste, sinon plus, pour estimer les variables du peuplement forestier sur de grandes surfaces.

L'approche « arbre » : détection des sommets

Un algorithme de détection d'arbres a été développé avec le logiciel de calcul numérique Matlab (Clouet *et al.*, 2009). Tout d'abord le MNT est calculé à partir des points laser classés « sol ». Le Modèle Numérique de Surface (MNS), qui représente l'enveloppe supérieure du couvert forestier, est calculé en prenant en compte les points classés « sursol » les plus élevés sur un voisinage donné. Un filtrage est ap-

pliqué à l'image du MNS afin de combler les pixels pour lesquels l'information est manquante ou aberrante (bruit de mesure) et pour lisser les contours des houppiers (suppression des artefacts liés aux branches et irrégularités du feuillage). Enfin une recherche des maxima locaux par fenêtre glissante permet de sélectionner les positions possibles des sommets des arbres (figure 2). La hauteur d'un arbre est estimée en faisant la différence entre l'altitude d'un sommet et celle du point du MNT situé à la verticale.

Les résultats de détection obtenus par comparaison avec les mesures terrain sur deux placettes de référence sont présentés dans le tableau 1. L'essentiel du volume sur pied est correctement détecté, malgré un taux de détection global relativement faible. En effet les arbres manqués sont majoritairement les arbres dominés ainsi que quelques codominants. La précision de la

hauteur estimée par LiDAR est similaire à celle obtenue par les mesures sur le terrain. Sur la placette située en vallée de Chamonix, la hauteur est légèrement sous-estimée. Ce biais a été déjà identifié dans les études menées dans d'autres pays. Il est dû au fait que les impulsions laser n'interceptent pas forcément le sommet de l'arbre. Sur la placette de Vaujany, où les arbres sont souvent penchés vers l'aval, on constate par contre une surestimation de la plupart des hauteurs.

Cette méthode permet donc d'établir une cartographie des arbres et d'estimer leurs caractéristiques dendrométriques individuelles (diamètre, volume) en appliquant des fonctions « allométriques », c'est-à-dire reliant la hauteur d'un arbre à ces autres paramètres. Après import de ces informations dans un Système d'Information Géographique (SIG) il est possible de calculer les para-

Placette de référence	Forêt communale de Vaujany (38) Exposition Nord-Ouest, Altitude 1300 m, 0.7 ha	Forêt communale de Chamonix (74) Exposition Nord-Ouest, Altitude 1150 m, 0.25 ha
Arbres inventoriés	190 (Sapin 56 %, Hêtre 26 %, Erable sycomore 8 %, Epicéa 7 %...)	147 (Epicéa 90 %, Sapin 5 %, Mélèze 3 %...)
Résultat identification	61 arbres correctement détectés (32.1 %), 2 fausses détections	54 arbres correctement détectés (36.7 %) 1 fausse détection
Distribution des hauteurs sur la placette (bleu). En rouge les arbres correctement détectés.		
Hauteur estimée en fonction de la hauteur mesurée, pour les arbres correctement détectés		

Tab. 1 : résultats de la détection d'arbres (méthode « détection des sommets ») sur les deux placettes de référence
Le trait rouge est la droite Y = X.

* Valeurs prises à des intervalles réguliers d'une fonction de distribution cumulée d'une variable. En pratique il s'agit d'abord de classer les individus de la population étudiée (ici des points LiDAR appartenant à une placette) par ordre croissant selon la variable mesurée (ici, la hauteur), puis à les répartir en sous-ensemble d'effectifs égaux. Ainsi lors d'une analyse en 4 quantiles (ou « quartiles »), le 1^{er} quartile regroupe les 25% d'individus les plus « petits ».

mètres de peuplement (surface terrière et volume à l'hectare, hauteur dominante) pour des zones prédéterminées ou selon un maillage régulier, afin d'obtenir une information plus synthétique à l'échelle d'un massif. Cependant les données obtenues sur de grandes zones doivent être considérées avec précaution dans la mesure où la méthodologie se base actuellement sur un nombre limité de placettes servant à calibrer les algorithmes de reconnaissance et les fonctions allométriques. La fiabilité des estimations obtenues sur des peuplements très différents de ceux des placettes de référence reste à évaluer.

