

Rapport d'étude sur l'utilisation des données Lidar (Light detection and ranging) pour la caractérisation des milieux forestiers de Mayotte

Mots clés : Mayotte, Lidar, altimétrie Laser, modèle numérique, canopée, forêt, aménagement forestier, peuplements forestiers, structure verticale, dynamique forestière, surface terrière, volume, biomasse ligneuse.

Zone d'étude : Mayotte - Réserves forestières (périmètres en vert).



Résumé :

L'altimétrie Laser basée sur le principe de la technologie Lidar (Light detection and ranging) permet d'échantillonner à haute densité et résolution spatiale les éléments constitutifs d'un espace donné (sol et couvert).

Les modèles altimétriques dérivés : modèle numérique d'élévation (MNE), modèle numérique de terrain (MNT) et tout particulièrement le modèle numérique de hauteur (MNH) nous renseignent avec une précision submétrique sur l'organisation spatiale en trois dimensions des composantes des différentes formations végétales.

L'utilisation relativement récente de cette technologie dans le domaine forestier apporte des solutions inédites et probantes pour la description, l'analyse et la caractérisation du couvert forestier à grande échelle.

Les données dérivées du MNH par différentes méthodologies permettent l'élaboration de cartographies innovantes de différents paramètres dendrométriques comme la densité des arbres, le degré de fermeture du couvert forestier, la surface terrière, le volume de bois ou encore de la biomasse ligneuse.

Ces différentes informations illustrent les potentialités de l'utilisation de l'altimétrie Lidar pour cartographier et caractériser de manière objective le patrimoine forestier de Mayotte.

L'intégration de ces résultats dans l'élaboration des politiques d'aménagement durable, constitue un apport remarquable pour le gestionnaire qui dispose, dès lors, des éléments nécessaires pour évaluer dans le temps, l'impact des changements climatiques et des pressions anthropiques sans cesse croissantes.

Données sources : Orthophotographies, MNE, MNT et données Lidar brutes ©IGN 2008, données SIG, crédits photographiques et cartographies, Conseil Général de Mayotte - SRF/DARTM.

Auteur : D. LESUR, Service ressources forestières/DARTM - Conseil Général de Mayotte ©2011.

1. Introduction

Les réserves forestières de Mayotte au nombre de six couvrent près de 5650 ha soit 15% du territoire (appartenance $\frac{3}{4}$ département et $\frac{1}{4}$ Etat). Elles englobent les principaux reliefs de l'île : mont Hachiroungou, Combani, M'tsapéré, Choungui, et les monts Bénara et Bépilipili points culminants de l'île avec 660 et 640 mètres d'altitude respectivement.

Le couvert forestier de Mayotte est essentiellement circonscrit au domaine des réserves forestières et ne représente que 8 % de la surface de l'île. Ce domaine constitue les dernières zones refuges de la végétation naturelle et de biodiversité avec pas moins de 300 espèces de plantes ligneuses (arbres, arbustes et lianes) dont de nombreuses endémiques (19% d'endémisme régional).

Il s'inscrit dans un contexte biogéographique remarquable entre éléments malgaches et africains, alliant en fonction du gradient altimétrique, de la pluviométrie et de l'exposition, les étages de végétation de type submontagnard (forêts humides caractérisées par des essences sempervirentes) à subhumide (forêts sèches dominées par les types foliaires décidues).

Les derniers reliquats de la forêt naturelle humide représentée par un cortège d'espèces caractéristiques telles que le Barabay malandy (*Grisollea myrianthea*), le Mréguétréani (*Scolopia coriacea*), le Mchélélé (*Olea capensis*) entre autres, se rencontrent essentiellement à partir de 300 et 550 mètres d'altitude dans les réserves forestières de Majimbini et des Monts Bénara.

La réserve forestière de Sohoa et le massif de Dapani situé dans la réserve forestière des Crêtes du Sud, abritent les uniques formations de forêt de type mésophile de basse altitude.

Ces massifs marquent la transition avec la forêt sèche dont la composition est dominée par les essences comme le Nato (*Minupsos commorensis*), le Matiambelo (*Commifora arafy*) et le Sari Sakoa (*Poupartia gummifera*).

L'élément dominant du paysage forestier reste néanmoins, la forêt dite secondaire qui se réfère à tous les complexes de végétations ligneuses issus de différentes phases de déprise ou de reconstitution forestière du fait de l'action de l'homme (cultures sur brûlis, jachères forestières).

Ces formations qui représentent plus des $\frac{3}{4}$ de la surface forestière sont essentiellement constituées d'espèces végétales pionnières souvent d'origine exotique, telles que le Bois noir (*Albizia lebeck*), le Tulipier du Gabon (*Spathodea campanulata*), l'avocat marron (*Litsea glutinosa*) ou le manguier (*Mangifera indica*) qui peut constituer localement de véritable peuplement forestier.

La connaissance de ce milieu qui a subi de fortes pressions anthropiques est restée longtemps limitée en raison de la complexité de la mosaïque forestière et des difficultés à opérer par le biais de techniques d'inventaire traditionnelles.

L'acquisition des produits orthographiques et tout particulièrement la couverture des données « Lidar » de l'Institut Géographique National (IGN) réalisée en novembre 2008, a permis de renforcer de manière innovante et significative la connaissance de la structure de ce patrimoine dont la conservation, la gestion et la valorisation constituent un enjeu majeur de la politique de développement durable et de maintien des grands équilibres insulaires (protection des sols et ressources en eau).

2. La technologie Lidar

La technologie Lidar (Light detection and ranging) désigne une technologie développée dans les années 1990, d'acquisition aéroportée (avion ou hélicoptère) de données altimétriques de la surface terrestre. Elle se base sur la télémétrie Laser (Light Amplification by simulated Emission of Radiation) couplée à un système de géoréférencement spatiale (GPS).

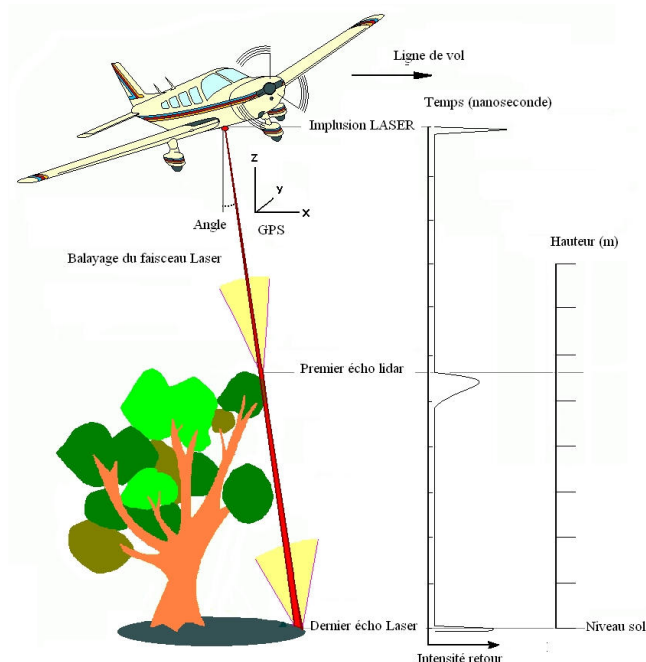


Fig. 1. Principe de l'altimétrie Lidar.

La mesure du temps entre l'émission du signal Laser hautement directionnel émis dans le domaine du proche infrarouge (900 à 1500 nanomètres) et sa réflexion sur la surface terrestre, permet de produire des données tridimensionnelles géoréférencées. Ces informations à haute résolution nous renseignent sur la topographie du terrain et les éléments de surface comme le couvert forestier avec une précision submétrique (figure 1).

Différents systèmes exploités à des fins commerciales ou de recherche sont actuellement utilisés : celui à retour d'onde continue qui exploite la différence de phase entre le signal reçu et celui émis et le système pulsé dénommé Lidar à retours discrets qui permet l'enregistrement d'au moins deux retours ou échos par impulsion. Ce dernier d'utilisation courante permet l'obtention d'un nuage de points bruts de la surface balayée, plus ou moins dense selon la cadence d'émission des impulsions du Laser (figures 2 & 3).

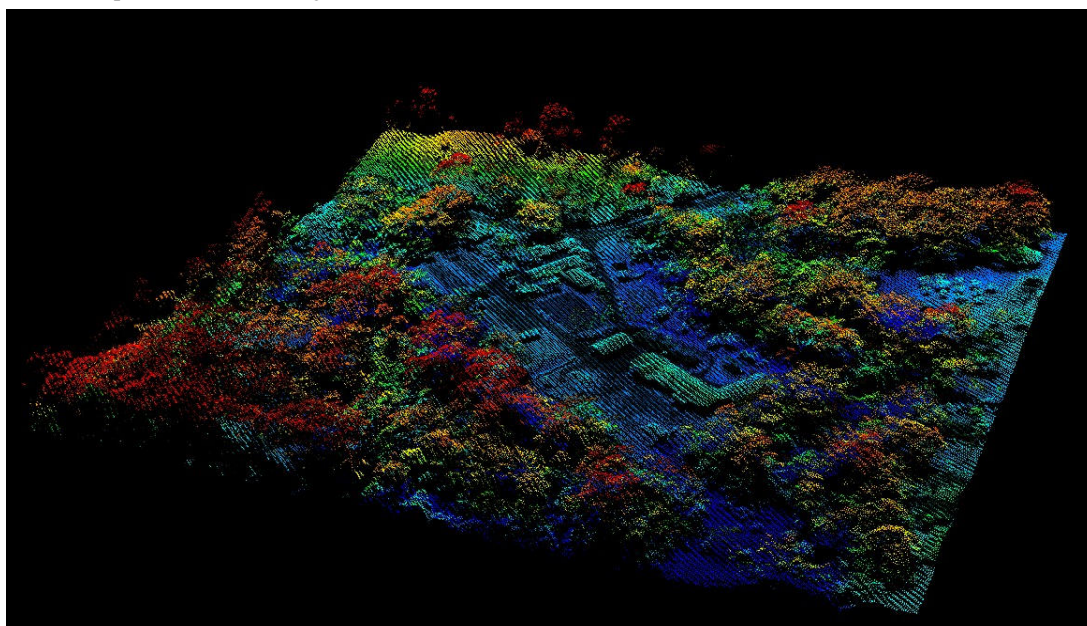


Fig. 2. Données brutes Lidar (coloration des points en fonction de l'élévation). Site DARTM de Coconi.

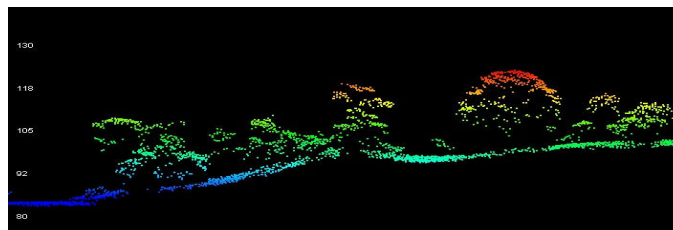


Fig. 3. Profil altimétrique des données brutes Lidar (coloration des points en fonction de l'élévation). Site DARTM de Coconi.

Cette technologie récente rendue opérationnelle à l'échelle de Mayotte grâce à l'IGN en novembre 2008, a permis d'obtenir une altimétrie de précision inégalée par rapport aux moyens optiques traditionnels pour l'extraction de la surface du terrain sous couvert végétal et l'étude du milieu forestier.

Elle constitue une opportunité remarquable pour palier aux difficultés d'inventaire de terrain (topographie, accessibilité, densité de la végétation) et permettre une approche synthétique de l'organisation spatiale et de la structure des formations végétales.

Outre les informations de géoréférencement, les derniers systèmes Lidar enregistrent l'intensité du retour du signal Laser et apportent une information complémentaire dépendant de la nature physique de la surface balayée. L'exploitation de ces données qui relèvent plus du domaine de l'analyse spectrale reste prometteuse mais cependant encore peu développée (figure 4).

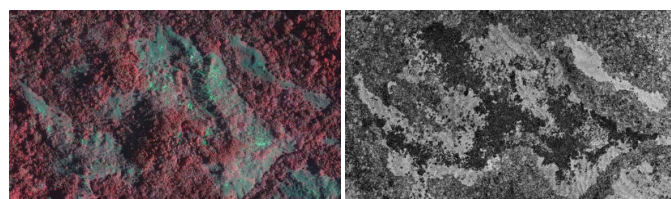


Fig. 4. Orthophotographie infrarouge ©IGN 2008 (gauche). Traitement de l'intensité du signal retour Lidar avec mise en évidence des boisements (en foncé) d'*Acacia mangium* (droite). Réserve forestière de Majimbini.

Les données Lidar sont stockées au format binaire « las ». Ce format optimise le volume des informations (coordonnées spatiales, intensité du retour, angle d'incidence des impulsions Laser et type de retour) par définition considérable compte du taux d'échantillonnage qui varie de 4 à 10 points par mètre carré. Pour la présente zone d'étude couvrant 82 dalles au format « las » de 1.5 sur 1.5 km de large, les données brutes Lidar représentent près de 394 millions de points d'informations géoréférencés.

3. Les différents modèles altimétriques

Les données brutes Lidar traitées et converties au format raster en utilisant des matrices (grilles régulières de dimensions variées selon la précision recherchée), permettent de produire les différents modèles altimétriques couramment utilisés, à savoir ; le modèle numérique d'élévation, le modèle numérique de terrain et le modèle numérique de hauteur (figure 5).

La précision spatiale de ces modèles numériques dépend du type d'algorithme utilisé pour l'interpolation des points bruts Lidar et de la résolution du format raster choisie en sortie. La densité d'échantillonnage des points Lidar permet aisément la production de produits raster dont la résolution spatiale (x, y), c'est-à-dire la taille du pixel de l'image est de l'ordre de 1 mètre.

