

La télédétection aéroportée pour la gestion des territoires forestiers de montagne

Le Programme national de la forêt et du bois 2016-2026 affiche comme objectif « d'augmenter les prélèvements de bois en France tout en assurant le renouvellement de la forêt ». Les forêts de montagne qui représentent environ un quart de la surface forestière pourraient contribuer de manière significative à cet objectif. Les contraintes d'accès et de topographie rendent cependant difficile la gestion de ces forêts. En s'appuyant sur la technologie Lidar aéroporté, il est désormais possible de cartographier à haute résolution, sur des territoires de la taille d'un parc naturel régional, les caractéristiques forestières (ressource, accessibilité) intéressant les gestionnaires. La généralisation de l'outil pose cependant des questions de coût d'acquisition des données et de droit de leur diffusion auprès des acteurs de la filière.

Les territoires forestiers de montagne

Des forêts aux multiples fonctions

En France métropolitaine, les forêts de montagne représentent un quart de la surface forestière. Dans ces zones d'altitude supérieure à 600 m, le taux de boisement est largement supérieur à la moyenne nationale et les forêts sont à la fois un élément majeur du paysage et une ressource importante pour les habitants de ces territoires. Elles fournissent en effet un grand nombre de services écosystémiques : production de bois, protection contre les aléas naturels, régulation de la ressource en eau potable, espace de loisirs et de biodiversité ; que ce soit aux populations locales ou aux villes et vallées environnantes. Elles contribuent ainsi à l'attractivité des territoires et au maintien d'activités économiques en milieu rural.

Du fait de la topographie et des fortes variations d'altitude, ces forêts sont caractérisées par une forte hétérogénéité spatiale (photo 1) : diversité des essences et des structures. Comme elles sont difficiles d'accès à cause de la pente et d'un réseau de desserte souvent peu dense, les opérations d'inventaire et de sylviculture y sont plus coûteuses et moins fréquentes.

Une ressource sur pied à fort potentiel

Les forêts de montagne sont également caractérisées par un capital sur pied plus important qu'en plaine, avec un volume moyen de bois de 188 m³/ha contre 148 m³/ha, pour les forêts de production. La part de résineux y est également plus élevée qu'à basse altitude. Le volume de bois en forêts de montagne est de 745 millions de m³, ce qui représente 31 % du total en France (Inventaire forestier national).

Le Programme national de la forêt et du bois (PNFB) 2016-2026 affiche comme premier objectif « d'augmenter les prélèvements de bois en France tout en assurant le renouvellement de la forêt », objectif chiffré à la hauteur de 12 millions de mètres cubes de bois mobilisé supplémentaire d'ici 2026.

De par la capitalisation importante, associée à une production annuelle en volume comparable aux forêts de plaine, les forêts de montagne pourraient donc contribuer de manière significative à la réalisation de cet objectif.

Cependant, plusieurs points doivent être améliorés pour permettre la mise en œuvre opérationnelle de cet objectif :

- la connaissance précise des zones présentant un potentiel de récolte à moyen terme ;

❶ Les couleurs automnales mettent en évidence la diversité d'essences dans ce paysage du massif des Bauges. Les fortes pentes et les barres rocheuses rendent les forêts peu accessibles.



© Vincent (Adobe Stock)

- l'optimisation du réseau de desserte et des opérations de mobilisation ;
- la dynamisation de la gestion sylvicole, notamment dans les propriétés privées, qui sont plus morcelées qu'en plaine.

Par ailleurs, cette augmentation de la récolte doit être compatible avec le maintien des autres services écosystémiques fournis par la forêt, et prendre en compte les effets du changement climatique, comme rappelé dans les objectifs du PNFB.

L'apport des nouvelles technologies

Afin de mettre en œuvre des politiques forestières adaptées à l'échelle du territoire, il est donc nécessaire d'avoir des connaissances précises, à la fois quantitativement et spatialement, sur l'état des forêts et sur les services qu'elles procurent.

