

Le Lidar, outil performant pour cartographier la hauteur des peuplements forestiers

J. Bock, J-P. Renaud, G. Dez, F. Martins*, M. Leroy**, É. Dambrine, J-L. Dupouey***

En mars 2007, un avion équipé d'un laser aéroporté a scanné l'ensemble de la forêt de Haye. Ce projet, fruit d'une collaboration entre l'ONF, l'Inra et la DRAC¹, est une première puisqu'il s'agit d'un des plus grands massifs forestiers feuillus inventoriés par cette technique en Europe. Les résultats sont très prometteurs et présentent des perspectives nouvelles pour la gestion des forêts. Cet article, paru dans la revue RDV techniques n° 32 de l'ONF, au printemps 2011, est reproduit partiellement avec leur aimable autorisation.

La hauteur dominante est un paramètre-clé pour caractériser les peuplements forestiers. Il est souvent utilisé pour décrire les jeunes peuplements par rapport à un stade de développement : c'est ainsi une variable essentielle dans la base de données régénération de l'ONF. C'est également une clé d'entrée dans la plupart des guides de sylviculture dont les itinéraires sont calés sur des courbes de croissance en hauteur données pour différentes classes de fertilité. Et cette notion de fertilité, qui traduit les capacités de production d'une station pour une essence donnée, est elle-même estimée par la hauteur dominante à un âge déterminé.

Or, cette mesure est souvent fastidieuse, difficile et généralement entachée d'erreurs, même dans le cas de mesures très rigoureuses (1 à 1,6 % d'erreur relative selon Rondeux et Pauwels, 1998). Elle est donc rarement relevée par le forestier. En conséquence, les données disponibles sur un massif sont ponctuelles et fragmentaires... ou approximatives.

Les récents progrès réalisés dans les domaines des lasers, du GPS et de la navigation inertielle ont permis le dé-

veloppement d'un outil de télédétection. Le LiDAR offre des applications forestières très prometteuses, en particulier pour l'estimation rapide, précise et complète de la hauteur des peuplements forestiers.

Cet article présente l'élaboration d'une méthode de cartographie de la hauteur dominante des peuplements qui se base sur des données LiDAR acquises sur les 112 km² de la forêt domaniale de Haye dans le cadre d'un projet de recherche réunissant l'ONF, l'Inra et la DRAC (Bock *et al.*, 2008). Les applications pratiques pour le gestionnaire forestier sont discutées en fin d'article.

Le Lidar permet de mesurer précisément et cartographier les hauteurs en forêt

Le Lidar aérien est une technique de télédétection qui permet l'acquisition de données topographiques à haute résolution. Son principe repose sur l'émission d'impulsions laser à très haute fréquence par un émetteur embarqué dans un avion. L'onde lumineuse est réfléchiée par les différentes cibles rencontrées : feuilles, branches, troncs, sous-étage, sol. Un capteur embarqué dans l'avion enregistre les

échos retours de l'onde lumineuse et le temps de retour permet de déduire directement l'altitude de la cible (voir Bock *et al.*, 2008). Le résultat est un nuage de points dont les coordonnées XYZ sont calculées en tenant compte de la position et de l'orientation de l'avion qui sont enregistrées en continu par des mesures GPS et inertielles². La densité de ce nuage de points dépend notamment des spécifications préalables : fréquence d'impulsions émises par m², angle d'émission du rayon, altitude de vol... Ces paramètres d'acquisition conditionnent grandement le coût de la campagne Lidar, une densité de points élevée nécessitant un temps de vol important. Le Lidar peut enregistrer plusieurs échos d'une même impulsion permettant ainsi de modéliser simultanément le sol, par un modèle numérique de terrain (MNT) et la végétation (sur-sol) par un modèle numérique de surface (MNS). Ils sont obtenus par traitement du nuage de points par le prestataire (classification et interpolation). On a ainsi une description très fine de la topographie du sol et de la canopée, avec une précision planimétrique et altimétrique d'une dizaine de centimètres. La hauteur de chaque point de

la végétation est alors calculée par différence entre son altitude et celle du MNT.