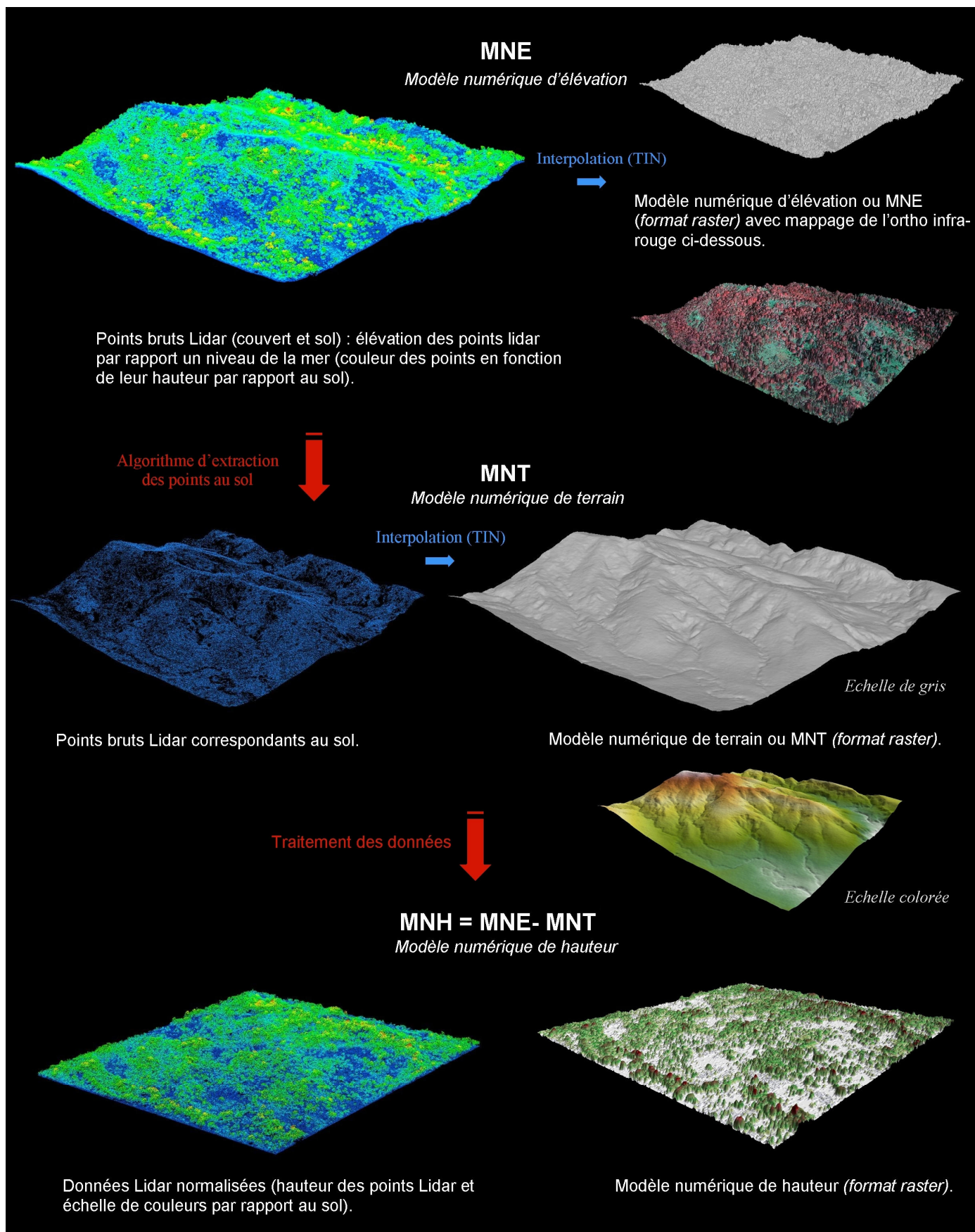


Fig. 5. Illustration de la chaîne de production des différents modèles altimétriques.

Modèle numérique d'élévation (MNE)

Les points acquis par altimétrie Laser (données brutes au format vecteur) doivent faire l'objet de traitements préalables qui visent à éliminer les données aberrantes relativement fréquentes (artefacts lors de la prise de mesures) qui altéreraient de manière significative l'interprétation des résultats.

Ces informations données sous forme de nuage de points tridimensionnelles sont ensuite traitées par des méthodes d'interpolation basées sur les réseaux de triangles irréguliers (TIN ou Triangulated Irregular Network) dont le résultat détermine le modèle numérique d'élévation (auss appelé de surface) ou MNE (figure 6).

Le MNE nous informe sur l'élévation absolue du sol et des éléments de surface par rapport au niveau de la mer (élévation).

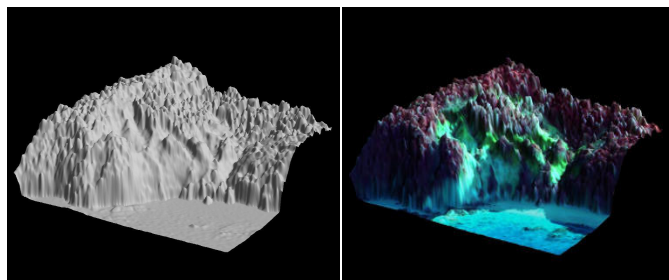


Fig. 6. Modèle numérique d'élévation (gauche). Modèle numérique d'élévation avec mappage de l'orthophotographie infrarouge ©IGN 2008 (droite). Padza de la zone côtière Sud-Ouest de la réserve forestière de Sohoa.

Modèle numérique de terrain (MNT)

L'extraction des échos au sol des données brutes Lidar par le biais d'algorithmes de classification, permet de calculer l'élévation du sol « nu » par rapport à la mer.

La qualité du MNT dépend néanmoins de la nature même de l'environnement, c'est-à-dire de la complexité de la topographie existante (gradient et rugosité du relief) et du degré de fermeture du couvert végétal qui déterminent la densité d'échantillonnage des échos Lidar atteignant le sol « nu ».

Pour les besoins de l'étude, l'extraction des points au sol a été réeffectuée sur l'ensemble de la zone d'intérêt en utilisant l'approche surfacique développée par Kraus & Pfeifer, (1998).

L'interpolation (TIN ou Triangulated Irregular Network) des points classifiés « sol » permet d'obtenir un MNT au format raster (image) de haute définition et de précision submétrique, à même de décrire la micro-topographie du sol, jusqu'alors inaccessible sous couvert forestier (figure 7).

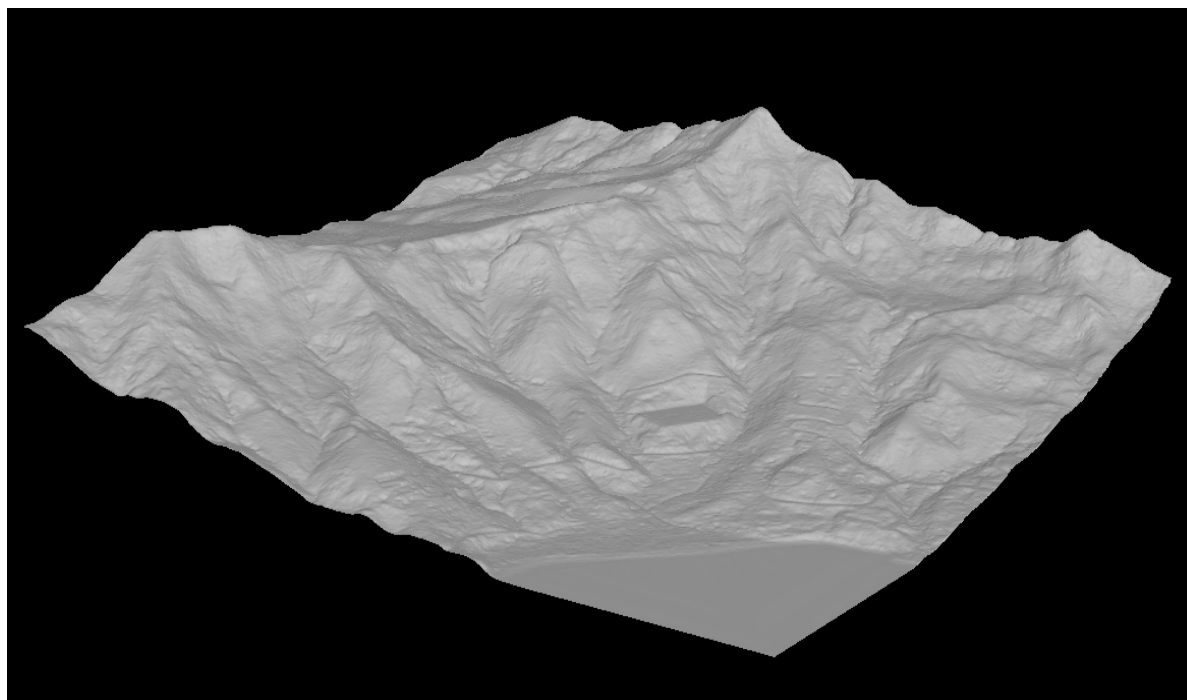


Fig. 7. Modèle numérique de terrain (résolution 1m). Nord-Est de Mayotte - Village de Mzamboro.

Le MNT ainsi obtenu permet également d'accéder facilement à des informations topographiques complémentaires d'intérêt majeur, à savoir pour l'essentiel (figure 8) :

- ◆ Carte de rendu du relief ;
- ◆ Carte des pentes et des courbes de niveaux ;
- ◆ Carte du réseau hydrographique et bassins versants ;
- ◆ Carte des orientations.

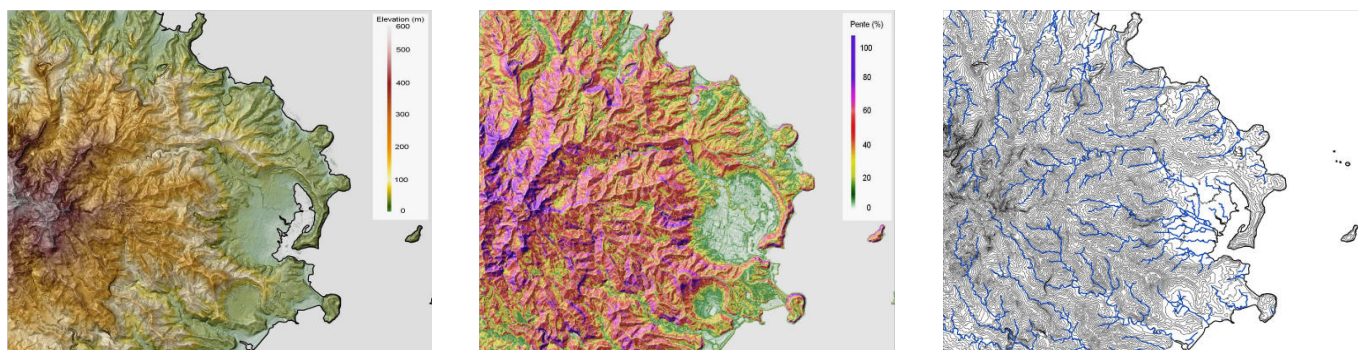


Fig. 8. Modèle numérique de terrain, échelle colorée avec effet de rendu du relief (gauche). Carte des pentes (centre). Courbes de niveaux et réseau hydrographique (droite). Site de Mamoudzou.

Modèle numérique de hauteur (MNH)

La hauteur du couvert forestier est calculée avec précision en soustrayant le MNT au MNE au format raster.

La surface ainsi obtenue représente un modèle numérique de hauteur ou MNH (figure 9). En milieu forestier, il informe directement sur la hauteur de la canopée, c'est à dire sur la hauteur des éléments constitutifs des formations végétales par rapport à la surface du sol (figures 11 & 12).

En raison des particularités de la zone d'étude (topographie et densité d'échantillonnage des échos Lidar en milieu forestier fermé), l'utilisation du MNT calculé à partir des données brutes Lidar a été préféré à celle du MNT livré à l'origine. Ce choix a permis de corriger et d'améliorer de manière significative la précision altimétrique et la qualité du rendu de la canopée, indispensables à l'interprétation du MNH (figures 10a & 10b).

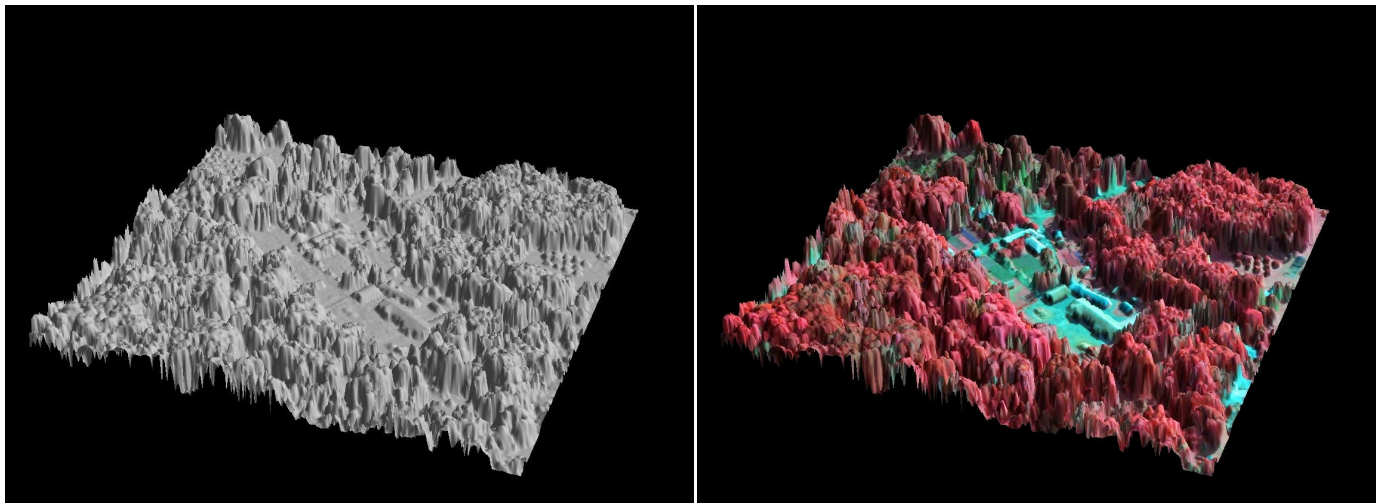


Fig. 9. Modèle numérique de hauteur de canopée (gauche). Modèle numérique de hauteur de canopée avec mappage de l'orthophotographie infrarouge ©IGN 2008 (droite). Site DARTM de Coconi.

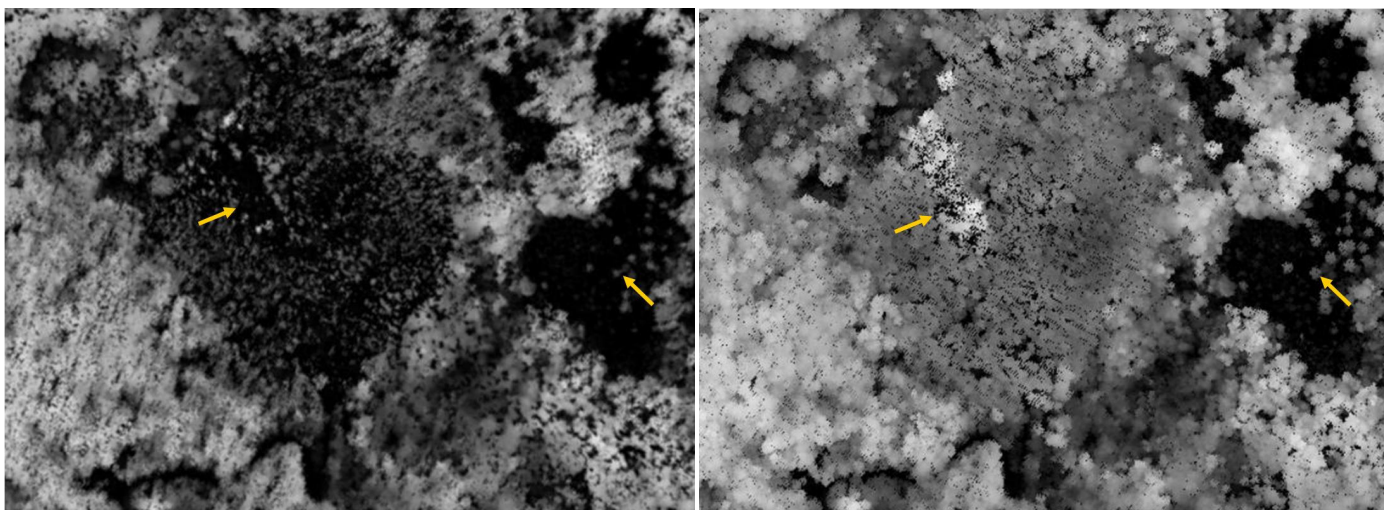


Fig. 10a. Modèle numérique de hauteur de canopée obtenu sur la base du MNT raster d'origine (gauche). Modèle numérique de hauteur de canopée obtenu sur la base du MNT extrait à partir des données brutes Lidar (droite). Les flèches indiquent à titre d'exemple des zones de différences significatives. Réserve forestière des Mts Bénara.