❶ LE PROJET PROTEST

Protest (PROspective TErritoriale SpaTialisée) est un projet de recherche appliquée financé par l'ADEME (programme GRAINE, convention C1703C0069). Il vise à construire une méthodologie d'analyse territoriale de la biomasse forestière en s'appuyant sur les avancées méthodologiques et scientifiques récentes dans les domaines de la cartographie forestière par télédétection Lidar, de la modélisation technico-économique sous système d'information géographique, de la simulation d'évolution forestière et de la prospective territoriale. Le territoire d'étude est le Parc naturel régional du Massif des Bauges. Le projet associe cinq partenaires pour une durée de trois ans (2018-2020).
<https://protest.inrae.fr/>



Alors qu'il n'est ni techniquement ni économiquement possible d'obtenir de telles données uniquement par des moyens humains sur le terrain, le développement rapide des technologies de télédétection et de traitement des données a fait émerger de nouvelles opportunités pour améliorer les connaissances sur les forêts à l'échelle d'un territoire.

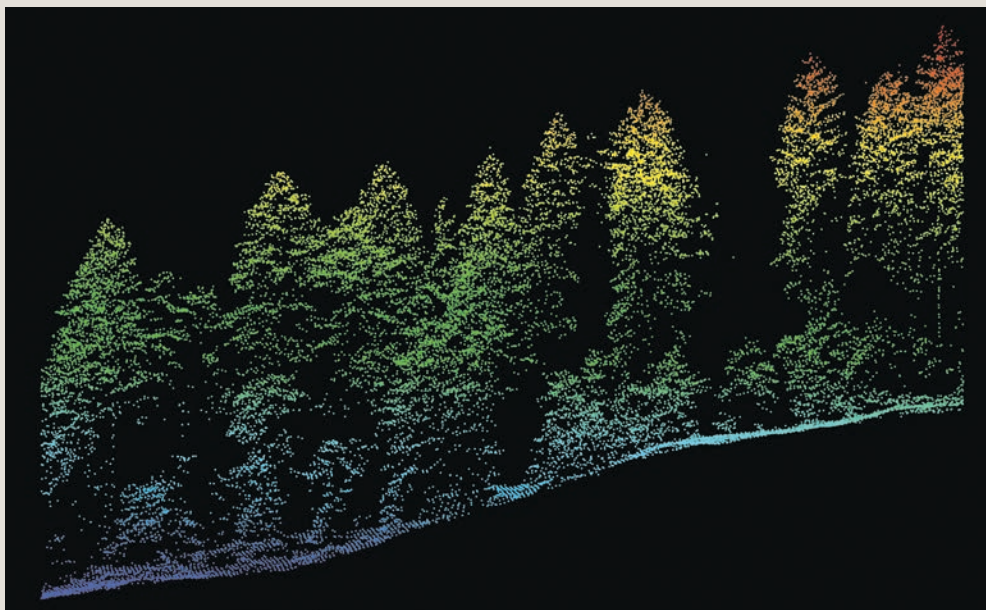
Parmi ces technologies de télédétection, le scanner laser aéroporté, ou Lidar aérien, a connu un essor rapide ces dernières années, initié dans les pays forestiers du nord. En France, des projets pilotes ont démontré l'intérêt de ces techniques depuis une dizaine d'années, tout d'abord sur des surfaces réduites (Munoz *et al.*, 2016), puis à l'échelle de territoires plus importants. Un projet pilote est actuellement en cours sur le territoire du Parc naturel régional (PNR) du Massif des Bauges (encadré ❶).

Le Lidar aéroporté : modéliser les forêts en trois dimensions

Télémétrie laser depuis le ciel

Le Lidar est une technologie de télédétection basée sur l'émission et la réception d'impulsions laser. Au cours de la progression de l'avion, l'appareil scanne latéralement la surface terrestre en envoyant des impulsions à très haute fréquence (plusieurs centaines de milliers par seconde). Pour chaque impulsion le capteur enregistre le temps écoulé entre le moment où il émet une impulsion et celui où il reçoit le signal réfléchi par un objet se trouvant dans la trajectoire de l'impulsion. On en déduit la distance entre l'objet et l'avion, puis, connaissant la trajectoire de l'avion enregistrée par GPS, la position de l'objet dans l'espace.