Cette technique est utilisée en routine depuis plus de 10 ans pour des applications forestières dans de nombreux pays : pays scandinaves, Canada, USA, Autriche, Allemagne, Russie... Cependant, la plupart des résultats existants concernent des peuplements résineux à fort enjeu de production. Il existe peu d'exemples d'utilisation en peuplements feuillus, dont les structures sont plus complexes et souvent hétérogènes.

Nous avons donc exploré les possibilités du laser pour estimer la hauteur dominante dans des peuplements feuillus plus ou moins hétérogènes, avec 3 objectifs :

- rechercher, parmi les indicateurs calculables sur le nuage de points Lidar, le meilleur estimateur de la hauteur dominante et évaluer sa précision ;
- vérifier sa pertinence en étudiant les paramètres susceptibles d'influencer sa précision ;
- établir la carte exhaustive des hauteurs dominantes (à la date de la campagne Lidar).

Construction de la méthode : placettes de calibration et analyse des données

Pour mettre au point la méthode et valider les résultats obtenus, il est indispensable de disposer d'une description de la « réalité de terrain ». Celle-ci est constituée de 120 placettes de 6 ares, implantées pour l'occasion dans des peuplements feuillus de 6 m à plus de 40 m de haut. Il s'agit de peuplements composés principalement de hêtre, plus ou moins mélangé avec du chêne et d'autres feuillus. L'effet de la structure du peuplement a été contrôlé en échantillonnant 67 futaies régulières, 26 taillis sous futaies et 27 peuplements intermédiaires (TSF plus ou moins conver-

tis). Par ailleurs, l'effet de la densité de points Lidar a été analysé en installant les placettes sur deux gammes de densité : moins de 30 points/m² ou plus de 30 points/m².

Placettes de calibration

La hauteur dominante a été estimée en mesurant sur le terrain la hauteur totale des 5 plus gros arbres de chaque placette. Cette mesure a été réalisée le plus précisément possible, au Vertex, en faisant pour chaque arbre la moyenne de 2 mesures prises à 180° sur le même bourgeon, le plus haut. L'effet observateur a été limité en demandant à une seule et même personne de mesurer l'ensemble de cet échantillon, soit 600 arbres au total. Plus d'une centaine d'indicateurs ont ainsi été testés pour identifier les meilleurs estimateurs de la hauteur dominante. Les estimateurs ont été classés par ordre de précision croissante du modèle (erreur quadratique moyenne, biais, pourcentage d'explication - R²).

Des résultats méthodologiques très encourageants...

Quel que soit l'estimateur utilisé, il existe moins d'un mètre d'écart entre la hauteur dominante calculée à partir des données Lidar et la mesure de terrain.

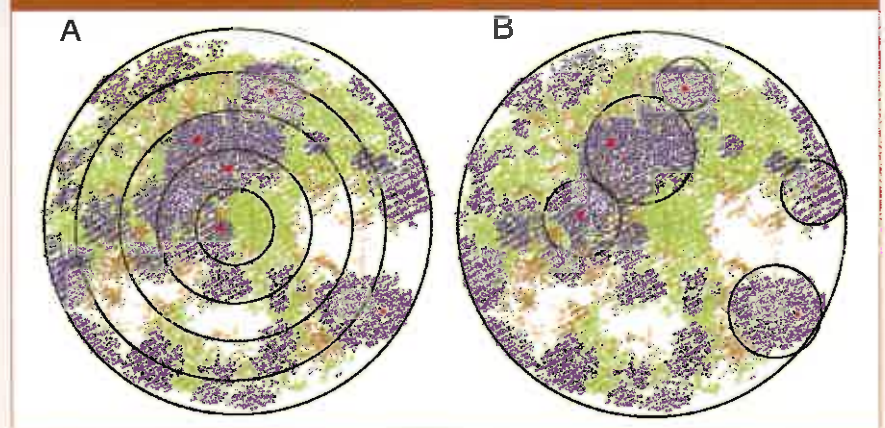
Une mesure fiable de la hauteur dominante (H₀)

Une analyse plus fine (analyse multivariée) réalisée sur les 3 meilleurs estimateurs permet de préciser la portée du résultat.