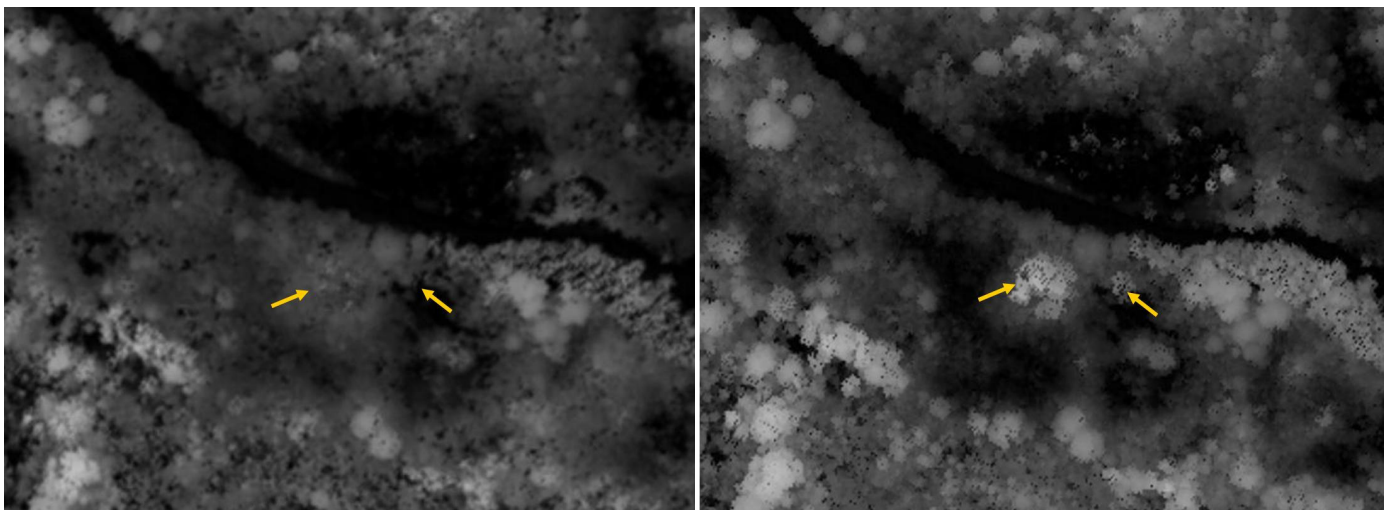


Fig. 10b. Modèle numérique de hauteur de canopée obtenu sur la base du MNT raster d'origine (gauche). Modèle numérique de hauteur de canopée obtenu sur la base du MNT extrait à partir des données brutes Lidar (droite). Les flèches indiquent à titre d'exemple des zones de différences significatives. Réserve forestière de Songorombili.

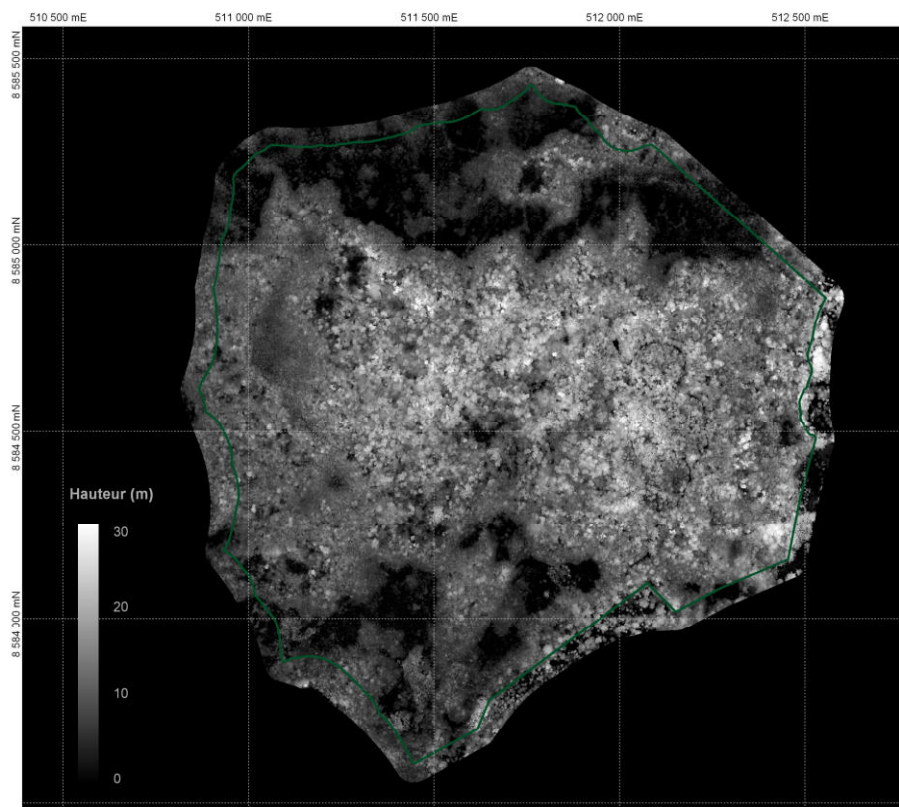


Fig. 11. Modèle numérique de hauteur de canopée ou MNH (échelle de gris). Réserve forestière de Sohoa.

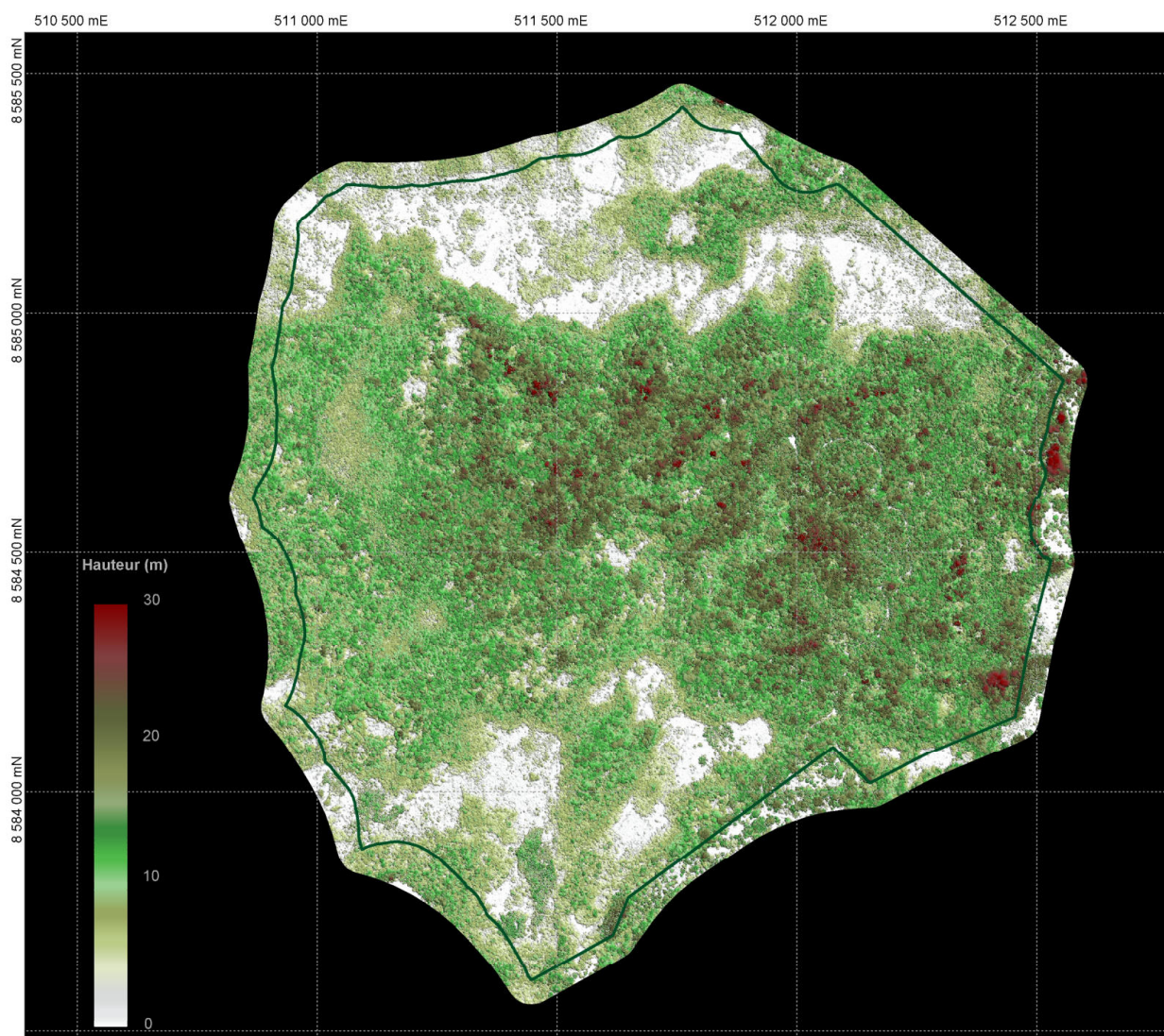


Fig. 12. Modèle numérique de hauteur de canopée ou MNH (échelle de couleurs). Réserve forestière de Sohoa.

4. L'analyse des données Lidar

4.1. Principales méthodologies

Analyse du MNH (format raster)

Détection des sommets

La détection ou l'extraction des sommets consiste à identifier individuellement les arbres formant le toit de la canopée. Elle permet de déduire à l'échelle de l'arbre certains paramètres dendrométriques comme le diamètre du tronc à hauteur de poitrine ou la largeur de la couronne en utilisant les relations allométriques entre ces paramètres et la hauteur de l'arbre.

Ce processus de traitement du MNH repose sur la méthode des maxima locaux (Popescu et al., 2002). Il s'agit d'une technique d'extraction des points correspondant à la cime des arbres. Le MNH doit être préalablement lissé (filtrage médian, moyen ou gaussien) pour obtenir une représentation optimale des houppiers et éviter une surdétermination de sommets qui ne seraient pas des éléments constitutifs de la canopée.

Le pourcentage d'arbres correctement localisés par la méthode des maxima locaux (de l'ordre de 70% en milieu forestier fermé) dépend de nombreux facteurs liés à la morphologie des houppiers, à la position sociale des arbres (dominants, co-dominants) et à la qualité du modèle source (densité d'échantillonnage des points Lidar). La qualité des résultats dépend d'un choix approprié des paramètres de l'algorithme d'analyse qui doivent être nécessairement calibrés et validés sur la base de placettes d'échantillonnage de terrain.

Les positions des individus ainsi déterminés permettent d'extraire sur la base du MNH d'origine, la hauteur précise des arbres, c'est à dire les points correspondant à l'apex morphologique des arbres soit le point le plus élevé de la couronne des arbres (figures 13 & 14).

Les résultats obtenus au format vecteur permettent d'estimer ensuite la surface terrière et le volume au niveau de l'arbre ou du peuplement en traitant les données à l'aide d'une grille d'analyse correctement dimensionnée (voire section Analyses statistiques des points bruts Lidar).

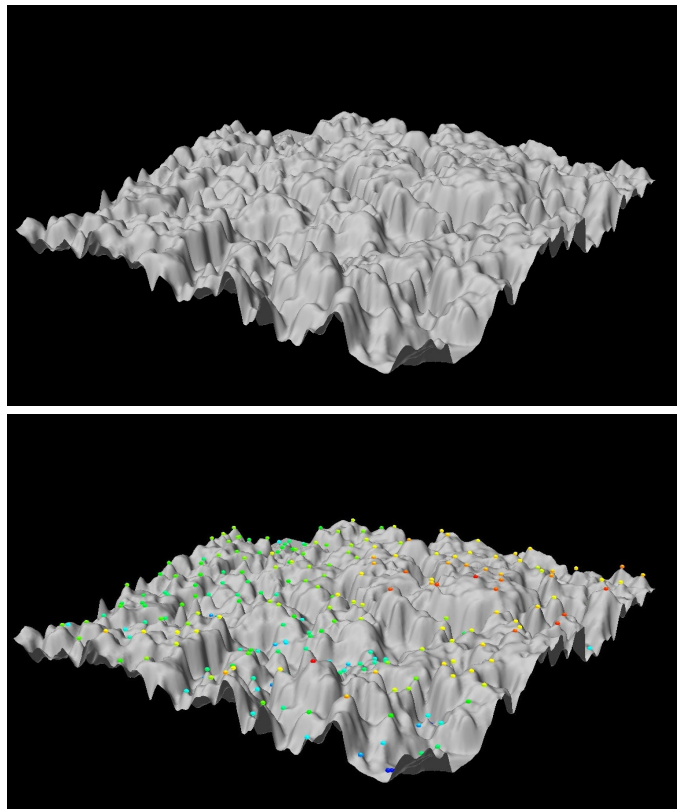


Fig. 13. Modèle de hauteur de canopée (gauche). Modèle de hauteur de canopée avec la localisation des apex (droite). Site de Coconi.

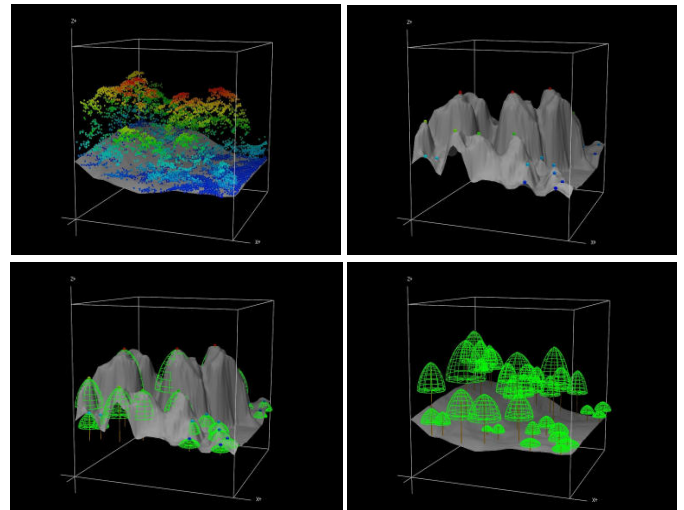


Fig. 14 .Exemple de reconnaissance de sommets avec modélisation des couronnes ; points bruts Lidar (haut gauche), modèle de canopée et localisation des apex (haut droite), modèle de canopée et modélisation des couronnes en fonction des apex (bas gauche), modélisation des couronnes seules (bas droite). Site de Coconi.