L'approche « surfacique » : estimation directe de paramètres du peuplement

La méthode « surfacique » est actuellement utilisée par des gestionnaires forestiers scandinaves pour caractériser des forêts de production assez homogènes. Les essais menés sur des peuplements plus complexes sont encore rares. Nous l'avons testée sur un versant boisé (environ 4 km²) situé sur la commune de Saint Paul de Varces (Isère) (Monnet et al., 2010) ; 30 placettes de rayon 10 m ont été inventoriées sur le terrain pour calibrer les régressions multiples entre les paramètres du peuplement et les statistiques locales des données laser (variables liées à la distribution locale de la hauteur des points). Les modèles obtenus sont présentés dans le tableau 2. La précision des estimations est inférieure à 20 % pour le diamètre moyen, la hauteur dominante et la surface terrière à l'hectare, ce qui est satisfaisant dans le cas de massifs forestiers très hétérogènes. Ces relations permettent ensuite d'estimer la valeur des variables du peuplement sur des zones prédéterminées ou selon un maillage dont la taille doit être du même ordre de grandeur ou supérieure à celle des placettes utilisées pour la calibration. Les recherches menées dans d'autres configura-

tions forestières montrent que la précision des estimations est légèrement améliorée lorsque des relations spécifiques sont établies pour chaque grand type de peuplement.

Cartographier l'exploitabilité des peuplements

La caractérisation des peuplements donne une représentation spatialisée de la ressource, encore faut-il qu'elle soit réellement mobilisable. Pour connaître l'accessibilité globale rendue possible par le réseau de desserte existant, le Cemagref de Grenoble et l'ONF ont mis en place le modèle CARTUVI, qui modélise les surfaces forestières débordables par tracteur forestier, en fonction de la voirie et des pentes

du terrain (Clouet et Berger, 2009). Le modèle intègre le débusquage et le débardage pour réaliser les cartes d'accessibilité.

Le débusquage consiste à sortir les bois de la parcelle : le tracteur, posté sur la voie de vidange, treuille les bois abattus pour les ramener contre son tablier. En montagne, la largeur de la zone de treuillage de part et d'autre de la voie est généralement de 50 m à l'amont et de 150 m à l'aval, mais cette limite ne concerne pas les zones peu pentues où le tracteur peut pénétrer dans les peuplements. Pour représenter cela, les MNT sont utilisés pour réaliser des calculs de pente et délimiter les zones accessibles au tracteur ne dépassant pas 25 % de

Variable	Relation	R2	Précision**(%)
Hauteur dominante (m)	$2,03 \times h_{s0}^{-0,86} \times h_{d0,5}^{1,65}$	0.74	17.6
Diamètre (cm)	$1,97 \times h_{p0}^{-1,88} \times h_{p0,75}^{-0,49} \times h_{pmoy}^{3,09}$	0.69	13.3
Surface terrière (m ² .ha ⁻¹)	$20,5 \times h_{p0,25}^{6,06} \times h_{d0}^{2,24} \times h_{pmoy}^{-4,26} \times h_{dmoy}^{-3,85}$	0.80	18.9
Densité (ha ⁻¹)	$49020 \times h_{s0,25}^{1,30} \times h_{d0,75}^{-2,32}$	0.43	29.2

Tab. 2 : relations entre les paramètres forestiers et les données LiDAR (méthode « surfacique »)

La première lettre de l'indice indique s'il s'agit du groupe des premiers (p), derniers (d) ou échos seuls (s). La suite de l'indice indique la statistique de hauteur utilisée : minimum (0), premier quartile* (0.25), médiane (0.5), dernier quartile (0.75), maximum (1) ou moyenne (moy).

