

FORÊT • NATURE

OUTILS POUR UNE GESTION
RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS

Tiré à part de la revue **Forêt.Nature**

La reproduction ou la mise en ligne totale ou partielle des textes
et des illustrations est soumise à l'autorisation de la rédaction

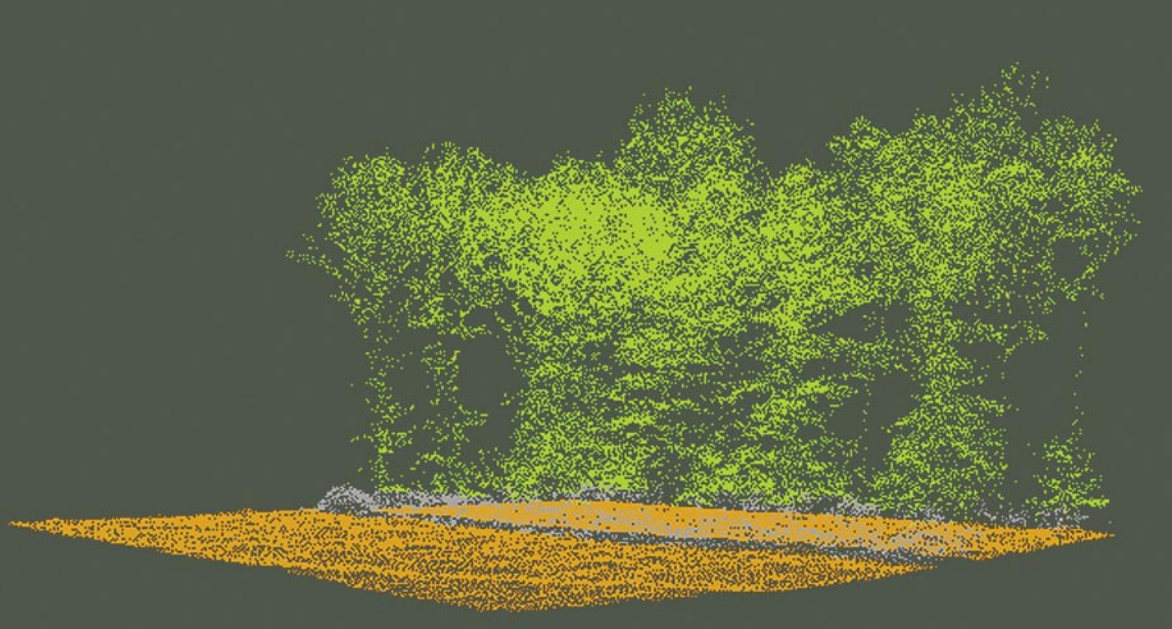
foretnature.be

Rédaction : Rue de la Plaine 9, B-6900 Marche. info@foretnature.be. T +32 (0)84 22 35 70

Abonnement à la revue Forêt.Nature :
librairie.foretnature.be

Abonnez-vous gratuitement à Forêt.Mail et Forest.News :
foretnature.be

Retrouvez les anciens articles de la revue
et d'autres ressources : **foretnature.be**



PRINCIPES DE BASE DE LA TÉLÉDÉTECTION
ET SES POTENTIALITÉS COMME OUTIL
DE CARACTÉRISATION DE LA RESSOURCE FORESTIÈRE.
PARTIE 2. LE LIDAR AÉRIEN

STÉPHANIE BONNET – FRANÇOIS TOROMANOFF – SÉBASTIEN BAUWENS
ADRIEN MICHEZ – LAURENT DEDRY – PHILIPPE LEJEUNE

Le LiDAR offre une vision en trois dimensions de la forêt. Cet outil permet aux forestiers de décrire très finement la structure du couvert végétal. Même si l'acquisition des données reste coûteuse et leur traitement apparemment complexe, les perspectives d'utilisation pour les acteurs de terrain sont multiples et innovantes.

La télédétection a déjà démontré, au travers de nombreuses études, son potentiel de caractérisation de la ressource forestière. En particulier, le développement du LiDAR aérien a ouvert la voie à de nouvelles perspectives. Cette technologie offre une vision tridimensionnelle de la forêt qui permet de récolter à large échelle des informations à l'intérieur même des peuplements. Après avoir présenté les grands

principes de télédétection dans un premier article (Forêt Wallonne n° 114), ce second volet présente quelques concepts de base pour se familiariser avec le LiDAR et illustre son intérêt pour la gestion des forêts et des milieux naturels aux travers de travaux de recherche menés sur une zone pilote constituée par le bassin versant de la Houille dans la région de Gedinne en Province de Namur.

Parmi les multiples données issues de la télédétection, le LiDAR offre une vision en trois dimensions (3D) de la forêt, permettant de récolter des informations à l'intérieur même des peuplements. Le mot LiDAR est l'acronyme de « *Light Detection And Ranging* »²⁴. Les systèmes LiDAR fournissent une représentation de la surface terrestre sous forme de nuages de points en 3D acquis par avion ou hélicoptère (figure 1), dont la densité (et donc le niveau de détails) dépend des caractéristiques techniques du vol. Au cours d'un vol, d'une altitude généralement comprise entre 200 et 1000 mètres³, l'avion scanne une portion de territoire au moyen d'impulsions laser et enregistre les échos.

Une impulsion laser envoyée par l'émetteur vers le sol peut générer plusieurs échos en retour si des « objets » se situent sur la trajectoire de l'impulsion (branches, houppier, tronc, toit...) ou un seul retour si l'impulsion atteint directement le sol (figure 2). À l'heure actuelle, certains LiDAR sont capables d'enregistrer jusqu'à cinq échos pour une même impulsion émise. La plupart du temps, les systèmes multi-échos collectent le premier et le dernier écho¹⁵.