Segmentation

Le MNH informe sur la hauteur du couvert mais offre également une information précise sur la texture du toit de la canopée.

La technique dite du seuillage ou de segmentation du MNH raster permet, en fonction de la hauteur et la texture du MNH, une délimitation précise des limites et des régions élémentaires constitutives des peuplements forestiers (figure 15).

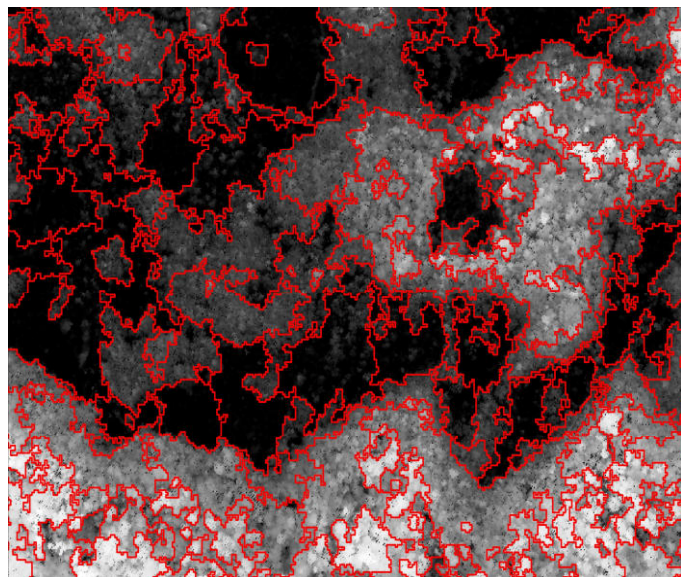


Fig. 15. Exemple de segmentation du modèle numérique de hauteur. Zone Nord de la Réserve forestière de Sohoa.

Ce processus permet une délimitation fine des structures forestières homogènes, sur la base de critères spectraux (valeur du pixel) et spatiaux simples (compacité) et d'un facteur d'échelle qui permet d'agréger le résultat de la segmentation (forme et complexité) en fonction du niveau d'analyse souhaité.

Le découpage obtenu au format vecteur peut ensuite servir de base à l'analyse statistique des données Lidar normalisées (données au format vecteur) et permettre notamment l'élaboration d'une cartographique fine des peuplements forestiers sur la base de l'unité spatiale obtenue (voire section Caractérisation des peuplements forestier).

Analyses statistiques des points bruts Lidar

Le modèle numérique de hauteur au format raster est couramment utilisé pour interpréter et analyser les données de hauteur de la canopée. Il s'agit néanmoins d'un produit raster filtré et lissé, obtenu par interpolation des points Lidar correspondant au toit de la canopée. Il ne conserve pas l'information sur les échos Lidar interceptés par le sous-étage.

Afin de conduire l'analyse statistique de la distribution des hauteurs, il est indispensable de se baser sur l'utilisation des points bruts Lidar figurant la hauteur de chaque élément du couvert végétal par rapport au sol, c'est-à-dire les données Lidar normalisées.

Ces informations permettent d'analyser et caractériser avec précision la structure verticale du couvert forestier à l'échelle du peuplement.

Statistiques locales à l'aide d'une grille d'analyse

L'analyse statistique du nuage de points bruts (données Lidar normalisées) se fait à travers un découpage horizontal régulier (grille ou matrice d'analyse). Les dimensions de cette grille doivent être calibrées (de l'ordre de 15 à 20 m) en fonction de la largeur effective des houppiers pour que les résultats soient le moins possible, affectés par les données à l'échelle de l'arbre (figure 16).

Les principaux critères étudiés sont la hauteur minimum, la hauteur maximum, la hauteur moyenne, le mode de la hauteur, l'écart type, la variance, le coefficient d'asymétrie, le coefficient d'aplatissement (kurtosis), la déviation absolue moyenne, les percentiles, le taux de retour des impulsions (couvert), l'indice de rugosité de la canopée et l'indice de complexité vertical (voire tableau 1).

Ces critères sont disponibles sous forme d'une grille de données au format vecteur qui servira de base à l'analyse par régression ou après interpolation, permettra l'élaboration de cartographies thématiques (voire section Cartographie des principaux indicateurs forestiers).

La grille d'analyse peut également servir à l'analyse du nuage de points bruts par strates de hauteurs prédéterminées afin d'obtenir un découpage vertical discret de la canopée.

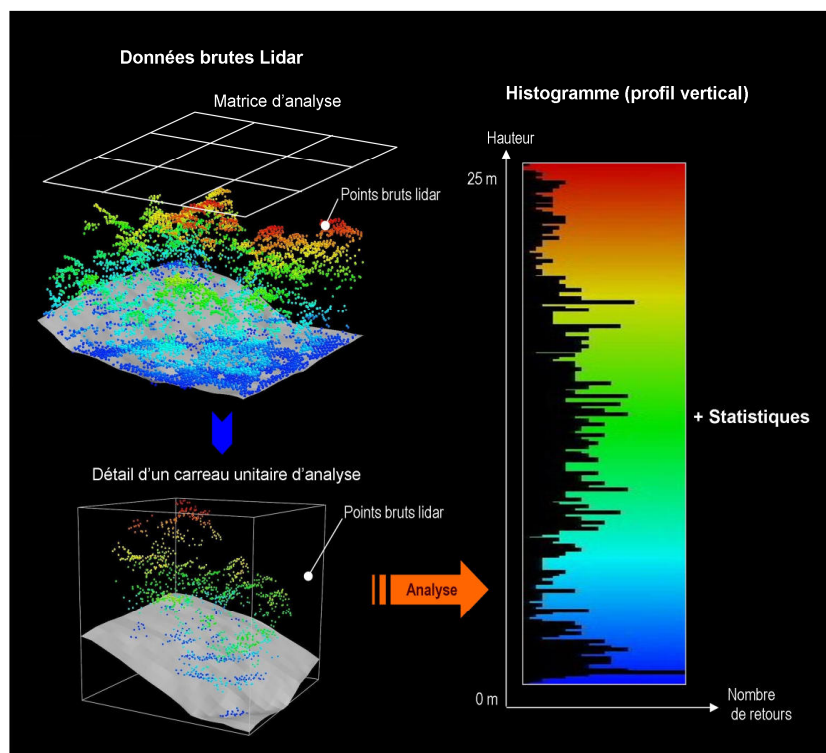


Fig. 16. Principe simplifié de l'analyse statistique des points bruts Lidar.

Cette procédure permet de caractériser en fonction des profils obtenus les stades dynamiques du couvert forestier (voire section Indicateurs de structure forestière), c'est-à-dire de différencier une structure verticale complexe, multi-stratifiée, ou simple comme dans le cas des jeunes peuplements forestiers issus de régénérations naturelles ou obtenus par plantations.

L'analyse de la distribution des classes de hauteur fournie par le MNH constitue une première information de nature à nous renseigner sur la normalité des distributions. Elle permet notamment de discriminer en fonction de la hauteur moyenne, de la médiane et de l'écart type, certaines différences ou particularités propres à chaque massif forestier (figure 17).

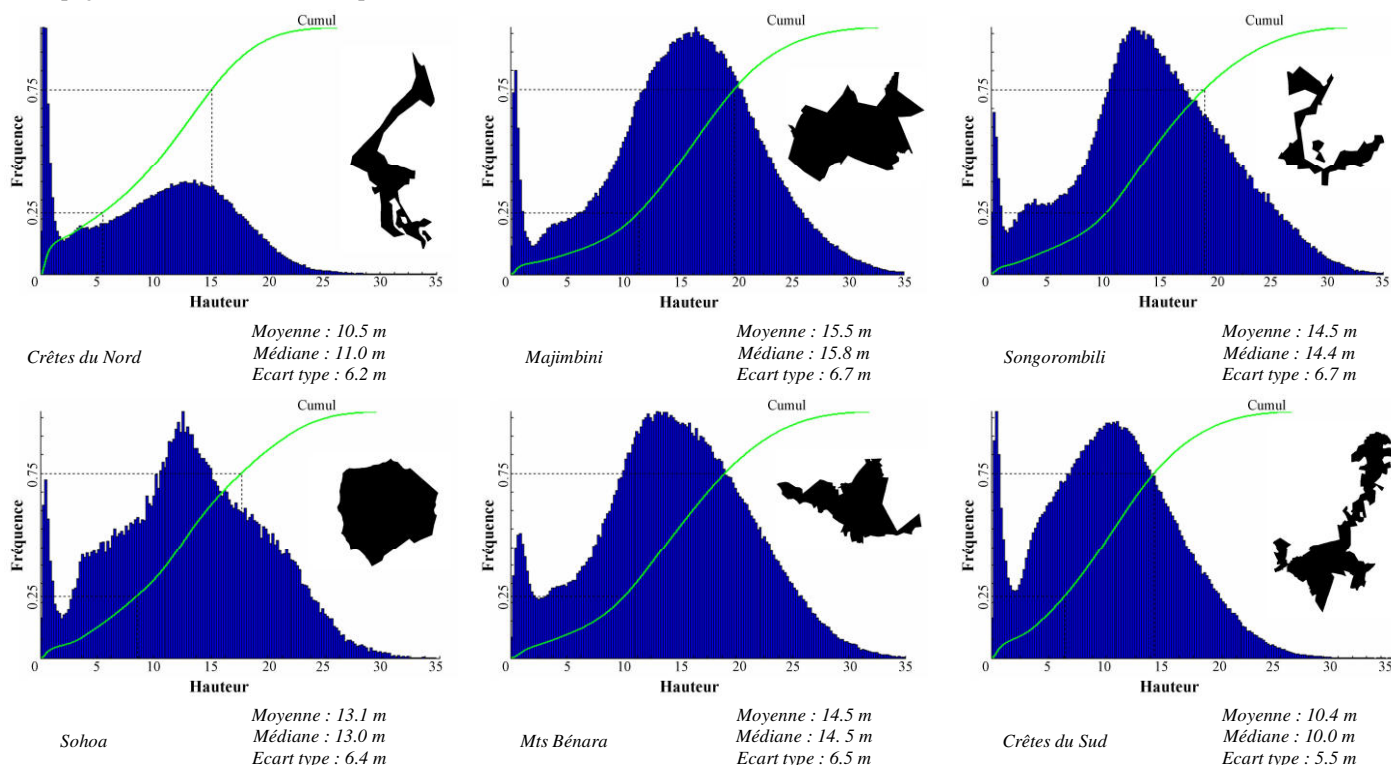


Fig. 17. Distribution des hauteurs de canopée par réserves forestières.

Indicateurs forestiers dérivés de l'analyse statistique

Un certain nombre de paramètres dendrométriques ou indicateurs forestiers peut être corrélé avec les résultats statistiques de la distribution de la hauteur des points Lidar, par l'utilisation de systèmes d'équation de régression linéaire multiple et/ou de fonctions allométriques qui expriment la corrélation entre des caractéristiques physiques ou biologiques (figure 18).

Ces méthodes exploratoires utilisées pour déterminer au final la surface terrière, le volume et la biomasse ligneuse nécessitent que les systèmes d'équation déterminés soient préalablement calibrés et corrélés à partir de placettes échantillons sur le terrain, avant d'être généralisés à l'ensemble de la grille de données (tableau 1).

Il s'agit de fonctions prédictives. Elles ne peuvent rendre compte des propriétés biophysiques du couvert forestier, des variations et relations complexes au sein d'un même peuplement qui dépendent de la station, de la nature des essences (caractéristiques physiologiques), du statut social de l'arbre ou bien encore de son âge.

Les résultats obtenus sont suffisamment pertinents avec les constats de terrain pour valider ces approches méthodologiques et permettre une caractérisation objective du couvert forestier à l'échelle du peuplement.

Les données obtenues constituent également des valeurs absolues dans l'espace et le temps qui permettent, à terme, la conduite d'analyses entre deux situations ou périodes d'inventaire.

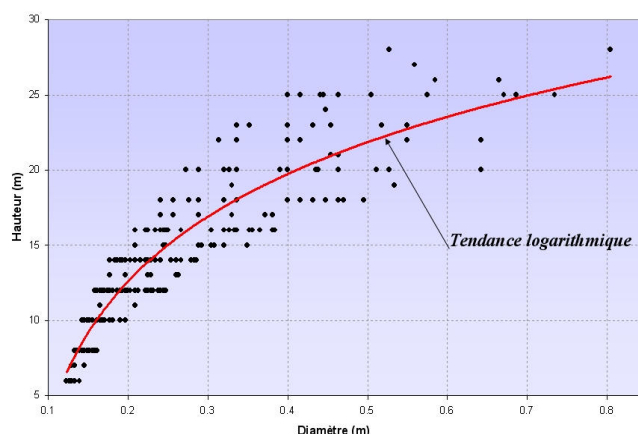


Fig. 18. Relation allométrique entre diamètre et hauteur des arbres d'un peuplement.

Tableau 1. Variables de l'analyse statistique :

Paramètres statistiques initiaux (I), données dérivées par : méthode de détection des sommets (II), équations de régression linéaire multiple (III).