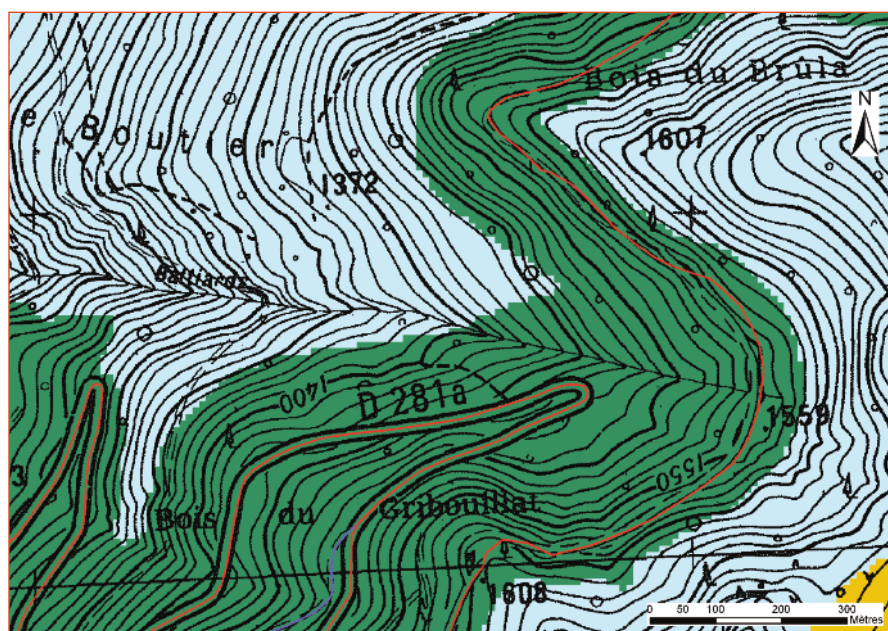


Fig. 3: zones tampons (buffers) asymétriques, correspondant à la distance maximale de treuillage à partir des routes, en fonction de la pente et de la position en amont (ici à droite) ou en aval de la route

** Rapport entre la racine de l'erreur quadratique moyenne et la moyenne des valeurs

Vers un outil d'aide à la décision pour le gestionnaire forestier

Une cartographie à forte valeur ajoutée

Le traitement des données de scanner laser aéroporté rend possible la production d'une cartographie quantitative des variables forestières là où les inventaires statistiques et la photo-interprétation n'apportaient qu'une cartographie qualitative et des données quantitatives non localisées. La valeur ajoutée de ces données est d'autant plus importante qu'elles peuvent être importées dans un SIG et croisées avec la couche de l'accessibilité des peuplements (figure 5 page suivante). À l'échelle d'un massif, le gestionnaire forestier pourra évaluer l'efficacité du réseau de desserte existant et optimiser les nouveaux aménagements.

Par ailleurs, le développement du débardage par câble, qui permet de valoriser des zones inaccessibles au tracteur forestier, est actuellement considérablement freiné par les difficultés de prospection. En effet, les conditions nécessaires à l'implantation économiquement viable d'une ligne de câble sont difficiles à réunir. Un volume de bois important doit être accessible sur une bande d'environ 40 m de largeur et longue de plusieurs centaines de mètres. Plusieurs parcelles, appartenant éventuellement à des propriétaires différents, seront concernées en partie ou en totalité, d'où la difficulté d'évaluer à partir des données d'aménagement le volume potentiellement récoltable. D'autre part, la qualité des informations sur le relief tirées des cartes Scan25 ne permet pas d'évaluer avec précision les possibilités et les coûts d'installation d'une ligne de câble. La cartographie des volumes disponibles issue de l'analyse de données LiDAR facilite le tracé de lignes potentielles de câble. À partir du MNT à haute précision, il est possible d'extraire pour