D'abord, l'estimation de la hauteur dominante n'est pas significativement influencée par le type de peuplement : qu'on se concentre sur le TSF, la futaie ou le type intermédiaire, la précision reste la même que pour l'ensemble des placettes.

Ensuite, l'imprécision du GPS ne semble pas problématique. Cela a été évalué en faisant varier le rayon d'extraction des points Lidar de 5 à 30 m autour de la position GPS du centre de la placette de calibration (la placette installée sur le terrain faisant

Figure 1 : principe de calcul des maxima locaux dans le nuage des points Lidar, selon deux méthodes



Méthode A : la placette est divisée en 3, 4 ou 5 cercles concentriques et les hauteurs maxima dans chaque cercle sont moyennées.

Méthode B : on identifie le point le plus haut de la placette, puis on ignore les points dans un rayon d'exclusion dépendant de la hauteur de ce point. Ce rayon est calculé d'après des relations allométriques hauteur de l'arbre-diamètre du houppier établies sur plus de 800 hêtres et chênes mesurés par l'INRA (r² = 0.54). On cherche ainsi de suite les 2^e, 3^e, 4^e et 5^e points les plus hauts de la placette.

On présume que la méthode B permet d'éviter de sélectionner plusieurs points dans un même arbre. En outre, c'est elle qui se rapproche le plus de la définition de la hauteur dominante : moyenne des hauteurs des 5 plus hauts arbres sur 6 ares.

Fig. 2 : carte « brute » de hauteur dominante (mars 2007) de la forêt de Haye ; calcul avec l'estimateur Lidar Hmv5

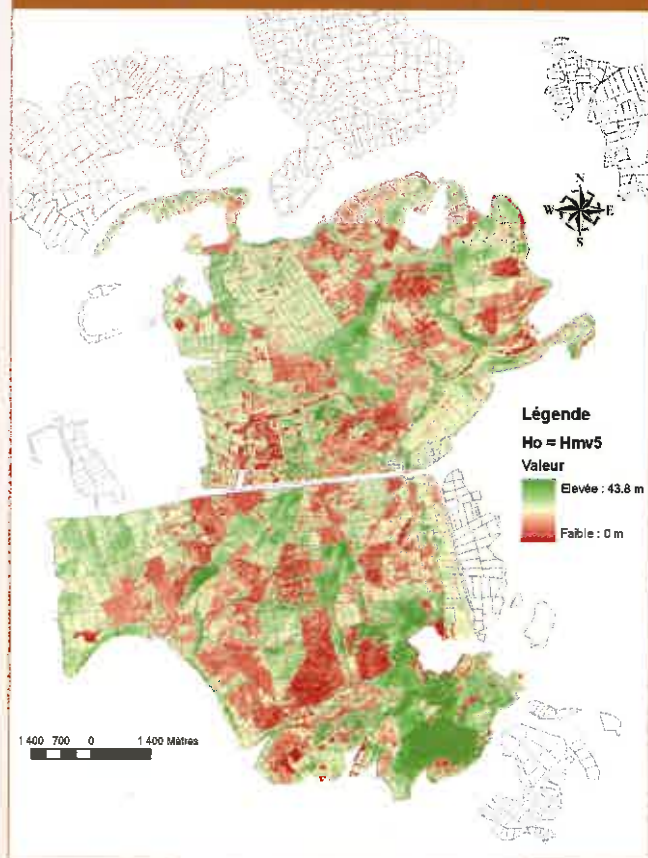
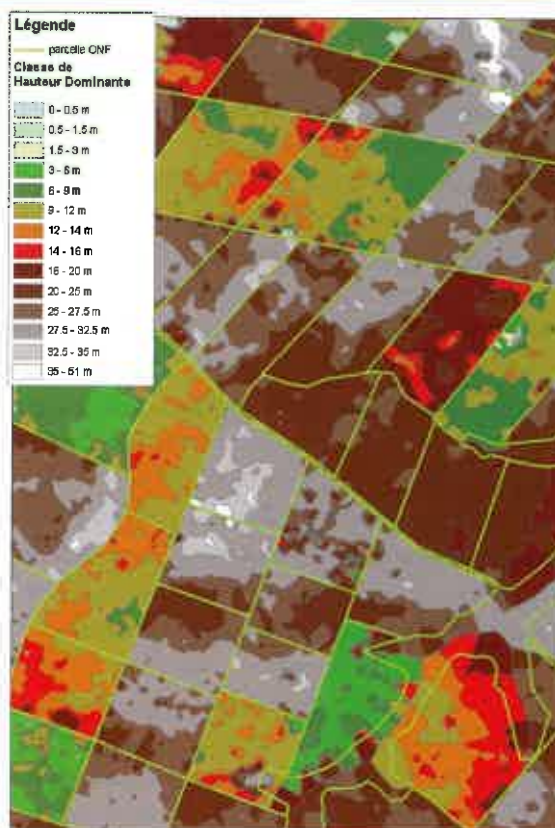