Cette interaction entre les éléments de la canopée et les impulsions laser est la propriété du LiDAR qui permet de décrire de manière très précise la structure 3D du couvert forestier. Chaque point du nuage correspond au point d'impact d'une impulsion laser avec un objet de la surface terrestre et est défini par ses coordonnées (x, y et z). Les données x et y sont les coordonnées planimétriques du point. Z est la coordonnée altimétrique, c'est-à-dire

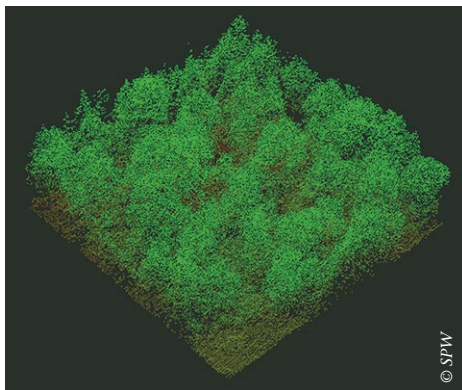
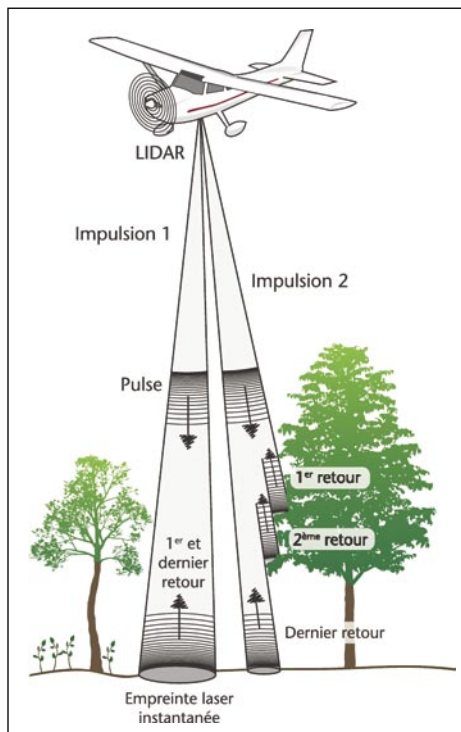


Figure 1 – Nuage de points (13 points/m²) découpé à l'échelle d'une placette d'inventaire, extrait du jeu de données du bassin versant de la Houille.

Figure 2 – À partir de l'avion, une impulsion laser est envoyée par l'émetteur vers la zone scannée. En fonction des obstacles rencontrés par l'impulsion, un ou plusieurs échos (retour) sont renvoyés vers le récepteur de l'avion (inspiré de JENSEN¹⁰).



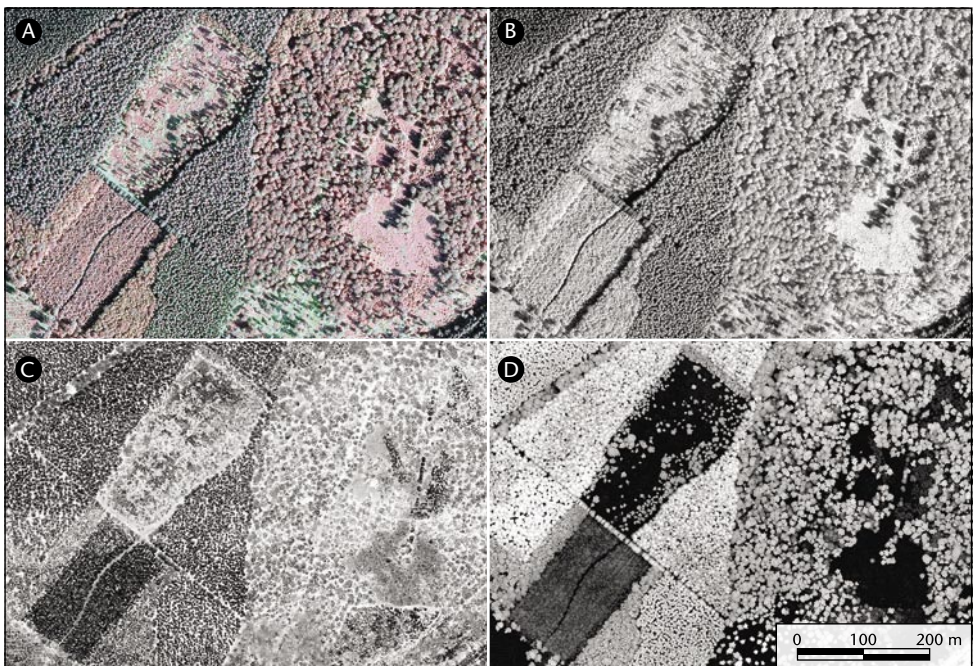
l'altitude du point. Ces coordonnées sont calculées grâce à un GPS et à une station inertielle installés sur l'avion. Le temps mis par un écho pour faire l'aller-retour (à la vitesse de la lumière) entre l'avion et un obstacle permet de calculer la distance qui les sépare. Cette distance, couplée à la direction du faisceau et à la position GPS de l'avion, permet ainsi de localiser spatialement le point d'impact^{10, 24}.

Les précisions des positions ainsi obtenues sont comprises entre 20 et 30 cm

pour les coordonnées x et y et 15 et 20 cm pour la coordonnée z²³. Les densités de points de vols LiDAR peuvent varier de un point par mètre carré à vingt points par mètre carré¹. Les densités les plus élevées sont obtenues par le recouvrement de plusieurs lignes de vol.

Outre l'enregistrement par le récepteur de plusieurs échos, certains LiDAR sont également en mesure d'enregistrer la réflectance, c'est-à-dire l'intensité du signal retour capté par le récepteur. Cette valeur d'in-

Figure 3 – Les figures 3A et 3B sont des images aériennes d'une petite zone forestière du cantonnement de Beauraing. Elles sont toutes les deux soumises au phénomène des ombres. Il y a donc une perte d'information dans les parties ombragées. Cependant, la figure 3A montre des contrastes et textures intéressants pour distinguer différents éléments de végétation (feuillus, résineux, végétation basse, chemins...). Sur la figure 3C, l'effet d'ombre a disparu et on remarque des contrastes entre les zones ouvertes et chemins (en blanc), les feuillus (en gris) et les résineux (en noir). La figure 3D correspond au modèle numérique de hauteur ou de canopée (MNH ou MNC). Dans celui-ci, chaque pixel fournit une valeur de la hauteur des éléments présents en surface, ce qui permet de distinguer les cimes des arbres dominants et d'évaluer leur hauteur.



tensité donne une information « spectrale » de la zone survolée à partir de laquelle on peut créer un raster (assimilable à une image) pour « visualiser » la scène³. À titre d'exemple, une petite zone forestière du cantonnement de Beauraing est illustrée à la figure 3 au travers d'images aériennes et de données dérivées du LiDAR.