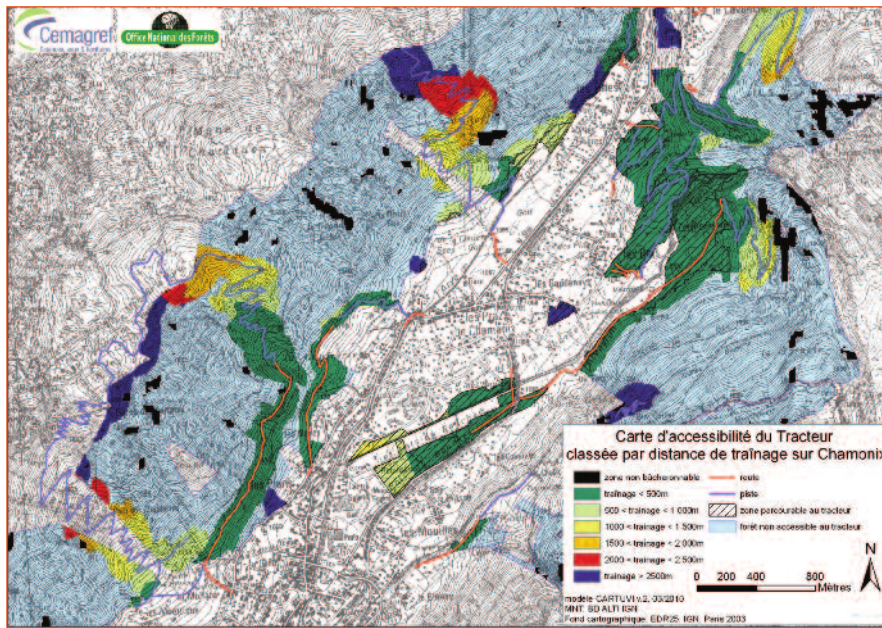


Fig. 4 : carte d'accessibilité du tracteur forestier sur la commune de Chamonix (74)

pente. Les largeurs amont et aval s'ajustent en permanence en fonction de la pente et sont finalement cartographiées sous la forme de zones tampons (« buffers ») asymétriques (figure 3). Le débardage consiste ensuite à traîner les bois (jusqu'à 10 m³ par rotation) jusqu'à la place de dépôt accessible au grumier la plus proche. La distance de traînage est une composante importante du coût global d'une exploitation : au-delà de 1 500 m, le surcoût est non négligeable. Ici, le modèle calcule les distances que le tracteur doit parcourir entre tout point accessible et la route la plus proche et crée des classes d'amplitude 500 m (figure 4).

Jusqu'à présent, les MNT utilisés proviennent de l'Institut Géographique National et sont au pas de 25 ou 50 m de résolution en X, Y (la BD Topo® ou la BD Alti® respectivement). Ces résolutions ne rendent pas compte des micro-variations topographiques, mais permettent, pour de vastes surfaces, d'obtenir rapidement une estimation de l'efficacité de la desserte grâce à la cartographie des surfaces accessibles au tracteur par classe de traînage. Cette analyse permet

d'améliorer la connaissance de l'accessibilité d'une forêt par rapport aux indicateurs synthétiques qu'on utilise actuellement comme la densité de pistes aux 100 ha. Ainsi, pour deux massifs ayant la même densité de pistes à tracteur, CARTUVI peut mettre en évidence que l'un sera beaucoup mieux desservi que l'autre du fait de la moindre redondance fonctionnelle de certaines pistes trop proches les unes des autres ou des moindres longueurs de traînage moyennes.

Il reste qu'une surface accessible importante n'induit pas forcément un volume mobilisable conséquent. La technologie LiDAR ouvre des perspectives intéressantes, car elle apporte à elle seule deux informations précieuses pour le modèle CARTUVI : les données dendrométriques spatialisées issues de l'analyse du nuage de points et le MNT au pas de 1 mètre qui retranscrit fidèlement la réalité du terrain. Les résultats cartographiques peuvent être affinés et croisés avec les estimations volumétriques calculées d'après les données LiDAR, pour obtenir une carte de l'accessibilité et du volume mobilisable associé, réparti par classe de traînage.