I	Minimum	Minimum des valeurs de hauteur (m).	
	Maximum	Maximum des valeurs de hauteur (m).	
	Moyenne (Hmoy)	Moyenne arithmétique des valeurs de hauteur :	$\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$ N : effectif total, x_i : hauteur de l'individu (m).
	Mode	Le mode représente la valeur dominante, c'est à dire la valeur la plus représentée d'une distribution de valeurs (hauteur).	
	Ecart type et variance (Hvar)	L'écart type ou la variance (carré de l'écart type) caractérise la dispersion des valeurs de hauteur autour de la moyenne.	
	Coefficient d'asymétrie (skewness en anglais)	Ce coefficient caractérise le degré d'asymétrie d'une distribution des valeurs (hauteur) par rapport à sa moyenne.	
	Coefficient d'aplatissement ou kurtosis	Ce coefficient caractérise l'aplatissement (la forme de pic) de la distribution des valeurs (hauteur) par rapport à une distribution statistique théorique.	
	Coefficient de variation	Mesure de la dispersion relative soit le rapport entre l'écart type et la moyenne.	
	Déviation absolue moyenne	La déviation absolue moyenne est la moyenne de la valeur absolue des écarts à la moyenne. Autrement dit, c'est la distance moyenne à la moyenne :	$\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i - \bar{x} $ N : effectif total, x_i : hauteur de l'individu (m), \bar{x} : moyenne des hauteurs (m).
	Centile (Hp01, Hp05, ...)	Un centile ou percentile représente 1/100 de l'échantillon de population. Les centiles sont calculés pour les valeurs suivantes : 1 ^{er} , 5 ^e , 10 ^e , 20 ^e , 25 ^e , 30 ^e , 40 ^e , 50 ^e , 60 ^e , 70 ^e , 75 ^e , 80 ^e , 90 ^e , 95 ^e et 99 ^e centiles.	
II	Couvert de la canopée (Cov)	Ratio du nombre de retours au dessus d'une hauteur spécifiée (généralement 3 à 6 m pour éviter la prise en compte de la végétation arbustive) par rapport au nombre de retours ayant atteint le sol (%).	
	Indice de rugosité de la canopée (Ir)	Ratio de la surface de la canopée (MNH) par rapport à celle du sol.	
	Indice de complexité verticale de la canopée ou (VCI pour Vertical Complexity Index en anglais)	$\frac{\sum_{i=1}^{N_s} N_i \cdot \ln(N_i)}{\ln(N_s)}$	N_s : Nombre de strates verticales considérées, N_i : Effectifs de retours pour chaque strate de hauteur considérée.
	Diamètre ($d_{1.3m}$ ou dhp)	Fonctions allométriques : $d_{1.3m} = a \cdot \exp(b \cdot h)$ $h = a \cdot \ln(d_{1.3m}) + b$	h : hauteur totale de l'arbre (m), $d_{1.3m}$: diamètre à 1.3 m de hauteur ou hauteur d'homme (dhp), a et b : paramètres du modèle.
	Couronne (largeur de la)	Fonction allométrique : $a_0 + a_1 \cdot h + a_2 \cdot h^2 + a_3 \cdot h^3$	h : hauteur totale de l'arbre (m), a_0, a_1, a_2, a_3 paramètres du modèle.
III	Surface terrière (g ou G)	Pour un arbre (m^2) : $g = \frac{\pi \cdot d_{1.3m}^2}{4}$ Pour un peuplement (m^2/ha) : $G = \sum n_i \cdot g_i$	$d_{1.3m}$: diamètre à 1.3 m de hauteur (m), n_i : nombre d'arbre par hectare, g_i : surface terrière individuel des n_i arbres (m^2).
	Volume sur pied (v ou V)	Formules de cubage en « bloc » : Pour un arbre (m^3) : $v = \frac{\pi \cdot d_{1.3m}^2}{4} \cdot h \cdot f = g \cdot f \cdot h$ Pour un peuplement (m^3/ha) : $V = G \cdot F \cdot H$	$d_{1.3m}$: diamètre à 1.3 m de hauteur (m), g, G : surface terrière de l'arbre, du peuplement (m^2/ha), f, F : coefficient de forme moyen de l'arbre, du peuplement, h, H : hauteur totale moyenne de l'arbre, du peuplement (m), v, V : hauteur totale moyenne de l'arbre, du peuplement (m^3/ha).
	Biomasse ligneuse aérienne ou (AGB pour Above Ground Biomasse en anglais)	Fonction allométrique (AGB en kg) : $d \cdot \exp(a_0 + a_1 \cdot \ln(d_{1.3m}) + a_2 \cdot \ln(d_{1.3m})^2 + a_3 \cdot \ln(d_{1.3m})^3)$	d : densité spécifique moyenne du bois (g/cm^3), a_0, a_1, a_2, a_3 : paramètres du modèle, $d_{1.3m}$: diamètre à 1.3 m de hauteur en m.
	G, V et AGB	Expression générale : $a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n$ Modèle de données retenu pour le calcul de G (m^2), Vg (m^3) et AGB (tonnes) : $a_0 + a_1 \cdot Hmoy + a_2 \cdot Hvar + a_3 \cdot Hp05 + a_4 \cdot Hp10 + a_5 \cdot Hp80 + a_6 \cdot Hp95 + a_7 \cdot Cov + a_8 \cdot Ir$	x_1, x_2, \dots, x_n données du modèle, a_0, a_1, \dots, a_n paramètres du modèle (pour chaque estimation).

4.2. Cartographie des principaux indicateurs forestiers

L'interpolation (TIN ou IDW) de certain paramètre statistique et des données dérivées permet la production de cartographies prédictives de différents indicateurs dendrométriques comme la hauteur moyenne, la densité, le taux de fermeture ou couvert forestier, la surface terrière, le volume et la biomasse ligneuse.

Hauteurs

La cartographie de la hauteur moyenne nous renseigne sur l'homogénéité de la canopée à l'échelle du peuplement.

Elle constitue une cartographie de référence pour identifier et délimiter les grands ensembles forestiers (figure 19).



Fig. 19. Cartographie de la hauteur moyenne de la canopée. Réserve forestière de Majimbini.

L'utilisation du mode de la hauteur, c'est à dire de la hauteur la plus fréquemment représentée, complète l'information donnée sur la hauteur moyenne. Elle apporte, par exemple, des précisions de nature à identifier et délimiter avec précision les anciennes traces d'occupations ou les zones de forêts secondarisées (figure 20 & 21).

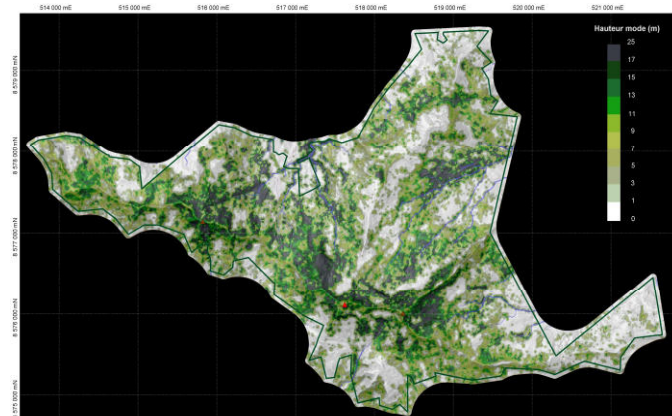


Fig. 20. Cartographie du mode hauteur de la canopée. Réserve forestière des Mts Bénara.



Fig. 21. Limite du Padza de Kombéni (contour jaune), orthophotographie 1949 (gauche). Replot sur l'orthophotographie infrarouge 2008 (centre) et sur la cartographie du mode hauteur (droite). Réserve forestière des Mts Bénara.

Densité

L'estimation de la densité, c'est-à-dire le nombre d'arbres (arbres comptables) ramené à l'hectare, repose essentiellement sur la détection des sommets. Elle nous renseigne sur l'organisation et la position sociale des arbres et leurs contributions à la surface terrière ou au volume sur pied (figure 22).

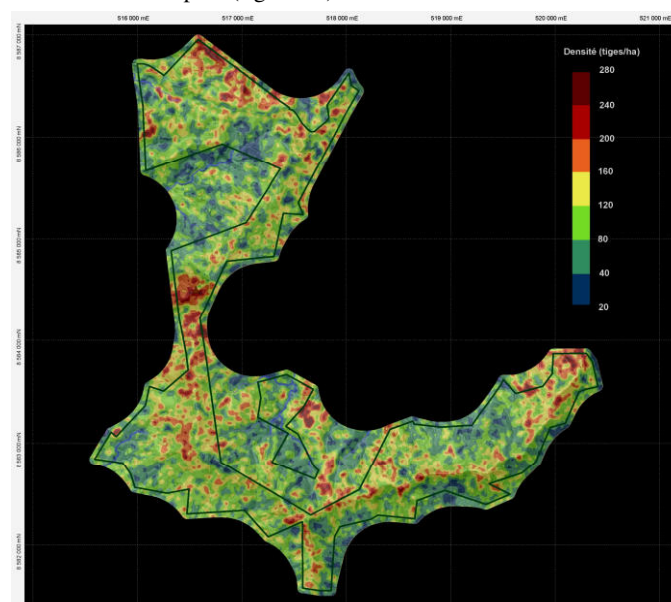


Fig. 22. Cartographie prédictive de la densité des arbres (tiges/ha). Réserve forestière de Songorombili.

Couvert

L'analyse du taux de pénétration des impulsions Laser, c'est-à-dire le rapport des points bruts ayant atteint le sol par rapport au nombre de points bruts interceptés par le couvert forestier à une hauteur spécifiée (généralement fixée à la limite de hauteur entre strate arbustive et arborée), nous permet de établir la cartographie prédictive du degré de fermeture ou couvert (figure 23).

Cet indicateur nous informe sur la quantité de lumière arrivant au sol et par conséquent, sur l'état des strates en sous-étage. Un couvert fermé indiquera, par exemple, l'établissement limité de strates arbustives mais également, l'absence de régénération naturelle à même d'assurer le renouvellement des peuplements.

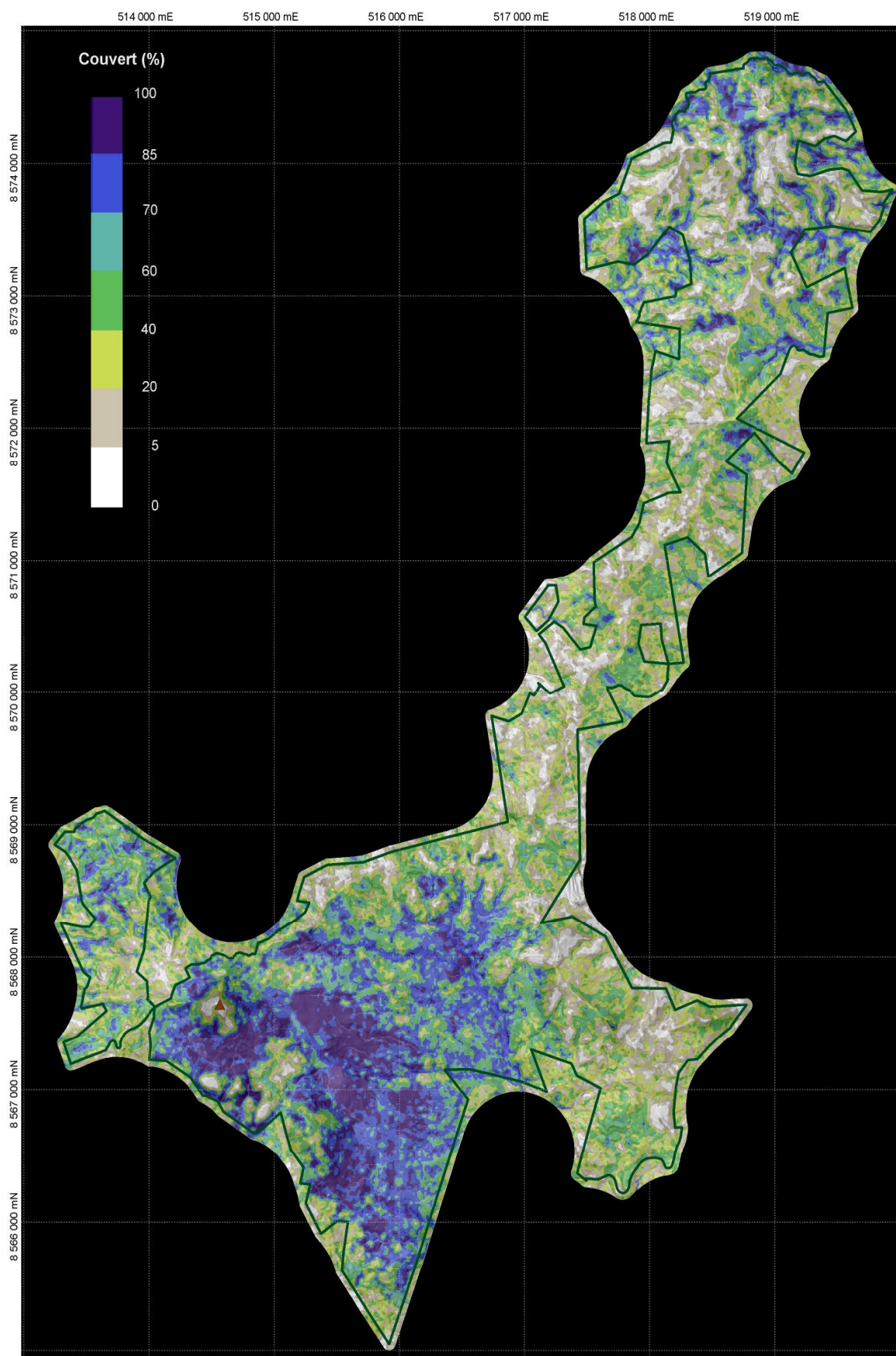


Fig. 23. Cartographie prédictive du couvert forestier (degré de fermeture de la canopée en %). Réserve forestière des Crêtes du Sud.

Surface terrière

La surface terrière d'un peuplement (G) correspond à la somme de la section des troncs sur un hectare et s'exprime en m^2/ha . Elle correspond à la sommation des surfaces terrières g (à 1.30 m de hauteur) des n arbres constituant le peuplement. C'est un paramètre dendrométrique important qui permet d'estimer la richesse d'un peuplement et notamment son volume.

Les valeurs prédictives de surface terrière (figure 24) correspondent à des moyennes ramenées à l'hectare et ne peuvent traduire les variations intrinsèques liées à la distribution réelle des tiges par catégories de diamètre sur le terrain.

Volume et biomasse ligneuse

L'estimation de la surface terrière moyenne permet de déduire à l'aide d'une formule de cubage dite en « bloc » associant la hauteur moyenne et le paramètre de forme (coefficient de forme donné à l'échelle du peuplement) une évaluation précise du volume de bois sur pied.

L'estimation des volumes sur pied ne considère que la strate dominante au détriment des strates inférieures (arbres dominés). Néanmoins, le taux d'erreur reste relativement acceptable du fait que les arbres constituant le toit de la canopée représentent dans le calcul du volume un poids déterminant.

Le volume sur pied est une donnée essentielle dans l'aménagement des forêts présentant un caractère de production. Dans le cas de formations naturelles dont l'exploitation ne constitue pas un objectif absolu, on peut préférer à cette valeur, l'estimation de la biomasse ligneuse aérienne (figure 25).