Fig. 3 : carte des classes de hauteur dominante, traduite en couche SIG, à l'usage des gestionnaires (exemple en forêt de Languimberg)



13,8 m de rayon), pour simuler l'imprécision du GPS : quel que soit le rayon d'extraction, les performances des estimateurs restent relativement stables. Le type d'ajustement du MNT n'a pas non plus d'influence sur la précision de la « mesure » de hauteur dominante : la précision du résultat est la même quelle que soit la méthode d'interpolation choisie pour calculer le MNT à partir du nuage de points Lidar sol de la placette. Contrairement aux applications du Lidar en archéologie, en foresterie, l'ajustement le plus simple (plan) peut donc être retenu. On pensait aussi que la microtopographie (présence de fossés, buttes, pierriers...) pouvait avoir une influence⁹ : manifestement, ce n'est pas le cas dans nos conditions de plateaux calcaires de Lorraine aux reliefs peu marqués.

Plus surprenant enfin, la densité de points Lidar ne semble pas peser sur la qualité d'estimation de la hauteur dominante. Il faut réduire de plus de 90 %

la densité de points (au sol et dans la végétation), soit moins de 3 points/m², pour commencer à voir une dégradation des performances des estimateurs de hauteur dominante. L'apport de notre modèle est significatif puisque les modèles de références de la bibliographie (Naesset *et al.*, 2002, Heurich *et al.*, 2008) montrent des performances de prédiction de moins bonnes lorsqu'ils sont testés sur l'échantillon.

Des retombées immédiates pour le gestionnaire de la forêt de Haye...

Grâce à ces résultats, la première cartographie exhaustive de hauteur dominante des peuplements feuillus a donc été réalisée sur les 112 km² de la forêt de Haye (voir figure 2). Elle a été présentée au gestionnaire qui y a trouvé un intérêt pratique immédiat car elle permet de représenter différents types de peuplement déterminés d'après les seuils de hauteur

dominante fournis dans les guides de sylviculture.

D'après ce qui suit, on imagine aisément ce que seraient les gains de productivité (programmation) et les améliorations sylvicoles (appropriation/mise en œuvre des référentiels) si on pouvait disposer de données périodiques Lidar généralisées à coût raisonnable.