- ❶ Coupe transversale d'un nuage de points Lidar acquis en zone forestière. Avec une acquisition à haute densité, on distingue les branches des arbres dominants, les arbres de sous-étage ainsi que le sol (image : J.-M. Monnet, INRAE).



Pour modéliser la géométrie 3D de la surface terrestre

Cette technique permet donc de représenter les objets se trouvant à la surface de la Terre sous la forme d'un nuage de points en trois dimensions. Comme les impulsions laser éclairent une surface au sol d'un diamètre de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, il est possible qu'une partie de la lumière laser vienne se réfléchir sur des objets situés à l'intérieur du couvert forestier, voire au sol. Le nuage de points contient donc une information géométrique sur la hauteur du couvert végétal, mais également sur sa structure interne et sur la position du sol (figure ❶).

À partir de ce nuage de points tridimensionnel, sont habituellement calculés des modèles numériques d'élévation (MNE) synthétisant l'information en deux dimensions. La première est le modèle numérique de terrain (MNT), qui décrit l'altitude du sol nu. La seconde est le modèle numérique de surface (MNS), qui décrit l'altitude des éléments les plus hauts de la surface terrestre (haut de la canopée, toits des bâtiments). En soustrayant le MNT au MNS est obtenu le modèle numérique de hauteur (MNH), qui permet de s'affranchir de la topographie et donne directement la hauteur des objets par rapport au sol.

En France, une disponibilité des données encore hétérogène

Il n'existe pas véritablement de politique d'acquisition de données Lidar à l'échelle nationale. La première utilisation de ces données reste le MNT, qui est un élément important de la description du territoire pour les projets d'aménagement. L'IGN¹ s'est doté de capteurs qui ont été utilisés en priorité sur les zones littorales et inondables. Des partenariats sont effectués avec les collectivités territoriales et permettent de couvrir progressivement le territoire français. Les données MNT alimentent

le RGE ALTI^{®2}, et une réflexion est en cours pour mettre également à disposition le nuage de points, qui est le produit de base pour les applications forestières. Pour les projets forestiers, l'acquisition sur mesure ou la mise à disposition de données doit donc être réalisée au cas par cas.

Dans le cas du PNR du Massif des Bauges, qui se situe sur les départements de Savoie et Haute-Savoie, la partie savoyarde était couverte par un vol assuré par l'IGN en partenariat avec la Régie de gestion de données 73-74. Sur la partie haut-savoyarde, une acquisition a été commandée à un prestataire. Sur des territoires étendus, l'absence de données récentes et homogènes peut être problématique pour les analyses forestières.

Du nuage de points à la cartographie des forêts

Modéliser les caractéristiques des forêts à partir du nuage de points en 3D

Le MNH, qui est un produit directement dérivé d'une acquisition Lidar, est déjà très utile pour situer sur une carte les peuplements où les arbres sont les plus grands. Cependant, pour extraire des informations forestières nécessaires à l'inventaire des peuplements et à la planification des opérations de gestion, des étapes de modélisation sont effectuées. Les informations que l'on cherche à cartographier sont notamment :

- le diamètre quadratique moyen : lié à la taille des arbres, il renseigne sur la maturité du peuplement pour la récolte ;

1. Institut national de l'information géographique et forestière.

2. Le RGE ALTI[®] décrit la forme et l'altitude normale de la surface du sol à grande échelle.

- la surface terrière : somme des surfaces des sections des troncs s'ils étaient coupés à 1,3 m de haut, elle renseigne le forestier sur la quantité de bois présent sur une surface ;
- la densité de tiges : nombre d'arbres rapporté à une surface de référence ;
- le pourcentage de feuillus : indique si l'on est en présence d'espèces feuillues ou résineuses.

L'estimation de ces paramètres est basée sur une modélisation statistique qui met en relation :

- la forêt telle qu'elle est mesurée par le forestier, *via* le relevé des paramètres ci-dessus, effectué sur le terrain dans des placettes circulaires (surfaces de forêt de l'ordre de 700 m²) tirées au sort dans le territoire ;
- la forêt telle qu'elle est vue par le capteur Lidar, *via* des descripteurs géométriques du nuage de points en 3D, extraits à l'emplacement exact des placettes de terrain, dont la position est connue par GPS.