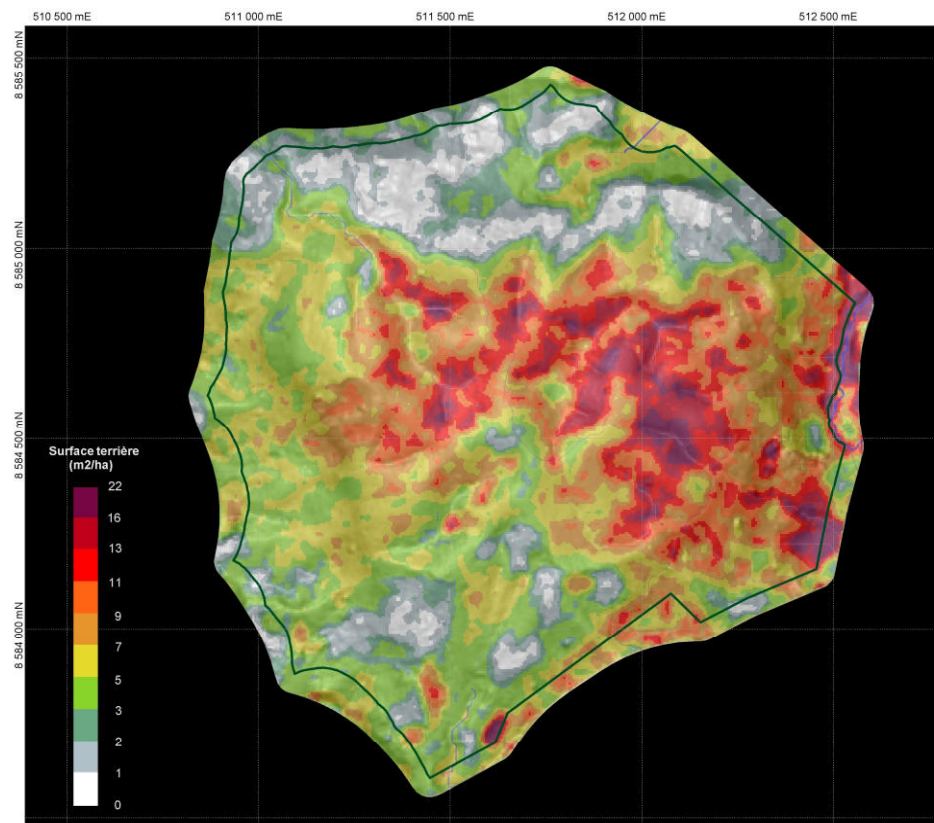


Fig. 24. Cartographie prédictive de la surface terrière (m^2/ha). Réserve forestière de Sohoa.

L'estimation de la biomasse ligneuse aérienne basée sur les modèles d'équation allométrique développés par Chave et al. (2005) en milieu tropical humide, constitue un indicateur précieux pour évaluer le rôle de la forêt dans la séquestration du carbone et son impact dans le cadre des changements climatiques mondiaux.

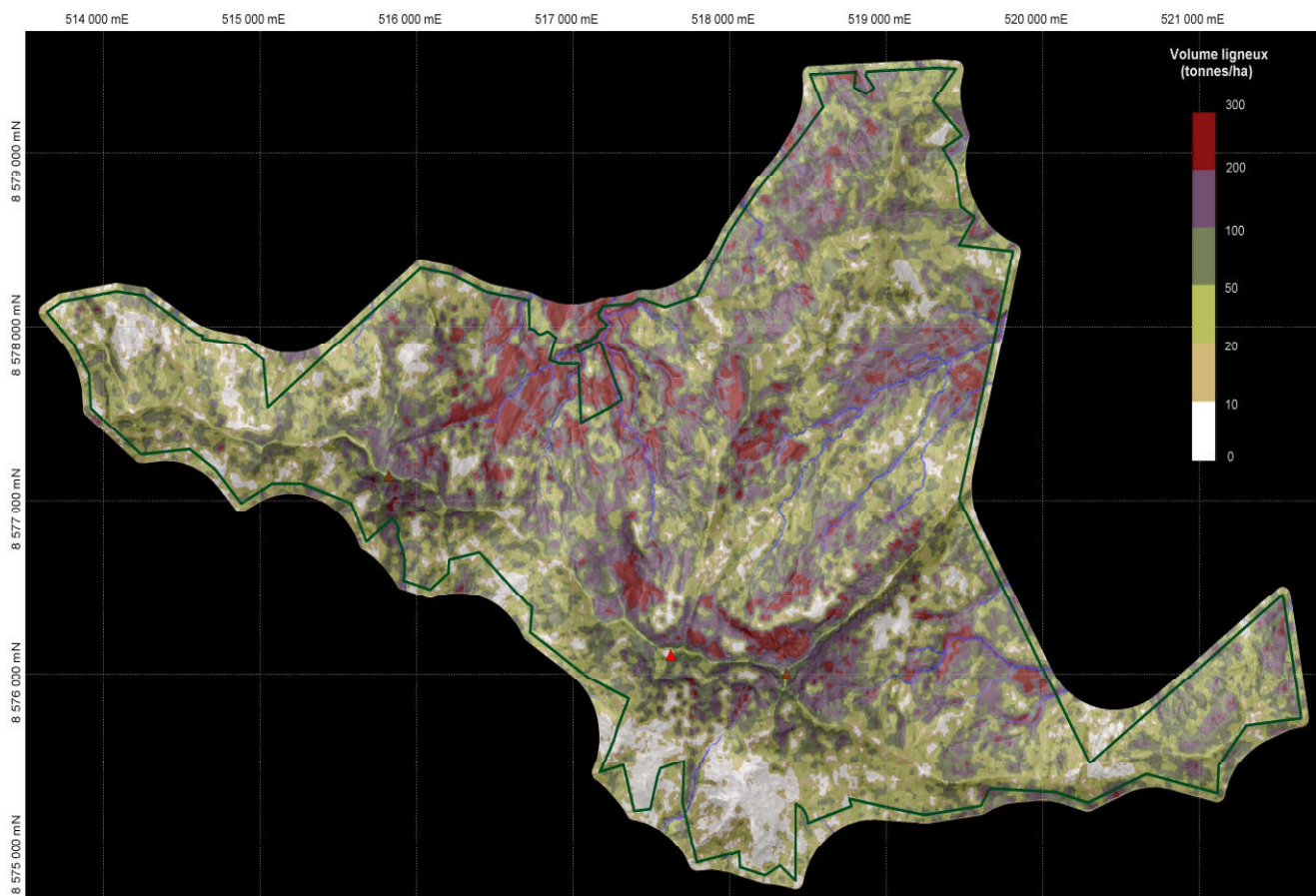


Fig. 25. Cartographie prédictive du volume de la biomasse ligneuse aérienne (tonnes/ha). Réserve forestière des Mts Bénérá.

Indicateurs de structure forestière

Les indicateurs de structure forestière fournissent une information synthétique sur l'organisation spatiale du couvert forestier, c'est-à-dire, son homogénéité et sa stratification verticale. Deux indices peuvent être retenus pour leur niveau d'information complémentaire : l'indice de rugosité de la canopée et l'indice de complexité de la structure verticale de la canopée.

L'indice de rugosité de la canopée exprime l'homogénéité et la complexité du toit de la canopée. Il s'exprime par le ratio de la surface de la canopée par rapport à la surface occupée par cette dernière sur la base du MNH raster (figure 26).

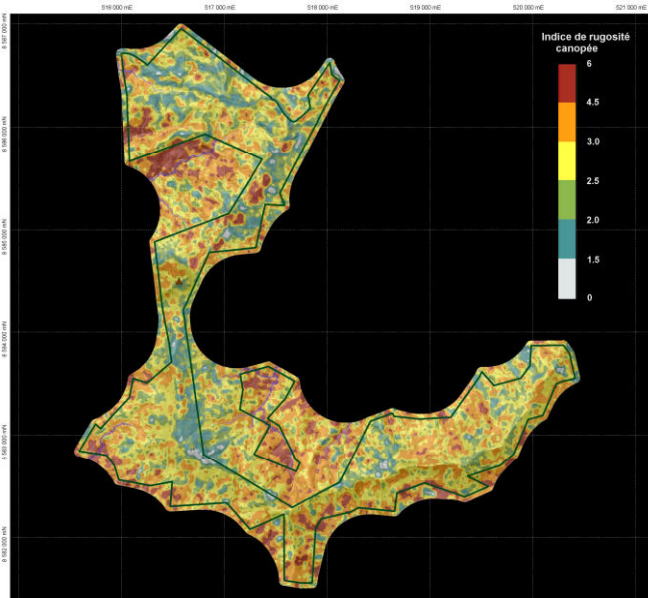


Fig. 26. Cartographie de l'indice de rugosité de la canopée. Réserve forestière de Songorombili.

Un indice faible représentera une surface de canopée relativement lisse ou plate, tandis qu'un indice fort correspondra à une surface de canopée marquée ou rugueuse caractéristique des peuplements lâches ou étagés (figure 27).

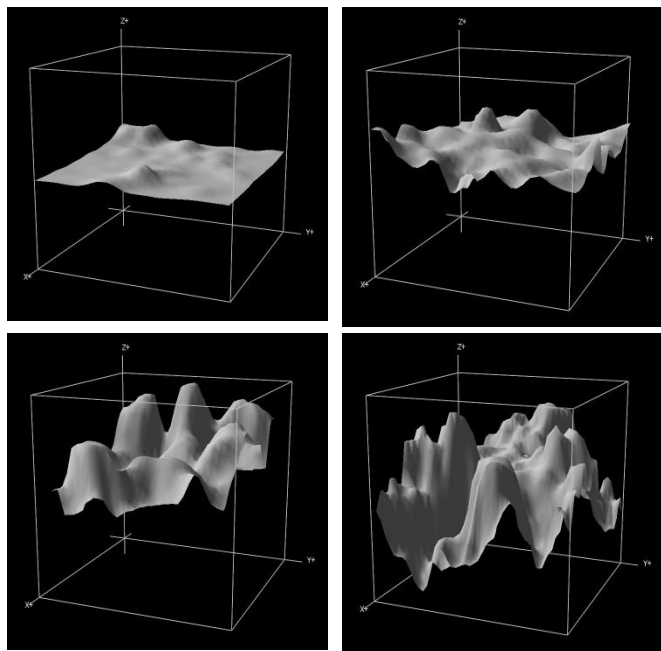


Fig. 27. Illustration du relief de la canopée en fonction de l'indice de rugosité (indice croissant de gauche à droite et de haut en bas).

L'indice de complexité de la structure verticale (Van Ewijk K. et Al., 2008) repose sur l'analyse de la densité des échos Lidar (données Lidar normalisées) à différentes strates de hauteur prédéfinies (découpage vertical discret). Il permet de caractériser le degré d'étagement d'un peuplement forestier en fonction de la distribution verticale des strates constitutives du couvert forestier (figure 28).

Une valeur faible indique une structure simple caractéristique d'un couvert forestier constitué d'une seule strate d'arbre, tandis qu'une valeur croissante traduira un couvert forestier constitué de différentes strates dont l'organisation est de plus en plus complexe.

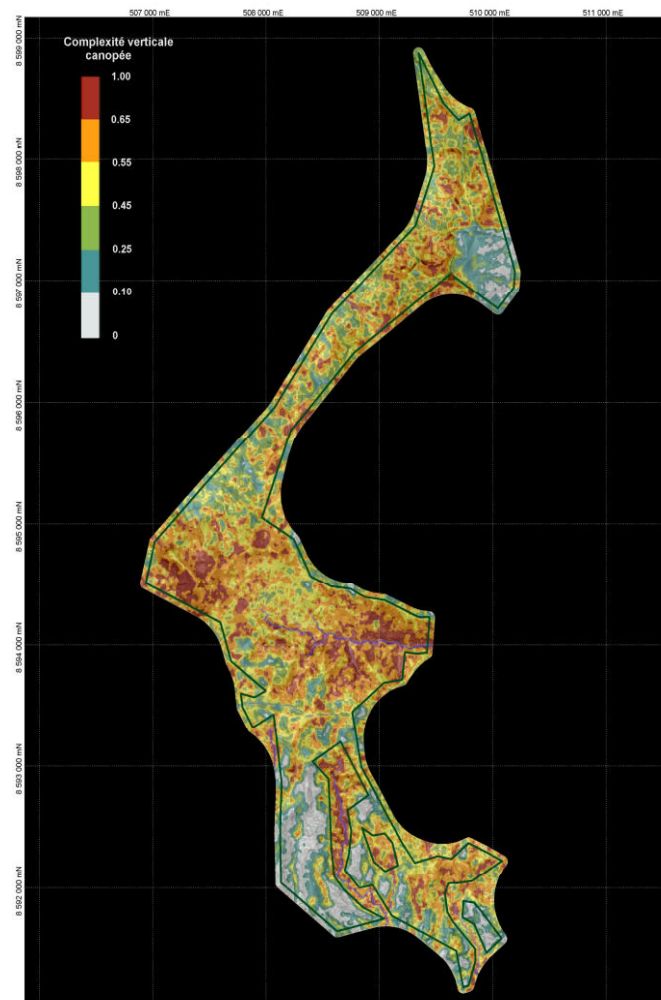


Fig. 28. Cartographie de l'indice de complexité de la structure verticale de la canopée. Réserve forestière des Crêtes du Nord.

Ces indicateurs permettent de préciser en fonction des caractéristiques principales du peuplement (hauteur et taux de couvert), le stade dynamique de la végétation et potentiellement la succession forestière, à laquelle appartient le peuplement étudié (figure 29).

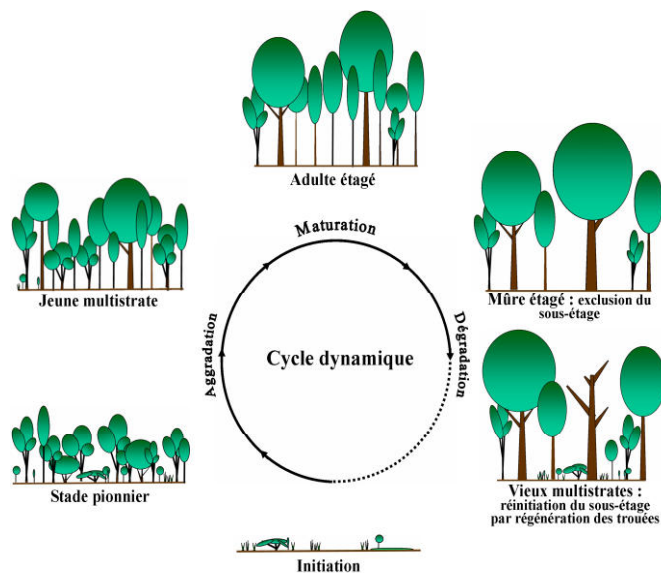


Fig. 29. Illustration schématique (simplifiée) du cycle dynamique des forêts.

5. Caractérisation des peuplements forestiers

Un peuplement forestier représente par définition une unité élémentaire caractérisée par une communauté d'arbre de structure et composition relativement homogène facilement cartographiable et dont l'aire peut aller de quelques ares à plusieurs hectares.

La discrimination et la caractérisation des peuplements sont effectuées en utilisant le principe de la classification non supervisée (méthode des centres mobiles) sur les variables suivantes ; la hauteur moyenne, l'écart type de la hauteur, le degré de fermeture du couvert, la surface terrière moyenne et les indices de structure forestière. Le nombre définitif de classe est arrêté en fonction des critères de discrimination interclasse, de leurs niveaux de représentativité et de leurs pertinences sur le terrain.

Afin de conserver un niveau de précision cartographique facilement interprétable et identifiable sur le terrain, les données statistiques nécessaires au processus de classification ont été traitées en utilisant comme grille d'analyse les résultats de la segmentation du MNH.