Pour compléter notre propos, nous précisons que cette présentation a été restreinte aux systèmes les plus répandus et commercialement disponibles, à savoir le LiDAR aérien à impulsion et retour discret qui produit des nuages de points tels qu'illustré à la figure 1. Cependant, il existe d'autres types de systèmes LiDAR. Les lecteurs intéressés trouveront plus d'informations dans LIM *et al.*¹⁴

GESTION DES DONNÉES

Les paramètres techniques d'un vol LiDAR influencent grandement la densité du nuage de points produits. Ces paramètres concernent la vitesse et la hauteur de vol de l'avion, la vitesse de scannage et la configuration du scanner¹⁰. A priori, il est facile d'admettre que plus le nuage de points est dense, plus il contient d'information et plus les perspectives d'exploitations sont potentiellement intéressantes. Malheureusement, une densité de points élevée va de paire avec des coûts d'acquisition et de traitement plus importants. Toutes les utilisations de données LiDAR ne nécessitent pas la même densité de points et n'obéissent pas aux mêmes contraintes.

Les vols LiDAR sont mis en œuvre par des sociétés spécialisées. Après la phase d'acquisition, les données brutes sont prises

en charge par ces opérateurs afin de fournir un jeu de données prétraitées. En plus du calcul des coordonnées x, y et z, chaque point se voit généralement attribuer une classe (eau, bâtiment, sol, végétation). Ces classes constituent déjà une première information intéressante pour l'utilisateur. La plupart du temps, les données sont délivrées au format LAS, qui est devenu le format standard pour les données LiDAR⁸. Ce format contient donc pour chaque point ses coordonnées, sa classe, son intensité et son numéro de retour.

Le volume de ces données peut être très important. À titre d'exemple, le vol LiDAR réalisé sur le bassin versant de la Houille en mars 2011, sur une surface d'environ 18 000 hectares, représente un volume de données d'environ 300 Go. Au-delà du stockage, l'utilisation de ces données nécessite généralement des traitements « lourds » et par conséquent des ressources informatiques importantes.

La figure 4 illustre un exemple de chaîne de prétraitements des données LiDAR. Plutôt que de travailler avec le nuage de points brut, celui-ci est converti sous forme de différentes couches cartographiques de type raster (constitué de pixels), plus facilement exploitables. L'objectif de cette étape est de synthétiser dans chaque raster une partie de la grande quantité d'informations contenues dans les données brutes en calculant des statistiques à partir des valeurs des points.

DU LIDAR EN FORÊT WALLONNE : QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS

Ce paragraphe présente succinctement plusieurs travaux menés au sein de l'uni-

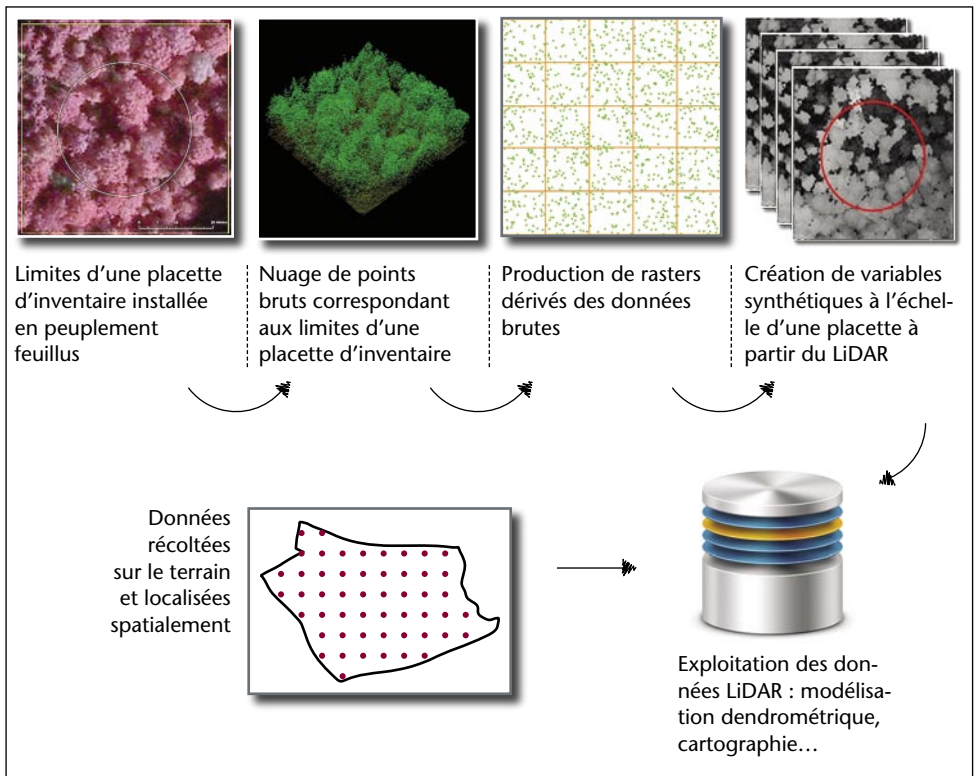


Figure 4 – Le nuage de points est découpé aux limites d'une placette d'inventaire. Des rasters dérivés sont produits. L'information contenue dans le LAS est synthétisée en 2D. Chaque pixel est caractérisé par une valeur résultant d'un calcul effectué sur les points tombant dans ce pixel (par exemple, la hauteur maximum, l'intensité moyenne...).

té de Gestion des ressources forestières et des milieux naturels (Gembloux Agro-Bio Tech, ULg), visant à exploiter les données de LiDAR aérien. Ces travaux ont pour cadre une zone d'étude pilote située sur le bassin versant de la Houille dans la région de Gedinne (cantonement de Beauraing). Cette zone a été couverte par un vol LiDAR aérien en 2011, qui a permis de produire un jeu de données à très haute densité (treize points par mètre carré en moyenne).

Modèles dendrométriques

Le premier exemple d'application concerne l'estimation des principaux paramètres dendrométriques dans le cas des peuplements résineux. Ces paramètres concernent la hauteur dominante, le nombre de tiges à l'hectare, la surface terrière et le volume par hectare.