Le forestier peut ainsi dresser l'état de la régénération par classes de hauteur et actualiser très rapidement la base de données régénération à la date de la campagne Lidar : il a un « état zéro » parfaitement « propre » et la possibilité de calibrer les diagnostics terrain. Sur un massif touché à plus de 25 % par la tempête comme la FD de Haye, la programmation des travaux (pour les quelques années qui suivent) peut être optimisée en fonction du stade de développement (gamme de Ho). Le croisement avec la carte des stations permet alors d'affiner les consignes et

de cibler les interventions selon les essences potentiellement intéressantes. Dans les peuplements mités, hétérogènes, le problème du suivi des taches de régénération se simplifie puisque les trouées sont localisées précisément et quantifiées (voir figure 3).

De même, les peuplements concernés par la sortie de phase de qualification (1^{re} éclaircie) peuvent être immédiatement localisés et quantifiés en surface. Il est possible d'y distinguer différentes gammes de hauteurs dominantes (voir figure 3). Cela permet, en croisant avec la carte des essences objectif, de programmer les interventions au profit des essences principales, et aussi celles - plus précoces - qui concernent les feuillus précieux. On peut distinguer en particulier les peuplements compris entre 12-14 m de haut pour anticiper la sortie des feuillus précieux (selon la station). Pour les essences principales, on peut faire la distinction entre les peuplements de 14-16 m de haut et ceux de 16-18 m de haut pour mieux programmer les sorties de qualification en fonction des surfaces en jeu, des comportements des essences et des stations concernées.

Au-delà de 18 m, l'information de hauteur dominante est un peu moins pertinente au regard des référentiels sylvicoles, sauf :

- pour identifier les peuplements en retard d'éclaircie (gamme 16-20 m jamais éclaircie),
- pour identifier les zones à risque de dégâts de tempête en fonction de H_o ($H_o > 25$ m), de la station, de la situation topographie issue du MNT (voir Bock *et al.*, 2004).

Poursuite des opérations : améliorer l'utilisation opérationnelle et enrichir l'information

Cette première carte de hauteurs dominantes étant une carte par pixels de 25 x 25 m, on a travaillé ensuite à la

traduire en couche SIG* plus directement utilisable par le gestionnaire. Il s'agit d'une part de créer automatiquement des polygones de **types de peuplements homogènes caractérisés par une classe de hauteur** et, d'autre part, de les croiser avec les données stationnelles pour en déduire une carte de préconisations sylvicoles.

Le Lidar peut aider à cerner le capital sur pied...

Pour les peuplements de plus de 18 m, l'information de hauteur dominante seule ne suffit pas : il est nécessaire de l'accompagner du capital sur pied, de la composition et de la qualité. Si les deux derniers éléments nécessitent des observations de terrain, les premiers tests sur nos données Lidar laissent entrevoir des perspectives prometteuses concernant l'estimation de la surface terrière et de la biomasse.

Pour être pleinement utile aux gestionnaires, l'estimation du capital sur pied doit aussi renseigner sur les catégories de bois présentes (PB, BM, GB). Les études en cours sur la segmentation des couronnes des arbres ou des strates de peuplement devraient permettre de déterminer les tailles de houppier et d'en déduire les catégories de bois — à condition de développer pour les feuillus des outils aussi performants que pour les résineux. Les données Lidar pourraient permettre également de quantifier (en surface et hauteur) les trouées consécutives à la récolte d'arbres et affiner ainsi le suivi des régénérations, notamment dans les peuplements hétérogènes. De même, le nombre, la taille des trouées et la hauteur des peuplements environnants permettraient de calculer la distribution (en classes de gros-seur) de tiges prélevées. Cette distribution, mise en relation avec les fiches de martelage, donnerait un outil pour contrôler les coupes ainsi que

la cohérence des tarifs de cubage appliqués.