Avec un réseau de placettes mesurées sur le terrain

Selon la superficie du territoire et l'hétérogénéité des peuplements forestiers, il est donc nécessaire de relever sur le terrain de l'ordre d'une centaine de placettes qui servent pour la calibration des relations statistiques. Ces placettes, si elles sont échantillonnées de manière appropriée, peuvent également servir à décrire statistiquement les forêts présentes sur le territoire. Sur le territoire du PNR du Massif des Bauges, 400 placettes d'inventaire ont été réparties systématiquement et inventoriées avec pour objectifs :

- de servir à la calibration des modèles Lidar ;
- de constituer l'état initial d'un observatoire permanent des forêts du PNR.

L'inventaire de ces placettes a été précédé d'une phase de concertation et d'information afin de définir le cadre

réglementaire de réalisation des mesures et d'obtenir l'accord des propriétaires dont les parcelles contiennent une placette tirée au sort. Si elles décrivent statistiquement l'ensemble des forêts du massif, les informations récoltées ne permettent pas à elles seules de cartographier comment se répartissent les forêts et leurs caractéristiques.

Pour cartographier les forêts sur l'ensemble du territoire

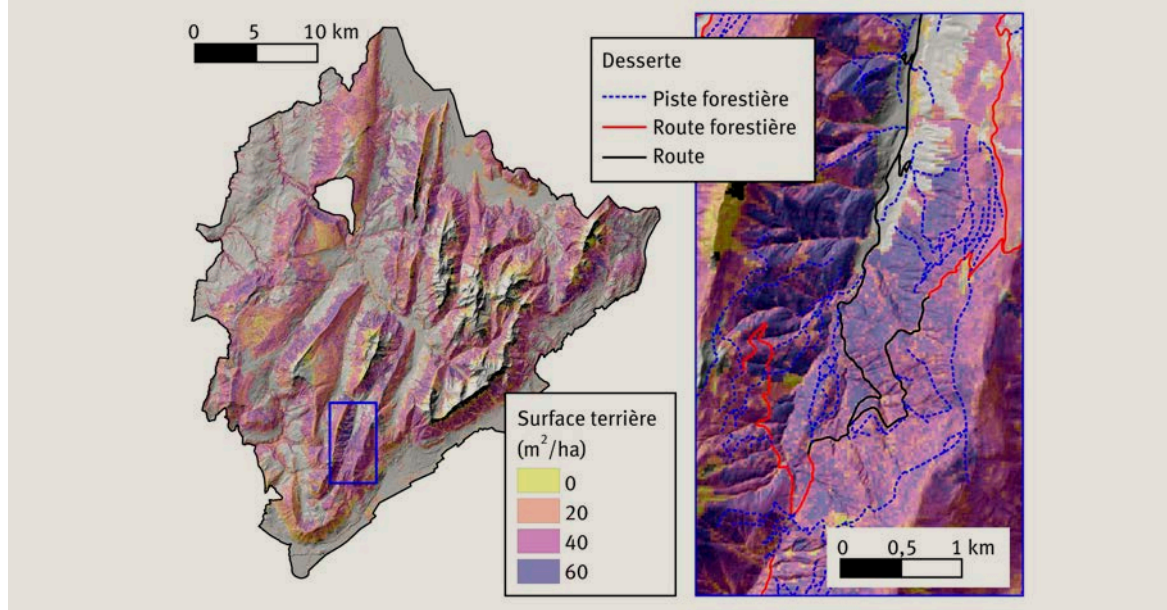
C'est ici qu'intervient la complémentarité entre les relevés de terrain, qui mesurent directement l'information voulue mais sur une partie seulement du territoire (les placettes) et les données Lidar, qui mesurent indirectement cette information *via* le nuage de points en 3D. La relation établie entre les paramètres forestiers et le nuage de points en 3D grâce aux placettes, permet de cartographier les caractéristiques des forêts sur tout le territoire (White *et al.*, 2014). Les cartes obtenues (figure 2) ont une résolution spatiale de l'ordre de 25 m, et une précision similaire à celle obtenue par mesure sur le terrain. Cette description très précise et exhaustive des forêts sur l'ensemble du territoire, est utile à la fois pour définir une politique forestière sur le territoire et pour la planification des opérations de gestion.