La capacité du LiDAR à mesurer la hauteur de la canopée permet la production d'une couche cartographique raster avec

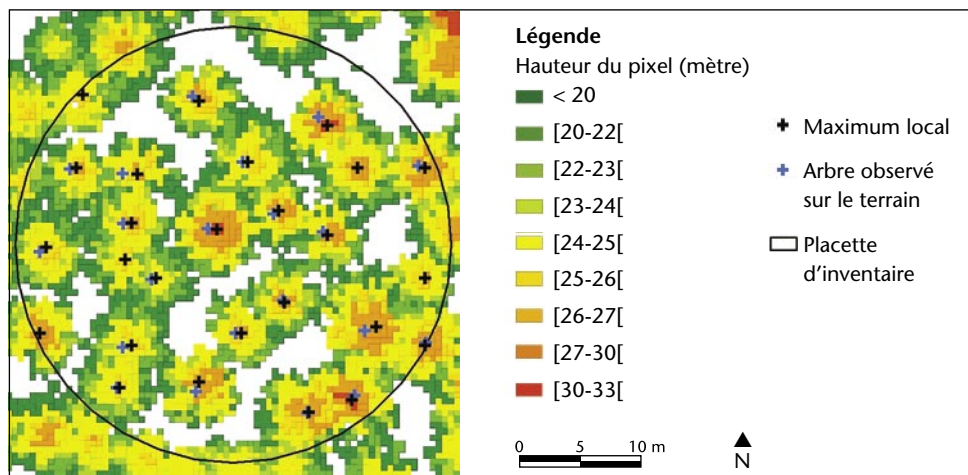
une résolution spatiale (taille des pixels) de 50 cm, qui représente la hauteur maximum atteinte par la végétation en chaque pixel.

À partir de ces données, un algorithme²¹ a été utilisé pour détecter des maxima locaux qui correspondent, en théorie, aux sommets des arbres (figure 5). Pour chacun de ces arbres (maxima locaux), la hauteur et la position géographique sont déterminées. Ces données permettent de « reconstruire » le peuplement concerné et d'évaluer sa hauteur dominante et son nombre de tiges à l'hectare. Dans le cas des peuplements résineux équiennes, ces deux paramètres estimés peuvent ensuite être utilisés dans des modèles statistiques de distribution des tiges par classes de circonférence¹⁸. Il devient dès lors possible d'estimer, non seulement la surface terrière ou le volume à l'hectare, mais

également la grosseur moyenne ainsi que la distribution des arbres par catégories de grosseur (catégories commerciales par exemple).

L'intérêt du LiDAR dans cette application réside dans sa capacité à délivrer rapidement et facilement des informations quantitatives utiles à la gestion de ces peuplements, et ce, à l'échelle d'une propriété entière. À titre d'exemple, ces paramètres ont été calculés pour un échantillon de parcelles résineuses du cantonnement de Beauraing. Le graphique de la figure 6 représente, pour l'ensemble de ces parcelles, la relation entre le nombre de tiges par hectare et la hauteur dominante. Ce graphique met en évidence des parcelles (entourées en rouge) avec un nombre de tiges anormalement élevé, traduisant probablement un retard d'éclaircie. Les modèles ainsi

Figure 5 – La couche raster (pixels de 50 cm) représentée est le MNH uniquement pour les zones de végétation haute. L'algorithme permet la détection de maxima locaux (croix noires) qui correspondent, en théorie, aux arbres observés sur le terrain (croix bleues).



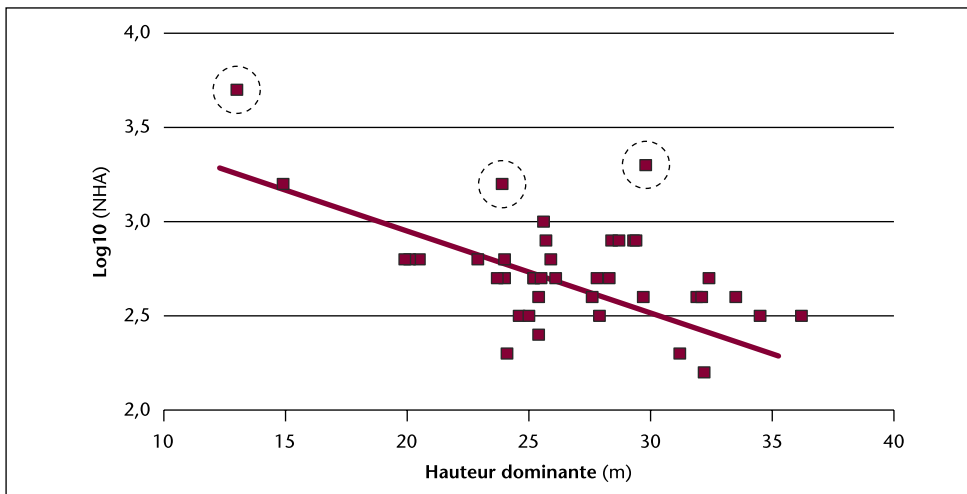
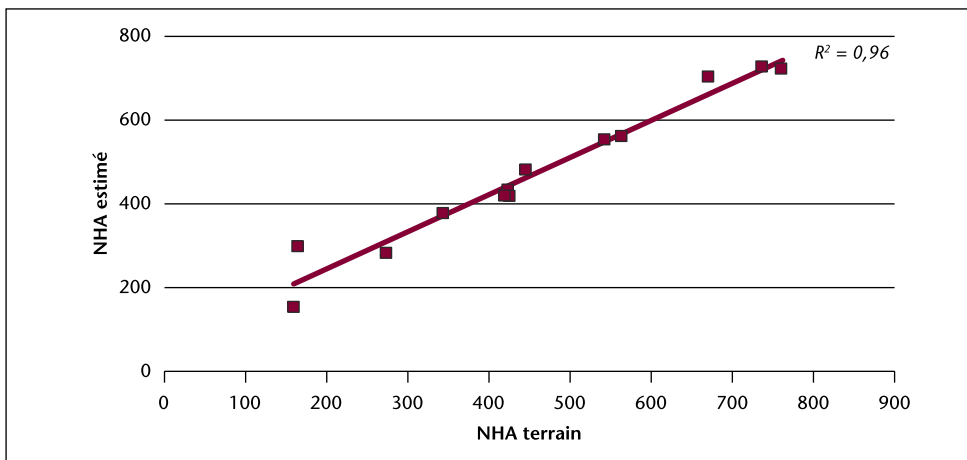


Figure 6 – Relation entre le nombre de tiges par hectare (présenté sur une échelle logarithmique) et la hauteur dominante. L'analyse de cette relation pour les parcelles d'épicéa considérées met en évidence trois parcelles caractérisées par un nombre de tiges particulièrement élevé (entourées en rouge).