... et à mieux connaître la fertilité

À plus long terme, ces résultats ouvrent des perspectives pour une meilleure connaissance de la fertilité. Cette information nécessite habituellement de disposer de l'âge des peuplements, donnée difficile à obtenir et restant donc souvent très imprécise. La comparaison de deux campagnes Lidar offre la possibilité d'une approche de la fertilité sans avoir recours à l'âge, en étudiant les accroissements en hauteur dominante en fonction de la hauteur dominante initiale.

On pourrait alors « visualiser » les variations à fine échelle de la fertilité et du capital sur pied et disposer ainsi d'un outil d'optimisation des ressources et de la récolte. Par ailleurs, les chercheurs pourront tenter d'élucider ces variations de fertilité à la lumière d'autres informations : paramètres environnementaux ou anthropiques, utilisation des sols ancienne ou récente...

En conclusion

Ce projet permet d'ores et déjà de disposer d'une méthode de cartographie exhaustive et précise de hauteur dominante, y compris avec une faible densité de points Lidar. Cette carte permet d'identifier et caractériser très précisément les jeunes peuplements selon les stades de hauteur déterminants, ce qui constitue en soi un outil d'aide à la décision sans équivalent avec les méthodes de terrain.

Les perspectives semblent prometteuses pour caractériser les peuplements plus âgés, en particulier la surface terrière et la fertilité.

Les résultats ouvrent aussi de nouvelles voies pour concevoir, par télédétection et grâce au Lidar, des indices de productivité basés sur la hauteur, ce qui n'était pas possible jusque-là.

Vers une carte de hauteur dominante des peuplements en Moselle

Dans le cadre d'une coopération avec le Conseil Général de Moselle (CG57), l'Office National des Forêts (ONF) – Direction Territoriale de Lorraine s'apprête à valoriser une campagne Lidar départementale pour réaliser la première carte de hauteur dominante d'une telle étendue en France. Les termes de l'accord en préparation prévoient l'apport des données brutes par le CG57, données acquises initialement à d'autres fins dont la constitution d'un MNT départemental précis. En retour, l'ONF mettra à disposition du CG57 et de ses partenaires les résultats de l'étude, et adhèrera à la Charte de l'Information Géographique de Moselle, qui promeut les échanges de données géographiques au profit des intercommunalités et d'autres partenaires publics.

Une réalisation de cette envergure sur une surface forestière de 172 000 ha, au bénéfice de la forêt publique et privée, constitue un pas significatif dans l'appropriation et la valorisation des données Lidar aériennes. Elle représente également un défi technologique, qui impose aux forestiers de délaisser les méthodes de traitement de données artisanales adaptées à des massifs forestiers isolés, pour se lancer dans une exploitation à l'échelle industrielle, avec l'appui du département Recherche & Développement ONF et de partenaires extérieurs. Le coût total du projet, estimé entre 100 et 150 k€, ne prend pas en compte l'apport des données par le Conseil Général, mission déjà financée à hauteur de 940 k€ et destinée majoritairement à des applications dans le domaine de l'urbanisme.

La mission aérienne, conduite par les équipes de Topogéodis France (Groupe Geodis, République Tchèque), a été réalisée pour partie à l'été 2011 et sera achevée durant l'été 2012 ; les traitements pourront être réalisés à partir de cette date avec l'objectif de disposer de la carte définitive fin 2012. La prise de données de validation terrain est d'ores et déjà planifiée de février à avril 2012.

Cette opération permettra de disposer de données objectives sur l'état des jeunes peuplements, afin de dynamiser la sylviculture, axe majeur de la politique ONF ; elle apportera également une meilleure connaissance des gisements de biomasse liés aux premières éclaircies. Ces éléments ont vocation à profiter à toute la filière, du propriétaire forestier à la chaudière, en passant par les exploitants de travaux forestiers ; à cette fin les données résultantes seront mises en ligne sur la plateforme GéoSylva Lorraine : www.geosylva.lfn.fr. Par la suite sont envisagées des comparaisons date à date sur le même département, ou la généralisation à d'autres départements, sous réserve d'une démocratisation des données. Ceci suppose, outre la vulgarisation des techniques, une acquisition groupée mobilisant de nombreux acteurs dont l'État ou les collectivités, très largement au-delà de la seule filière bois.