Du modèle numérique de terrain à la cartographie de l'accessibilité

Le débardage des bois en montagne

L'accessibilité des peuplements est l'un des points critiques pour la mobilisation de la ressource forestière en montagne. Une fois abattus, les bois doivent être amenés sur des places de dépôts en bordure de routes accessibles aux camions. Pour cela, ils sont le plus souvent traînés par des tracteurs forestiers. Ces engins peuvent circuler en forêt lorsque la pente n'est pas trop importante, sinon

2 Cartographie par modélisation Lidar de la surface terrière sur le Parc naturel régional. L'information est exhaustive sur le territoire avec une résolution de 25 m, ce qui permet d'identifier précisément les zones avec un fort capital sur pied et leur proximité à la desserte (carte : J.-M. Monnet, INRAE).



ils roulent sur des pistes forestières à partir desquelles ils peuvent treuiller les bois se trouvant à proximité. Une alternative largement mise en œuvre dans d'autres pays alpins est l'utilisation du transport par câble, qui consiste en l'installation de téléphériques temporaires pour treuiller les bois de part et d'autre du câble et ensuite les amener au point de dépôt.

L'effet structurant de la desserte

Que ce soit pour le câble ou le tracteur, l'accessibilité des forêts reste structurée par le réseau de routes forestières, dont le coût de construction est important et le plus souvent supporté par des subventions publiques. Le MNT tiré des données Lidar présente un fort intérêt pour évaluer l'accessibilité d'un massif forestier et optimiser la pertinence de nouveaux tracés de routes forestières (Munoz *et al.*, 2013). Le logiciel Sylvaccess développé au centre INRAE³ de Grenoble et en collaboration avec l'ONF⁴ simule les capacités techniques de circulation du tracteur et d'installation du transport par câble, à partir de l'information géographique sur la desserte existante et sur la topographie (MNT) (Dupire *et al.*, 2015). La capacité de la technologie Lidar à modéliser le sol même sous couvert forestier est capitale pour obtenir un rendu précis de la topographie et simuler correctement les possibilités des différents matériels. Le résultat de modélisation de l'accessibilité se présente sous la forme de cartes présentant la surface accessible aux engins et les caractéristiques techniques associées (distance de treuillage et de traînage pour le tracteur, schéma d'implantation pour le transport par câble) (figure 3). L'évaluation globale de l'efficacité du réseau se fait en calculant des indices tels que la surface de forêt ou le volume de bois accessible par linéaire de desserte existante. L'analyse cartographique est d'autant plus riche lorsque l'accessibilité peut être croisée avec les caractéristiques du peuplement

obtenues précédemment. Il est possible alors d'identifier des zones à fort capital nécessitant de nouvelles infrastructures pour la mobilisation, ou des zones à fort capital déjà desservies pour lesquelles d'autres freins à la mobilisation doivent être levés.

Des caractéristiques de la forêt aux services écosystémiques

De nombreux travaux ont été menés pour évaluer différents services écosystémiques à l'échelle d'un peuplement forestier, intégrant quelquefois la question des compromis de gestion à effectuer pour assurer simultanément la fourniture de plusieurs services. À l'échelle d'un territoire de la taille d'un PNR, la question du maintien d'un ensemble de services pose la question des échelles spatiale et temporelle à adopter pour évaluer les compromis. L'information forestière dérivée des données Lidar, exhaustive sur le territoire, offre en outre des perspectives intéressantes pour l'évaluation de certains services écosystémiques.