Figure 7 – L'estimation du nombre de tiges au sein de parcelles forestières à partir de LiDAR fonctionne bien. Le nombre d'arbres par hectare (NHA) estimé est calculé sur base de l'algorithme de détection d'arbres et d'un modèle mis au point à partir de placettes d'inventaires. Ce modèle est validé à l'aide de parcelles qui ont été inventoriées en plein.



produits donnent actuellement de très bons résultats dans le cas des pessières (figure 7). Ils sont en cours d'adaptations pour les autres peuplements résineux (douglasaies, mélézins, peuplements mélangés).

Cartographie de trouées

Les trouées forestières constituent des charnières de la dynamique forestière, et des zones à fort potentiel de régénération naturelle qui intéressent le gestionnaire forestier. La cartographie et la caractérisa-

tion de ces trouées constituent cependant des tâches complexes¹³ qui sont rarement mises en œuvre dans la pratique.

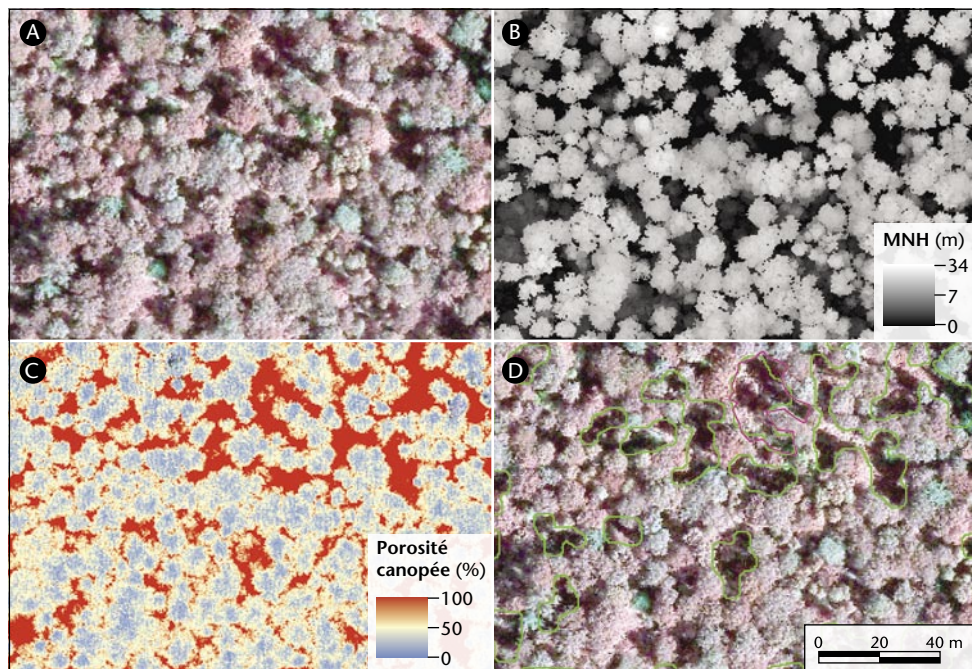
La capacité qu'a le LiDAR de pénétrer la canopée forestière lui permet de s'affranchir des problèmes d'ombres et offre des possibilités intéressantes pour la délimitation des zones de trouées forestières. Cette cartographie est basée sur l'exploitation de différentes couches rasters dérivées de données brutes et décrivant d'une part, la hauteur du couvert forestier ainsi que la porosité de celui-ci (figure 8). Cette dernière notion traduit simplement la proportion des impulsions LiDAR qui traversent la canopée pour arriver au

sol. Plusieurs méthodes de cartographie « automatique » de trouées ont été testées et comparées.

La précision de cette cartographie est évaluée en termes de taux de détection des trouées. Les premiers résultats conduisent à une précision globale de l'ordre de 80 %. Les travaux actuellement en cours visent à évaluer les possibilités de détection et de caractérisation de la végétation basse présente au sein de ces trouées (régénération et végétation).

À terme, cette application devrait permettre non seulement d'établir de manière automatique une cartographie des trouées

Figure 8 – Une zone feuillue du cantonnement de Beauraing est représentée par une image aérienne en infrarouge fausses couleurs (A), le MNH (B) et le raster porosité basé sur le taux de pénétration des impulsions sous le couvert (C). Un exemple de cartographie de trouées obtenue (polygones verts) est présenté en regard d'une cartographie réalisée sur le terrain pour une trouée (polygone rose).



forestières, mais également d'envisager une caractérisation de leur environnement direct en relation notamment avec la forme et l'orientation de la trouée. De telles couches cartographiques, établies sur l'ensemble des peuplements feuillus d'une propriété, pourraient constituer des références intéressantes à la fois pour mieux identifier le potentiel de régénération, mais également pour évaluer la biodiversité de ces milieux, voire leur capacité d'accueil pour la grande faune.

Caractérisation des ripisylves

En plus de localiser et de décrire la structure et la composition (distinction entre feuillus et résineux) des peuplements forestiers bordant les cours d'eau, les données LiDAR permettent de délimiter le lit mineur des cours d'eau. La combinaison de ces différentes informations cartographiques met clairement en évidence l'intérêt des données LiDAR pour l'analyse de la fonctionnalité des écosystèmes rivulaires (tableau 1), tant à l'échelle du réseau hydrographique qu'à celle du secteur de gestion. Il est, par exemple, possible de déterminer l'importance relative

des résineux (taux d'enrésinement) pour différentes gammes de distance au bord du cours d'eau.