Contact : Thomas Kochert. thomas.kochert@onf.fr

C'est un des arguments forts qui ont encouragé l'ONF à être l'un des instigateurs du projet FORESEE (*Forest Resource Estimation for Energy*) accepté par l'Agence nationale de la recherche à l'issue de son appel d'offres « Bioénergies 2010 ». Ce projet, qui regroupe les partenaires les plus pertinents en France dans le domaine de l'évaluation des ressources forestières⁽¹⁾, vise à fournir des méthodes et des outils pour estimer et cartographier la ressource forestière sur pied, ainsi que ses conditions d'exploitation (zones non bûcheronnables en montagne, desserte, accessibilité par rapport à la desserte), à l'échelle de grands massifs forestiers ou bassins d'approvisionnement.

Les acquis de tous ces travaux peuvent d'ores et déjà être mis en œuvre à l'échelle de massifs dont les enjeux justifient une campagne Lidar (grands forêts domaniales, forêts patrimoniales comme Verdun ou Val-Suzon, bassins d'approvisionnement d'un site de production de biocarburants, etc.). L'idéal serait évidemment de disposer d'une couverture généralisée : nos

résultats de Recherche & Développement mettent en évidence l'avantage considérable des données Lidar pour répondre entre autres aux divers engagements de la France liés à la ressource bois et, bien au-delà de la sphère forestière, le Lidar permet des avancées capitales dans tous les secteurs de l'aménagement du territoire. Aussi certaines collectivités songent-elles à acquérir la couverture LIDAR exhaustive de leur territoire et à la redistribuer aux partenaires intéressés, le coût étant alors acceptable pour toutes les parties. À moins qu'une stratégie de ce type ne se dessine au niveau national... ■

*Jérôme Bock, ONF, département recherche, Pôle de Chambéry.

**Jean-Pierre Renaud, Gregory Dez, Flora Martins, ONF, département recherche, Pôle de Nancy.

***Murielle Leroy, Service régional de l'Archéologie de Lorraine.

***Étienne Dambrine, Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers, INRA-Nancy

(Université de Savoie depuis juillet 2010).

***Jean-Luc Dupouey, Écologie et Écophysologie Forestières, INRA-Nancy

(1) Direction régionale des affaires culturelles.

(2) Une centrale inertielle est un système permettant de mesurer en temps réel l'inclinaison de l'avion par rapport au plan horizontal (roulis, tangage).

(3) La hauteur d'un arbre étant obtenue par différence entre l'altitude de son point haut et celle du point sol à sa verticale, des arbres situés au bord d'un fossé, par exemple, auraient pu induire une surestimation de la hauteur.

(4) Système d'information géographique.

(5) Cemagref, FCBA, IFN, IGN, INRA, ONF, UCFE et Sintégra, une PME spécialisée dans l'acquisition de données de télédétection aérienne. <http://www.fcba.fr/foresee/>

Bibliographie

■ Bock J., Vinkler I., Renaud J.-P., Duplat P., 2004. Stabilité au vent des hêtres : les enseignements de la tempête de 1999 dans le Nord-Est de la France. *Rendez-vous techniques de l'ONF* n°3, pp. 29-34.

■ Bock J., Dupouey J.L., Dambrine E., Georges-Leroy M., 2008. Les structures archéologiques et les peuplements de la forêt domaniale de Haye analysés par laser aéroporté. *Rendez-vous techniques de l'ONF* n° 20, pp. 15-18.

■ Rondeux J., Pauwels D., 1998. Le forestor Vertex : une nouvelle génération de dendromètre. *RTF* vol. 50, pp. 59-63.