La classification finale obtenue (figure 30) doit être nécessairement traitée afin d'agglomérer dans les classes les plus proches et vraisemblables (analyse de voisinage), les éléments de classe singuliers ou dont l'aire serait inférieure à un seuil fixé préalablement. Elle peut être simplifiée ou affinée manuellement en fonction de la photointerprétation de l'orthophotographie couleur ou infrarouge (figure 31).

Cette cartographie n'a pas pour objectif de produire une carte définitive des peuplements, mais de permettre une différenciation objective de ces derniers selon une typologie adaptée basée sur la structure des types forestiers (figure 32).

Cette typologie complétée et renseignée par des sondages de terrain afin de préciser la composition des peuplements, constitue les fondements de l'aménagement forestier dont la finalité est d'assurer la pérennité et le maintien des fonctions essentielles de la forêt.

Cette connaissance est fondamentale pour le gestionnaire dans la définition des objectifs et le choix des interventions ou traitements sylvicoles envisageables, comme la programmation de coupes d'amélioration ou coupes de régénération.

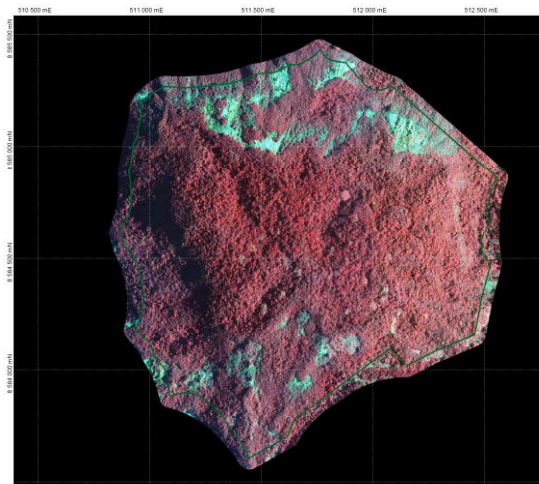


Fig. 31. Orthophotographie infrarouge ©IGN 2008. Réserve forestière de Sohoa.

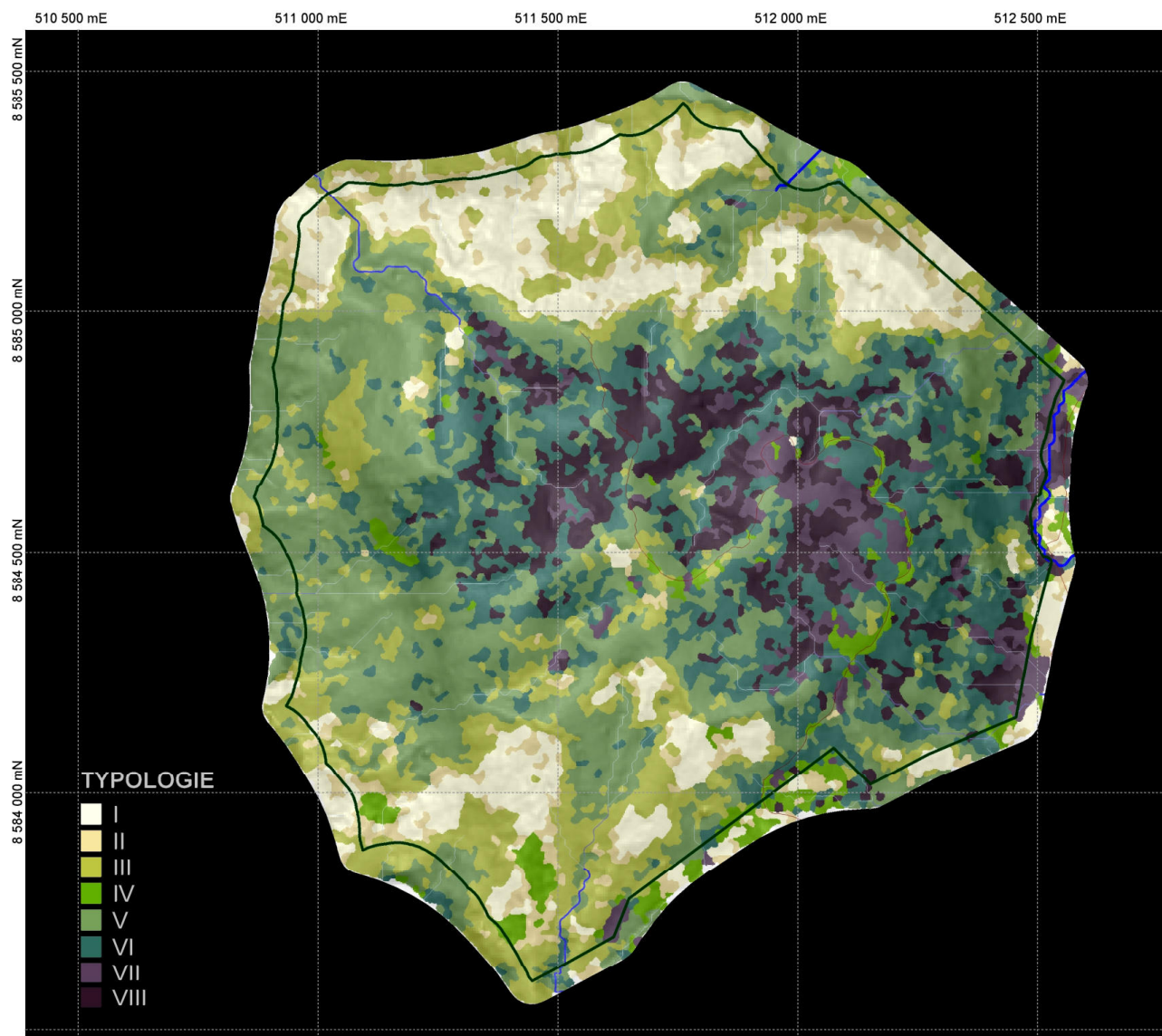


Fig. 30. Cartographie des peuplements. Réserve forestière de Sohoa.

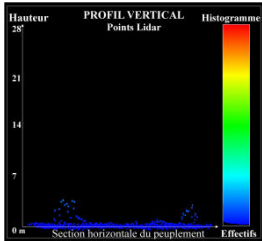

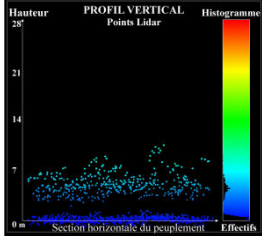

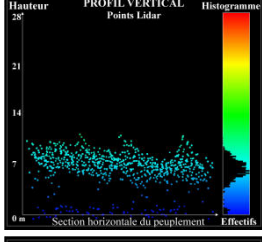

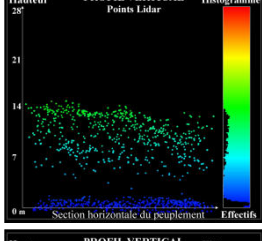

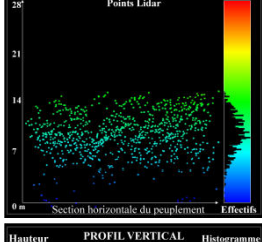
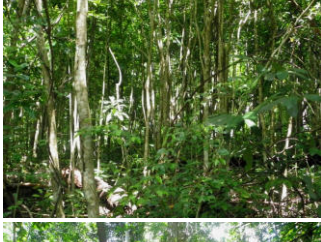
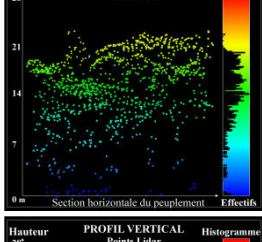

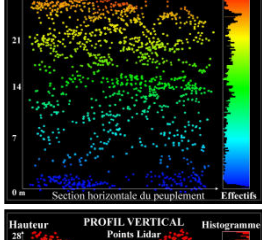

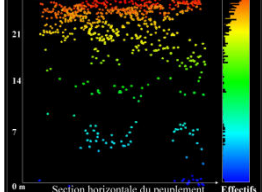

Type	Caractéristiques des types de peuplement	Profil vertical type	Exemple de terrain
I	<p>Nue ou végétation basse :</p> <p>Ce type caractérise les zones ouvertes ou nues (padza) sans arbres ou avec présence limitée de quelques recrûs d'arbustes ne formant pas de strate continue. La végétation herbacée présente est constituée par des graminées et/ou des fougères comme <i>Dicranopteris linearis</i>. Certaines de ces zones, les plus dénudées et érodées, présentent des essais de reboisement relativement récents à base d'<i>Acacia mangium</i>.</p>		
II	<p>Facès de type « fourré » :</p> <p>Peuplement ouvert, occupé par une strate plus ou moins continue d'arbustes colonisateurs (végétations secondaires de recolonisation) ne dépassant pas 6 m de hauteur (hauteur moyenne : 3 m). Ce type représente un espace de croissance composé principalement de <i>Ochna ciliata</i> et <i>Mimusops coriacea</i> en zone adlittoral et <i>Coptosperma supra-axillaris</i> et <i>Apodytes dimidiata</i> en zone subhumide. Ce type rencontré en enclaves forestières peut recouvrir également des zones enlignées effondrées ou de colonisation par <i>Saba comorensis</i>.</p>		
III	<p>Facès de type « gaulis » :</p> <p>Peuplement assez fermé, très pauvre ($G < 4 \text{ m}^2/\text{ha}$), constitué d'une strate continue de jeunes arbres, arbustes ou arbrisseaux ne dépassant pas 9 m de hauteur (moyenne : 6 m). La composition est dominée principalement par <i>Buxus madagascariensis</i>, <i>Commiphora arafy</i>, <i>Ochna ciliata</i> et <i>Mimusops coriacea</i> en zone adlittoral et <i>Mimusops comorensis</i> et <i>Comoranthus obconicus</i> en zone subhumide.</p>		
IV	<p>Facès de type « jeune perchis » :</p> <p>Peuplement entrouvert, pauvre ($G < 6 \text{ m}^2/\text{ha}$), constitué d'une strate peu dense de jeunes arbres (perches et petit-bois) ne dépassant pas 12 m de hauteur (moyenne : 7 m). Ce type peut correspondre à des zones d'anciennes plantations ou d'accrus naturels d'essence exotiques et héliophiles comme <i>Litsea glutinosa</i> et d'<i>Adenanthera pavonina</i>.</p>		
V	<p>Facès de type « perchis » :</p> <p>Peuplement fermé, moyennement riche ($G < 8 \text{ m}^2/\text{ha}$), constitué d'une strate dense et régulière de jeunes arbres (petit-bois) ne dépassant pas 14 m de hauteur (moyenne : 10 m). La composition est dominée principalement par <i>Mimusops comorensis</i> et <i>Comoranthus obconicus</i> en zone subhumide et <i>Grisollea myriantha</i>, <i>Trophis montana</i> en zone mésohumide.</p>		
VI	<p>Facès de type « jeune futaie » :</p> <p>Peuplement fermé, assez riche ($G < 12 \text{ m}^2/\text{ha}$), constitué de plusieurs strates assez denses de jeunes arbres (petit bois et bois moyen) ne dépassant pas 18 m de hauteur (moyenne : 12 m). La composition est dominée principalement par <i>Chrysophyllum boivinianum</i>, <i>Filicium decipiens</i> en zone mésohumide et de <i>Mimusops comorensis</i> et <i>Comoranthus obconicus</i> dans les variantes plus sèches.</p>		
VII	<p>Facès de type « futaie » :</p> <p>Peuplement moyennement fermé, riche ($G > 16 \text{ m}^2/\text{ha}$), ne dépassant pas généralement 26 m de hauteur (moyenne : 14 m), constitué de plusieurs strates moyennement denses d'arbres (bois moyen majoritaire) et caractérisé par la réinstallation d'un sous-étage. Ce faciès est caractéristique de la zone mésohumide avec comme essences principales <i>Chrysophyllum boivinianum</i>, <i>Filicium decipiens</i>, <i>Ocotea comoriensis</i> et <i>Ravensara areolata</i> et des zones d'enrichissements ou d'accrus naturels à base d'exotiques comme d'<i>Adenanthera pavonina</i> et <i>Litsea glutinosa</i>.</p>		
VIII	<p>Facès de type « vieille futaie » :</p> <p>Peuplement fermé, riche ($G > 16 \text{ m}^2/\text{ha}$), constitué d'une ou plusieurs strates denses d'arbres (bois moyen et gros bois) ne dépassant pas généralement 26 m de hauteur (moyenne : 17 m). Peuplement souvent dominé par une vieille cohorte d'arbres (gros bois) avec établissement limité de nouveaux individus en raison de la faible disponibilité en lumière dans le sous-étage. Ce faciès est caractéristique de la zone mésohumide avec comme essences caractéristiques <i>Chrysophyllum boivinianum</i>, <i>Filicium decipiens</i>, <i>Ocotea comoriensis</i> et <i>Ravensara areolata</i>.</p>		

Fig. 32. Nomenclature simplifiée de la typologie des peuplements forestiers - Réserve forestière de Sohoa.

6. Conclusions et perspectives

La technologie Lidar est novatrice et constitue un outil privilégié permettant d'obtenir une connaissance détaillée de la structure du couvert forestier sur des territoires étendus ou les méthodes traditionnelles d'inventaire de terrain seraient limitées.

Elle permet d'établir des cartographies forestières précises facilement actualisables et reproductibles, de différents paramètres forestiers. Ces données dérivées de l'analyse statistique des points Lidar permettent de caractériser sur des bases objectives la structure des principaux types forestiers constituant la mosaïque forestière.

Le travail de prospective de terrain reste néanmoins indissociable de l'exploitation des données Lidar dans le domaine forestier. Il permet le calibrage des différents systèmes d'équation utilisés pour estimer les données dendrométriques. Il constitue également une approche incontournable et un axe d'intérêt futur pour préciser les caractéristiques phytosociologiques du patrimoine arboré des réserves forestières de Mayotte.

Le gestionnaire dispose, dès lors, des éléments déterminants et probants pour élaborer objectivement les futurs plans d'aménagement et assurer la gestion durable du patrimoine forestier de Mayotte. Il disposera également des moyens pour suivre entre deux campagnes de levé Lidar, l'évolution et les perturbations affectant le patrimoine forestier à une échelle et avec une précision inégalée, dans un contexte de pressions anthropiques sans cesse croissantes et de modifications climatiques prévisibles.

Enfin, il y a tout lieu de considérer que les développements futurs permettront d'optimiser les analyses avec l'intégration des informations fournies par l'imagerie multispectrale ou hyperspectrale, dans le domaine de la reconnaissance des essences ou encore l'évaluation de l'état sanitaire des forêts.

Remerciements

Ce travail n'aurait pas pu être initié sans le concours financier du 9^{ème} FED (Fond Européen de Développement) « volet gestion des eaux pluviales » qui a permis l'acquisition des données orthophotographiques et Lidar 2008 de l'Institut Géographique National (données brutes Lidar et raster du MNE et du MNT).