À titre d'exemple, la figure 9 représente, pour la vallée de la Houille, l'évolution de ce taux d'enrésinement pour des distances correspondant aux distances réglementaires d'interdiction et de maintien de plantations résineuses (6 mètres en forêt, 12 mètres en zone Natura 2000). Elle met en évidence la présence de peuplements résineux à une distance inférieure à la distance réglementaire de 12 mètres en vigueur, étant donné le statut « Natura 2000 » de la quasi intégralité du fond de vallée situé en territoire wallon. On remarque que les taux d'enrésinement les plus élevés sont observés au niveau des tronçons situés à proximité de la confluence avec la Hulle, qui présente pourtant un grand intérêt biologique.

Les données LiDAR permettent également d'obtenir des informations intéressantes sur la proximité de la ripisylve par rapport au cours d'eau. Le concept de hauteur relative au pied de berge (figure 10) a été déve-

Tableau 1 – Indicateurs de la qualité des bandes riveraines extraits à partir d'un nuage de points LIDAR haute densité.

| Paramètre de la ripisylve | Indicateur de fonction écologique |
|---|---|
| Continuité longitudinale | Corridor de dispersion pour les végétaux, zone d'habitat et de migration pour l'avifaune et les mammifères ^{6, 7, 9} |
| Ripisylve en surplomb | Effet d'ombrage, régulation de la température, création d'habitat et apport de nutriment ⁴ |
| Enrésinement | Réduction de la stabilité des berges et de la biodiversité ^{19, 22} |
| Hauteur relative au pied de berge | Fréquence d'inondation, proximité de la nappe, directement liés à la spécificité et diversité des berges ^{17, 20} |
| Hauteur (moyenne, coefficient de variation) | Localisation des peuplements matures (hauteur moyenne) ; diversité spatiale (C.V.) en lien avec la diversité spécifique ^{17, 16, 20} |

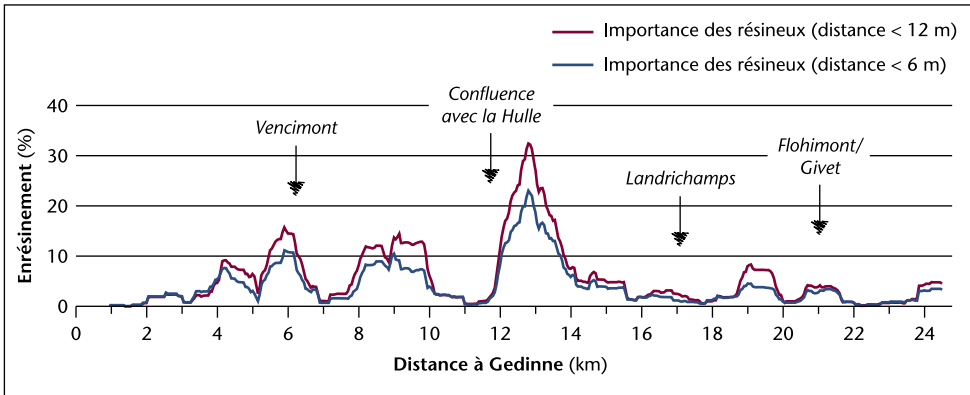
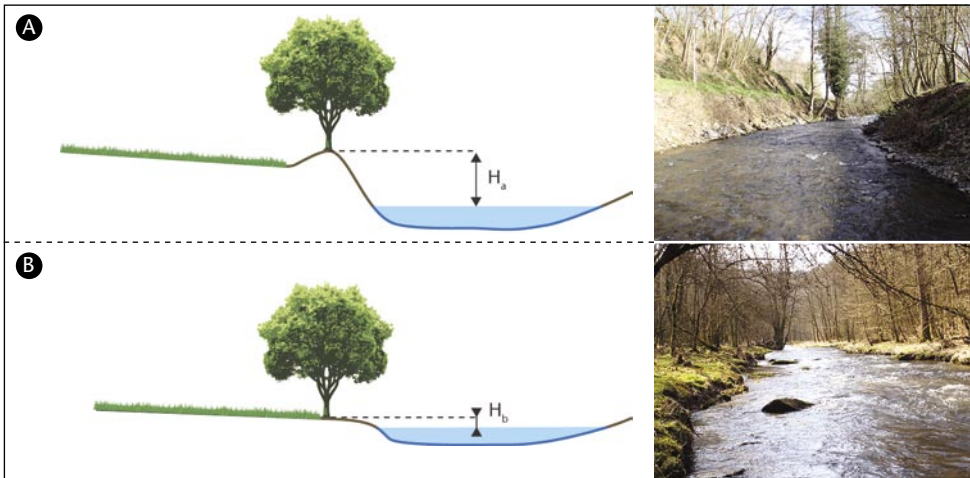


Figure 9 – Évolution de l'enrésinement (moyenne mobile sur 1 km) dans la vallée de la Houille (province de Namur, Belgique) en février 2011.

Figure 10 – Deux cas de figure de hauteur relative au pied de berge : $H_a > H_b$.



loppé afin d'exprimer pour une portion de ripisylve donnée, la proximité de celle-ci par rapport au pied de berge. En plus d'être un indicateur de la typicité des ripisylves, ce paramètre définit la nature de la berge et le caractère plus ou moins remanié de celle-ci et de ses abords. Les deux exemples présentés dans la figure 10 illustrent deux situations contrastées et observées le long de la Houille. La figure 10A présente un tronçon avec une hauteur relative au

pied de berge élevée, suite à un reprofilage du cours d'eau et de ses berges. Le cas présenté en figure 10B illustre une situation plus naturelle, avec une hauteur relative au pied de berge plus faible et donc une ripisylve en contact beaucoup plus régulier avec le cours d'eau.

Cartographie d'occupation du sol

L'occupation du sol désigne le type d'usage (ou de non usage) des terres par l'homme.

La production de cartes d'occupation du sol et leur mise à jour régulière permet de suivre les tendances en termes de changements d'affectation et d'utilisation des terres. Les données LiDAR, au même titre que les images aériennes ou satellitaires, sont susceptibles d'être utilisées pour la cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol. Elles décrivent en effet la structure tridimensionnelle (3D) des surfaces à cartographier et fournissent aussi une information spectrale pour ces mêmes surfaces². Les caractéristiques de la structure 3D (hauteur, porosité) s'avèrent particulièrement intéressantes pour la cartographie de l'occupation du sol en zone rurale où se côtoient les milieux agricoles, forestiers et les espaces ouverts non dédiés à l'agriculture.