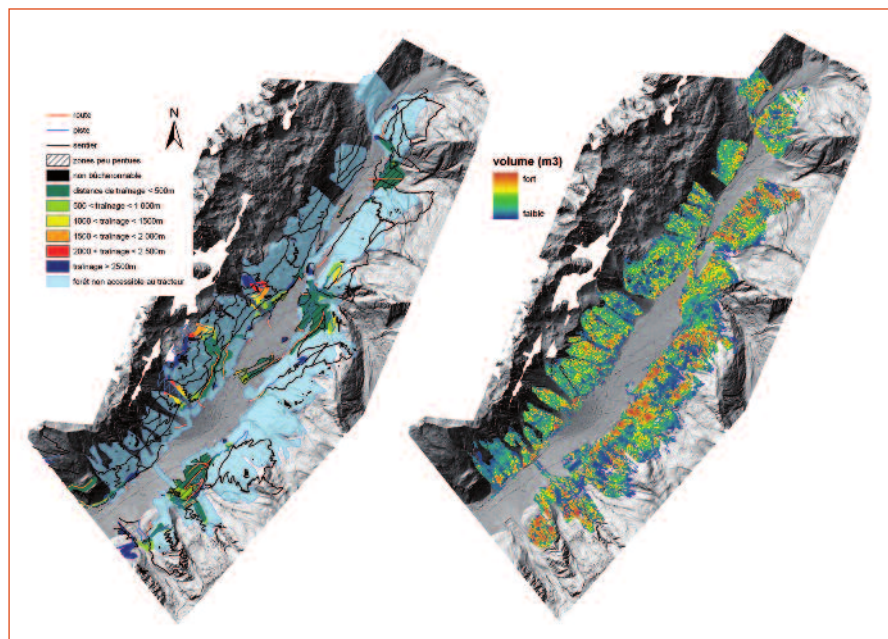


Fig. 5 : cartographie préliminaire de l'accessibilité et de la répartition indicative des volumes sur la vallée de Chamonix

L'analyse croisée des deux couches d'information permet d'estimer les volumes mobilisables par classe d'accessibilité et de hiérarchiser les investissements en desserte forestière. NB : l'édition d'une carte quantitative et validée nécessite des placettes de référence supplémentaires.

chaque ligne de câble envisagée le profil du terrain pour évaluer la faisabilité et le coût de l'implantation.

Quelles perspectives opérationnelles pour l'utilisation de données LiDAR en montagne ?

Si les premiers développements méthodologiques et tests réalisés à l'échelle du massif forestier sont prometteurs, un important travail est encore nécessaire avant d'envisager le déploiement opérationnel de cette technologie. La complexité des forêts de montagne, mais également la diversité des matériels et des spécifications d'acquisition LiDAR sont tels qu'il sera difficile d'automatiser totalement la procédure de traitement. L'enjeu de futurs travaux de recherche est de déterminer quel est le compromis optimal entre l'effort de terrain requis pour calibrer les modèles et le niveau de précision attendue des estimations. Cette analyse doit mettre en balance la valeur ajoutée des informations spatialisées et l'investissement matériel et humain que représentent l'acquisition

LiDAR et les relevés des placettes de calibration. L'effort de développement méthodologique devra également porter sur les possibilités d'automatisation du positionnement des lignes de coupe à câble puis d'intégration de ce module au logiciel de cartographie des unités de vidange. L'objectif serait de disposer d'un outil permettant de tirer profit des complémentarités de ces deux modes de débardage dans une perspective d'aménagement et de valorisation à long terme des massifs forestiers de montagne.

À ce stade, il nous paraît essentiel d'associer et d'organiser les utilisateurs futurs de ces données (agents, techniciens, aménagistes) pour définir les différents éléments d'une chaîne de traitement et le type d'information produite. Les estimations tirées de données de scanner laser aéroporté seront d'autant plus précises qu'elles intégreront des informations de terrain (placettes de calibration, relations hauteur/diamètre et tarifs de cubage, descriptions qualitatives

comme les types de peuplement). Il s'agit de tirer profit des synergies entre les données de télédétection et le savoir-faire de terrain pour fournir au gestionnaire forestier des informations plus précises et des outils plus performants.

Jean-Matthieu MONNET
Nicolas CLOUET
Éric MERMIN
Frédéric BERGER

UR Ecosystèmes Montagnards
Cemagref Grenoble

Bibliographie

Clouet N., Berger F., 2009. Modélisation des surfaces débardables au tracteur forestier en zone de montagne. *Géomatique expert*, n°70, pp. 75 – 79

Clouet N., Monnet J.M., Berger, F., 2009. Estimation du volume de bois exploitable en montagne par scanner laser aéroporté (LiDAR). *Géomatique expert*, n°70, pp. 32 – 37

Monnet J.M., Mermin E., Chanussot J., Berger F., 2010. Using airborne laser scanning to assess forest protection function against rockfall. *Proceedings of the Interpraevent 2010 International Symposium in Pacific Rim, Taipei, Taiwan 26-30 april*. pp. 586-594.

Næsset E., 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 19 n° 2, pp. 164 – 179

ONF, 2008. Guide méthodologique en vue d'une automatisation spatialisée des coûts de mobilisation des bois. Application au site classé de la Grande Chartreuse. Rapport technique Office National des Forêts, AgroParisTech Engref