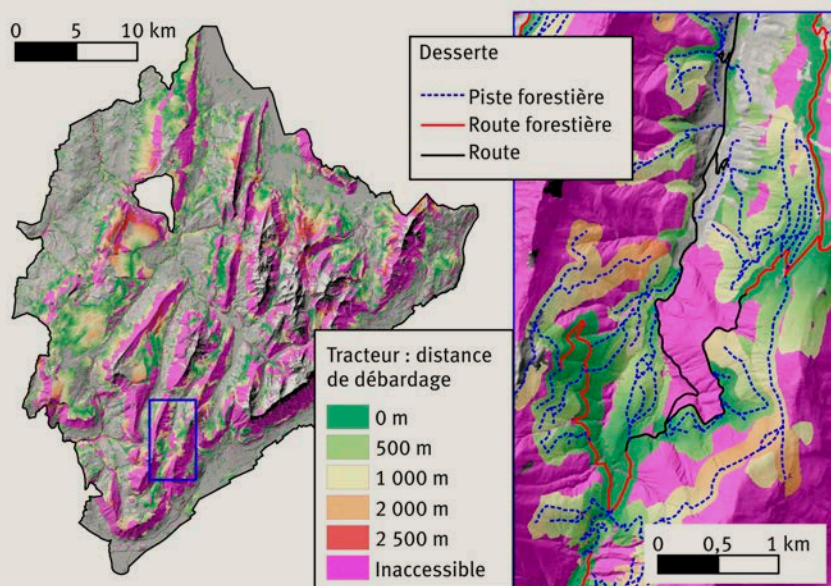
Protection contre les aléas naturels

Des modèles permettent d'identifier les zones de départ de chute de blocs rocheux et d'avalanches, puis de simuler leur propagation sur un versant. En croisant ces informations avec la carte des enjeux (habitat, zones d'activités et infrastructures de transport) et les caractéristiques des forêts, il est possible d'identifier les forêts qui jouent un rôle de stabilisation du manteau neigeux ou de pare-pierre naturel. La gestion forestière doit y être adaptée pour maintenir dans le temps et dans l'espace les capacités de protection de la forêt.

3. Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, qui rassemble depuis 2020, les ex-organismes Inra et Irstea.

4. Office national des forêts.

3 Cartographie avec Sylvaccess de l'accessibilité au tracteur forestier sur le Parc naturel régional. L'accessibilité est fortement structurée par les routes et pistes, et une grande partie du massif reste inaccessible (carte : J.-M. Monnet, INRAE).



Biodiversité : trame de vieux bois et habitats forestiers

Les données Lidar permettent de cartographier certains habitats forestiers favorables à la biodiversité, tels que les forêts matures présentant des arbres de fort diamètre ou des arbres morts et sénescents. Il est possible de modéliser également la capacité des forêts à accueillir certaines espèces. Ces informations servent à cibler les forêts présentant un enjeu de conservation ainsi que les zones à gérer de manière à obtenir une trame d'habitats favorable à la biodiversité à l'échelle du territoire.

Production de bois : comment dynamiser la gestion ?

Même si les conditions techniques et économiques sont favorables à l'exploitation d'une forêt, seul le propriétaire peut déclencher des opérations de gestion. Cela suppose qu'il soit conscient de son statut de propriétaire, qu'il soit informé de l'état de sa forêt et de son potentiel, qu'il ait l'envie ou le besoin de la gérer et qu'il soit conseillé pour le faire. Si en forêt publique (État, communes), la taille des propriétés permet d'envisager une gestion et une planification forestière, en forêt privée de montagne, le parcellaire forestier est extrêmement morcelé. Sur le massif des Bauges, la taille moyenne d'une propriété n'est par exemple que de 1,5 ha, répartis en plusieurs parcelles. Sachant qu'une propriété peut avoir plusieurs propriétaires, qui le plus souvent n'habitent pas à proximité, la mobilisation des bois dans les forêts privées nécessite un travail considérable de communication et d'information. Si les cartographies obtenues par Lidar permettent de cibler les zones à enjeux et offrent un support pour sensibiliser les propriétaires, elles ne peuvent pas se substituer à un travail d'animation et de formation.

Vers la généralisation des cartographies Lidar ?