La cartographie de l'occupation du sol qui a été menée sur la zone est basée sur un ensemble de rasters dérivés des données LiDAR brutes et d'une résolution de 50 cm. La méthode utilisée est une classification « orientée-objet ». Ce type de démarche repose sur le principe de segmentation d'image, c'est-à-dire sur le découpage de l'image en groupe de pixels homogènes

(les objets), censés correspondre à des éléments d'occupation du sol différents⁵. La phase de classification des objets est réalisée en plusieurs étapes, en considérant les caractéristiques des objets fournies par le LiDAR (hauteur, intensité, porosité...). La carte d'occupation du sol est finalement produite en considérant deux niveaux de détails (tableau 2).

Les résultats obtenus montre une précision de l'ordre de 95 % pour le niveau 1 et une précision de 90 % pour la cartographie plus détaillée faisant apparaître, entre autres, une discrimination entre feuillus et résineux, forêts en transition (coupe à blanc et régénération naturelle), ainsi que la reconnaissance des éléments arborés non forestiers (figure 11).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le développement de la technologie LiDAR constitue une nouvelle ère dans le domaine de la télédétection appliquée. En effet, la capacité de ces capteurs à décrire de manière très précise et très fine la structure

Tableau 2 – Détails des classes intervenant dans les deux niveaux.

| Niveau général (1) | Niveau détaillé (2) |
|---------------------------------|--|
| Territoires artificialisés | Bâti et espaces associés Routes et espaces associés |
| Territoires agricoles | Territoires agricoles Prairies Éléments arborés hors forêt |
| Forêts et milieux semi-naturels | Peuplements feuillus Peuplements résineux Pelouses et pâturages naturels Forêts en transition |
| Surfaces en eau | Surfaces en eau |
| Non classé | Non classé |

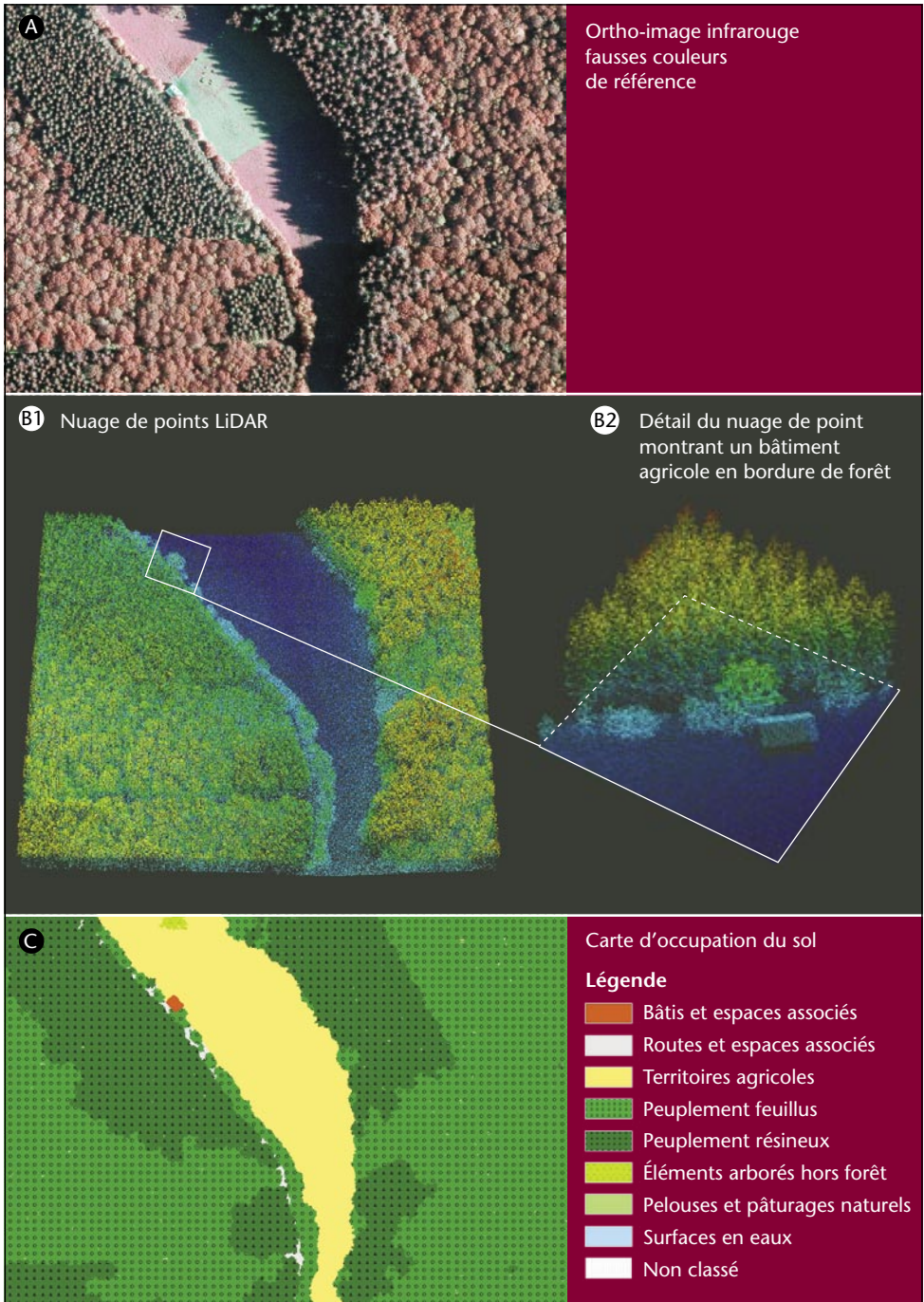


Figure 11 – Ortho-image infrarouge fausses couleurs de référence (A), nuage de points LiDAR (B1), détail du nuage de point montrant un bâtiment agricole en bordure de forêt (B2) et carte d'occupation du sol associée avec le niveau détaillé (C).

tridimensionnelle du couvert végétal laisse entrevoir des perspectives résolument innovantes en matière de description et de caractérisation des milieux naturels en général et forestiers en particulier.

L'utilisation de ces techniques se heurte encore actuellement au coût élevé de l'acquisition des données et à l'apparente complexité de leur gestion et de leur mise en œuvre. Nous avons cependant voulu montrer à travers cet article, que les applications forestières du LiDAR étaient très nombreuses et méritaient que l'on prenne la peine de développer les outils informatiques adaptés en vue du traitement de ces données pour rendre accessibles les résultats aux utilisateurs de terrain.

Au regard des applications présentées dans cet article, les résultats obtenus sur la zone pilote de la vallée de la Houille se montrent très prometteurs. Le Service Public de Wallonie est en train de réaliser une couverture LiDAR aérien sur l'ensemble de son territoire. Celle-ci produira un jeu de données à basse densité de points (environ un point par mètre carré). Les travaux de recherche en cours auront notamment pour objectif d'évaluer l'adaptation des outils présentés dans cet article à un tel jeu de données, non plus sur une zone restreinte, mais bien sur l'ensemble du territoire régional. Le LiDAR aérien s'affirme résolument comme une technologie d'avenir pour la caractérisation des milieux naturels. ■

BIBLIOGRAPHIE

¹ ACKERMAN F. [1999]. Airborne laser scanning - Present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry* 54 :64-67.

² ANTONARAKIS A.S., RICHARDS K.S., BRASINGTON J. [2008]. Object-based land cover classification using airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 112 : 2988-2998

³ BALTSAVIAS E. [1999]. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 : 83-94.

⁴ BESCHTA R.L., BIBLY R.E., BROWN G.W., HOLTBY L.B., HOFSTRA T.D. [1989]. Stream temperature and aquatic habitat: Fisheries and forestry interactions. In SALO E.O., CUNDY T.W. (eds.). *Streamside Management: Forestry and Fishery Interactions*. Institute of Forest Resources Contribution 57. University of Washington, Seattle, USA, p. 191-232.

⁵ BLASCHKE T. [2010]. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 : 2-16.

⁶ COCKLE K.L., RICHARDSON J.S., [2003]. Do riparian buffer strips mitigate the impacts of clearcutting on small mammals ? *Biological Conservation* 113 : 133-140.

⁷ DECAMPS H., JOACHIM J., LAUGA J. [1987]. The importance for birds of the riparian woodlands within the alluvial corridor of the river garonne, S.W. France. *Regul. Rivers Res. Manag.* 1 : 301-316.

⁸ GRAHAM L. [2009]. Management of LiDAR Data. In : SHAN J., TOTH CK.. (Eds.). *Topographic Laser Ranging and Scanning - Principles and Processing*. CRC Press, p. 295-306.

⁹ HUGHES F. [2003]. *The Flooded Forest: Guidance for policy makers and river managers in Europe on the restoration of floodplain forests*.

¹⁰ JENSEN J.R. [2007]. *Remote Sensing of the Environment - An Earth Resource Perspective* (Second Edition). Upper Saddle River, Pearson Prentice Hall.

¹¹ JOHANSSON M.E., NILSSON C., NILSSON E. [1996]. Do rivers function as corridors for plant dispersal ? *Journal of Vegetation Science* 7 : 593-598.

¹² KOCH B. [2010]. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hy-

- perspectival remote sensing data for forest biomass assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 : 581-590.
- ¹³ KOUKOULAS S., BLACKBURN G.A. [2004]. Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LiDAR imagery and GIS. *International Journal of Remote Sensing* 25 : 3049-3071.
- ¹⁴ LIM K., TREITZ P., WULDER M., ST-ONGE B., FLOOD M. [2003]. LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27 : 88-106.
- ¹⁵ MALLET C., BRETAR F. [2009]. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(1) : 1-16.
- ¹⁶ MOUCHET F., LAUDELOUT A., DEBRUXELLES N., HENROTAY E., RONDEUX J., CLAESSENS H. [2010]. *Guide d'entretien des ripisylves*. SPW, DGARNE, Dir. des Cours d'eau non navigables, Gembloux Agro-Bio Tech., 42 p.
- ¹⁷ NAIMAN R., DÉCAMPS H., MCCLAIN M.E. [2005]. *Riparia: Ecology, Conservation, And Management Of Streamside Communities*. Academic Press.
- ¹⁸ PERIN J. [2012]. *Action 2.2.1: Croissance, productivité et sylviculture du douglas, de l'épicéa commun et des mélèzes*. Accord-Cadre de Recherche et Vulgarisation forestières, Rapport annuel détaillé, p. 45-47.
- ¹⁹ PETIT F. [1992]. *L'influence des plantations de résineux en fond de vallée sur l'évolution géomorphologique de rivières de Haute Belgique*. p. 11.
- ²⁰ POLLOCK M.M., NAIMAN R.J., HANLEY T.A. [1998]. Plant species richness in riparian wetlands - a test of biodiversity theory. *Ecology* 79 : 94-105.
- ²¹ POPESCU S.C., WYNNE R.H., NELSON R.F. [2002]. Estimating plot-level tree heights with lidar : local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture* 37(1-3) : 71-95.
- ²² SCHNEIDER J.-B. [2007]. Plaidoyer pour une restauration des cordons rivulaires naturels des ruisseaux et ruisselets forestiers. *Forêt Wallonne* 86 : 43-57.
- ²³ SUAREZ J.C., ONTIVEROS C., SMITH S., SNAPE S. [2005]. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. *Computer and Geoscience* 31 : 253-262.
- ²⁴ WEHR A., LOHR U. [1999]. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *International Journal of Remote Sensing* 54 : 68-82.

Les auteurs tiennent à remercier le Service Public de Wallonie et en particulier le Département de la nature et des forêts (DNF) (Accord-cadre de recherche et vulgarisation forestières), la Direction des cours d'eau non navigables (DCNN) et la Direction du développement rural (DDR) pour le soutien apporté au travers des différentes conventions de recherche confiées à l'Unité de gestion des ressources forestières et des milieux naturels en rapport avec la télédétection.

STÉPHANIE BONNET

s.bonnet@ulg.ac.be

FRANÇOIS TOROMANOFF

SÉBASTIEN BAUWENS

ADRIEN MICHEZ

LAURENT DEDRY

PHILIPPE LEJEUNE

Unité de gestion des ressources forestières et des milieux naturels, Gembloux Agro-Bio Tech, ULg

Passage des Déportés, 2
B-5030 Gembloux