Une technique performante et ses alternatives

Le Lidar est probablement la technique de télédétection la plus performante pour la cartographie des forêts à l'échelle du massif (surface de l'ordre de 100 km²). En zone de montagne, l'acquisition de ces données se justifie ne serait-ce que pour l'obtention d'un MNT précis permettant d'identifier les zones accessibles et d'optimiser les opérations de desserte. Il est pour l'instant peu probable d'envisager des survols à intervalles réguliers pour l'actualisation des informations sur les peuplements forestiers. Une alternative pourrait être l'utilisation des

campagnes existantes de photos aériennes pour produire à bas coût des nuages de points 3D par stéréophotogrammétrie. Ces nuages de points offrent moins d'information sur la structure interne des forêts et quasiment pas sur le sol, mais dans les zones où un MNT précis est déjà disponible, ils permettent aussi d'estimer les caractéristiques des peuplements. Des travaux de recherche sont actuellement menés pour optimiser l'extraction d'information à partir de ces données. Il faut souligner que, selon le type d'information souhaité et selon l'échelle d'analyse, de nombreuses autres données de télédétection (imagerie infrarouge ou couleur, imagerie hyperspectrale, radar) et d'autres vecteurs (terrestre, drone, satellite) peuvent être considérés (ONF, 2011a, 2011b).

Quelle utilisation de l'information ?

La capacité à cartographier les caractéristiques de la forêt et les services qu'elle fournit sur l'ensemble d'un territoire offre d'importantes perspectives en termes d'inventaire forestier, d'élaboration de politiques forestières et de mise en œuvre opérationnelle. Cependant, l'existence de cette information pour chaque parcelle et sa possible diffusion suscite des inquiétudes, notamment chez les propriétaires privés. L'enjeu est de s'assurer qu'elle sera utilisée aux bénéfices des propriétaires, tout en s'inscrivant dans les politiques de gestion multifonctionnelle et durable soutenues par les collectivités locales ou services de l'État. Sur le PNR du Massif des Bauges, après une première présentation publique des cartographies des forêts obtenues sur le territoire, un groupe de travail intégrant les acteurs de la filière forêt-bois a été constitué pour définir les conditions de diffusion et de valorisation de ces données. ■

Les auteurs

Jean-Mathieu MONNET

Univ. Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM,
38000 Grenoble, France.

✉ jean-mathieu.monnet@inrae.fr

Pierre PACCARD

Parc naturel régional du Massif des Bauges,
73630 Le Châtelard, France.

✉ p.paccard@parcdesbauges.com

Catherine RIOND

Office national des forêts,
Pôle Recherche Développement et Innovation,
73000 Chambéry, France.

✉ catherine.riond@onf.fr

EN SAVOIR PLUS...

- **DUPIRE, S., BOURRIER, F., MONNET, J.-M., BERGER, F.**, 2015, Sylvaccess : un modèle pour cartographier automatiquement l'accessibilité des forêts, *Revue Forestière Française*, 70, 2, p. 111-126.
- **MUNOZ, A., CANTELOUP, D., JOLLY, A., RIOND, C.**, 2016, Estimations dendrométriques pour l'aménagement forestier à l'aide de LIDAR aéroporté : premier démonstrateur en forêts littorales dunaires, *ONF - Rendez-Vous Techniques*, n° 50, p. 37-46.
- **MUNOZ, A., VIARD-CRETAZ, G., FAY, J.**, 2013, Implantation d'un projet de desserte forestière en forêt de montagne : les apports du Lidar aérien, *ONF - Rendez-Vous Techniques*, n° 39-40, p. 3-6.
- **ONF**, 2011a, Télédétection appliquée à la gestion des forêts et milieux naturels, *Dossier thématique des Rendez-Vous techniques*, Numéro 31 (1, 17-73).
- **ONF**, 2011b, Télédétection appliquée à la gestion des forêts et milieux naturels, *Dossier thématique des Rendez-Vous techniques* Numéro 32 (2, 25-68).
- **WHITE, J.-C., ET AL.**, 2014, *Guide des meilleures pratiques pour générer des attributs d'inventaire forestier provenant de données obtenues par balayage laser aéroporté en utilisant une approche par zones*, Service canadien des forêts, Rapport d'information FI-X-010, 54 p.