Il convient enfin de remercier cordialement l'ensemble des agents techniques du service des Ressources Forestières du Conseil Général de Mayotte qui ont contribué avec détermination à la collecte des informations de terrain indispensables à l'interprétation des données Lidar.

Glossaire

Adlittoral : Se dit d'un organisme qui vit sur la zone littorale, sans avoir de contact direct avec la mer.

Aménagement forestier : Document qui détermine périodiquement pour une forêt donnée, à partir d'une analyse du milieu naturel et du contexte économique et social, les objectifs de la gestion durable à moyen et long terme ainsi que le programme de toutes les interventions souhaitables pendant une durée de l'ordre de 10 à 25 ans.

Accru naturel : Végétation forestière spontanée obtenue par la colonisation naturelle.

Anthropique : Relatif à une activité humaine.

Arbre : Un arbre est une plante ligneuse formant une couronne bien définie dont la hauteur est supérieure à 5 mètres de hauteur.

Arbres comptables : se dit des arbres dont la catégorie de diamètre est supérieure à 5 cm (soit >7.5 cm).

Arbuste : Plante ligneuse caractérisée par un port buissonnant sans couronne définie se ramifiant dès la base et ne dépassant pas généralement 5 mètres de hauteur.

Biomasse ligneuse : Poids sec de toute la matière végétale ligneuse (partie fibreuse qui constitue le bois) par unité de surface. La biomasse totale aérienne en bois se répartit en biomasse du tronc et biomasse du houppier (branches).

Canopée : Étage somital de la forêt (tiges, branches et feuilles).

Cime : Partie sommitale de l'arbre portant les branches et le feuillage et supportée par le tronc ou fût.

Classification : Méthode permettant de partitionner une population décrite par des variables le plus souvent quantitatives en groupes homogènes.

Climacique : Qui a atteint ou se rapproche du climax.

Climax : Etat final d'une succession végétale. Il est considéré comme stable tant au point de vue de la composition floristique que de la structure. La végétation climacique est en accord avec le milieu (types de sol, pente, exposition, etc.).

Coefficient de forme : Le coefficient de forme permet de caractériser la forme des fûts d'un arbre. Il correspond au rapport du volume réel de l'arbre et le volume qui a pour base la section le diamètre de l'arbre à 1.30 m et comme hauteur celle de l'arbre à la découpe considérée.

Composition : Proportion relative de chacune des essences principales qui se rencontrent dans un peuplement, exprimée en pourcentage du volume total ou de la surface terrière du peuplement ou encore du nombre total d'arbres.

Couvert : Superficie du sol recouverte par la projection verticale du périmètre des cimes des arbres ou de la végétation ligneuse. Exprimé en pourcentage, il exprime le degré de fermeture d'un peuplement, c'est à dire l'espacement entre les arbres et l'interaction des cimes les unes sur les autres.

Décidue ou caducifolié : Une forêt décidue est un type de forêt caractérisée par la présence d'une majorité d'arbres dont les feuilles, tombent au rythme des saisons (saison sèche sous les tropiques).

Dendrométrie : La dendrométrie est l'art de mesurer les arbres et de modéliser la croissance d'une forêt en fonction de ses caractéristiques principales (circonférence, hauteur, densité, âge, fertilité, etc.).

Dynamique forestière : Traduit la variation dans le temps et l'espace des paramètres structuraux d'une forêt.

Écosystème : Unité élémentaire de l'espace terrestre ou aquatique présentant une homogénéité, climatique et biologique. On englobe dans l'écosystème les organismes vivants (la biocénose) et leur environnement non vivant (le biotope).

Endémique : L'endémisme caractérise la présence naturelle d'un groupe biologique exclusivement dans une région géographique délimitée.

Étage dominant : Étage le plus haut du couvert d'une forêt, généralement formé par les branches et les feuilles des arbres.

Étage de végétation : Disposition des caractères naturels qui découle de l'altitude et des climats.

Exotique : Qualifie une espèce non indigène d'une zone particulière et qui peut constituer un risque pour les espèces endémiques.

Faciès : Ensemble de caractères physiologiques particuliers au sein d'une formation végétale.

Filtrage : Opérations de traitement d'une image raster visant à éliminer des effets parasites ou augmenter les effets intéressants. On distingue les filtres mathématiques (médian, moyen, gaussien,...) et les filtres morphologiques (érosion, dilation, etc.).

Forêts : Formation végétale ligneuse, ou écosystème, à prédominance d'arbres, comportant en général un couvert relativement dense.

Format (vecteur, point) : voir Vecteur (format) et Point(s) brut(s).

Fourré : Peuplement fermé de 1 à 3 mètres, formé uniquement d'arbustes et de plantes suffrutescentes, difficile à pénétrer, sans tapis graminéen ou avec quelques touffes isolées.

Futaie : Peuplement forestier non issu de rejets de souches de plus de 12 mètres de hauteur - Jeune futaie : la croissance des arbres en hauteur est beaucoup plus lente qu'au stade perchis. Les arbres ont un diamètre supérieur à 30 cm - Futaie adulte : le diamètre des arbres est supérieur à 45 cm, ce stade correspond pour certaines essences à l'aptitude à fructifier - Vieille futaie : ce stade est caractérisé par l'état végétatif des arbres qui peuvent montrer des signes de dépérissement.

Gaulis : Jeune peuplement de 3 à 8 mètres de hauteur constitué d'arbustes et arbrisseaux et de diamètre dominant inférieur à 10 cm, individus encore flexibles.

GPS : Global Positioning System. Système de positionnement par satellite qui permet de fournir la position précise d'un récepteur GPS en trois dimensions (latitude, longitude, altitude) dans un référentiel géodésique donné en utilisant la méthode de trilatération (mesure des distances entre émetteurs et récepteur par codage des signaux).

Grume : Tronc ou section de tronc d'un arbre abattu ou ébranché.

Houppier : Ensemble des ramifications (branches et rameaux) d'un arbre.

IDW (interpolation) : Inverse Distance Weighting Interpolation linéaire inversement proportionnelle à la distance. Cette technique associe à chaque nœud de la grille du lot de données, une valeur qui est calculée par moyenne pondérée des valeurs des points du lot de données qui se trouvent à proximité du nœud.

Indigène : Qualifie la nature d'une espèce native d'un environnement ou d'une région particulière (autochtone).

Interpolation : Techniques consistant à déterminer les valeurs manquantes ou intermédiaires d'un lot de points ou données.

Inventaire forestier : Opération de relevé de données réalisée sur le terrain, consistant à quantifier et à décrire la composition, la densité et les caractéristiques physiques des arbres d'une zone pour des fins précises comme la planification, l'évaluation, l'aménagement ou la récolte.

Itinéraire sylvicole : Ensemble des interventions sylvicoles à réaliser dans des peuplements donnés et pendant une durée déterminée, pour atteindre les objectifs assignés par l'aménagement forestier.

Laser : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Amplification de la lumière par émission stimulée de radiations, dispositif d'excitation des électrons permettant d'émettre un faisceau hautement directionnel de lumière cohérente.

Lidar : Light Detection And Ranging. Technique de télémétrie reposant sur l'émission-réception d'une impulsion Laser dans le proche infrarouge.

Mésohumide : Caractérise un milieu ni trop sec ni trop humide.

Mosaïque forestière : Assemblage d'unités élémentaires différentes qui peuvent être identifiées par leur âge, architecture, structure et composition.

MNE : Modèle Numérique d'Élévation: représentation numérique du territoire prenant en compte le terrain et les objets de surface (bâtiments, arbres, ponts, etc.). Chaque pixel a pour valeur une information d'altitude par rapport au niveau de la mer (élévation).

MNH : Modèle Numérique de Hauteur ou dit de canopée dans un contexte exclusivement forestier : représentation numérique du territoire calculée par la soustraction du MNT au MNE. Chaque pixel a pour valeur une information d'altitude par rapport au niveau du sol.

MNT : Modèle Numérique de Terrain : représentation numérique de type « raster » du sol c'est-à-dire du territoire « nu » sans les objets de surface. Chaque pixel a pour valeur une information d'altitude du sol par rapport au niveau de la mer (élévation).

Padza : Terme vernaculaire pour désigner les terres incultes ou zones érodées.

Perchis : Les arbres présentant une tige rigide de 8 à 12 mètres de hauteur et un diamètre compris entre 10 et 30 centimètres.

Peuplement : Ensemble d'arbres ayant une uniformité jugée suffisante quant à sa composition, sa structure, son âge, sa répartition, son état sanitaire, etc., pour se distinguer des peuplements voisins, et pouvant ainsi former une unité élémentaire sylvicole ou d'aménagement.

Pionnier (ère) : Se dit d'une végétation ou d'une espèce qui colonise les terrains nus et participe ainsi aux stades initiaux de la mise en place de la couverture végétale.

Phytosociologie : Analyse des associations végétales ainsi que de leurs dynamiques (successions de végétation). Elle étudie les tendances naturelles que manifestent des individus d'espèces différentes à cohabiter dans une communauté végétale ou au contraire à s'en exclure.

Pixel : Plus petite surface élémentaire constitutive d'une image.

Point(s) brut(s) : Représentation spatiale (vecteur) d'un triplet de coordonnées Lidar (x, y et z). On parle de nuage de points bruts lorsqu'une multitude de triplets de coordonnées sont représentés ensemble.

Position sociale (arbres) : La position ou le rang social permet de préciser l'étagement et le niveau de concurrence d'un arbre par rapport aux autres (prédominant, co-dominant, intermédiaire, dominé et croissance libre).

Raster (format) : Format « image » constitué d'une maille régulière de pixels pour lesquelles une ou plusieurs données sont associées. Chaque cellule de la matrice ou pixel, est référencée par une paire de coordonnées x et y.

Recrû : Végétation qui pousse après une coupe.

Régénération : Processus qui entre en jeu dans les mécanismes de reconstitution de la forêt.

Régression (linéaire multiple) : Fonction modélisant la relation entre une variable expliquée ou dépendante et plusieurs variables explicatives ou indépendantes avec le plus petit taux d'erreur. Un indicateur spécifique, le coefficient de détermination permet de traduire la variance du modèle.

Relation allométrique : L'allométrie exprime la corrélation entre la taille d'un organisme et certains de ses paramètres biologiques, comme par exemple entre hauteur et diamètre ou encore le volume de la biomasse ligneuse aérienne et le diamètre d'un groupe d'arbres.

Secondaire : Qualifie une essence (ou un peuplement forestier), accessoire par rapport à l'essence ou au peuplement principal - Se dit d'une végétation ayant subi les effets directs ou indirects d'interventions humaines.

Segmentation : Etape de base du traitement d'une image. Cette opération a pour but de séparer différentes zones homogènes d'une image, afin d'organiser les objets en groupes (clusters) dont les membres ont en commun diverses propriétés (intensité, couleur, texture, etc.).

Sempervirent : Forêt dont des arbres ou les arbustes restent en majorité feuillés et verts tout au long de l'année.

Sous-étage : Étage inférieur de la végétation dans une forêt, généralement formé par la végétation au sol, des herbes et des arbustes ou arbres dominés.

Station : Etendue de terrain, de superficie variable, homogène dans ses conditions physiques et biologiques (climat, topographie, composition floristique et structure).

Strate : Subdivision contribuant à caractériser l'organisation verticale des individus présents sur une station.

Structure : Distribution des arbres qui constituent un peuplement en classes d'âge, de diamètres, de hauteur, etc.

Structure - catégories de bois : Petits Bois (PB) catégorie de diamètre (Ø) 20-25 cm - Bois Moyens (BM) Ø 30-45 cm - Gros Bois (GB) Ø 45-55 - Très Gros Bois (TGB Ø >55 cm).

Subhumide : Climat situé entre le type sec et humide.

Submontagnard (étage) : Qualifie l'étage situé entre l'étage collinéen et l'étage montagnard.

Succession : Évolution dans le temps de la composition des espèces dans un écosystème, souvent selon un ordre prévisible. Dans une forêt, elle caractérise la séquence du remplacement progressif d'une communauté végétale par une autre.

Surface terrière : La surface terrière d'un arbre correspond à la surface de la section de cet arbre à hauteur d'homme (1.30 m). Au niveau d'un peuplement, elle correspond à la sommation des surfaces terrières individuelles. Exprimée en mètre carré (m²), elle permet d'estimer la richesse d'un peuplement et son volume.

Sylviculture (sylvicole) : Ensemble des applications des connaissances relatives aux essences forestières, ainsi que des méthodologies et des techniques qui en découlent dans le cadre de la gestion et l'exploitation rationnelle des forêts.

Système d'information géographique (SIG) : Ensemble organisé de matériels, de logiciels et de données géographiques visant à saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et afficher toutes les formes d'information à référence géographique.

TIN (interpolation) : Triangulated Irregular Network ou Réseau de Triangles Irréguliers ou Triangulation de Delaunay. Triangulation irrégulière utilisant un réseau de triangles qui vont connecter les points d'un lot de données. Cette méthode conserve la valeur initiale des points utilisés.

Traitement sylvicole : Ensemble des opérations culturales (coupes et travaux) qui sont faites, successivement, dans un peuplement donné, pour en assurer l'amélioration et la régénération.

Type forestier : Regroupement de peuplements présentant le même type d'objectifs, dont l'état est semblable et qui demandent un traitement similaire.

Typologie : Détermination des traits caractéristiques dans un ensemble de données en vue de distinguer des types, des systèmes, etc.

Vecteur (format) : Format en mode «objet», où les objets sont représentés par des primitives graphiques (points, lignes, polygones, etc.). Ce sont des données représentant des entités géographiques par des points, lignes et polygones organisés en couches d'information.

Orientations bibliographiques

Adjonou K., Bellefontaine R. & Kokou K., (2009). Les forêts claires du Parc national Oti-Kéran au Nord-Togo : structure, dynamique et impacts des modifications climatiques récentes. Laboratoire de botanique et écologie végétale Faculté des sciences Université de Lomé.

Billand A., Gourlet-Fleury S. & Sarraïlh J.M., (2008). Dégradation forestière et exploitation forestière en Afrique centrale, Eléments de «l'équation carbone» & Perspectives de recherche Paris, Atelier Comifac.

Boullet V., (2005). Aperçu préliminaire de la végétation et des paysages végétaux de Mayotte. Conservatoire botanique national des Mascariens.

Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M. A., Chambers J. & Eamus D., (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*.

Cole Thomas G. & EweJohn J., (2006). Allometric equations for four valuable tropical tree species. *Forest Ecology and Management*.

Diedershausen O., Koch B. & Winacker H., (2004). Automatic Segment and Characterisation of Forest Stand Parameters using Airborne LIDAR data, Multispectral and Fogis Data, Proceedings of the ISPRS working group.

Drake J., Dubayah R., Clark D., Knox R., Blair B., Hofton M., (2002). Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint Lidar. *Prince Remote Sensing of Environment*.

Evans J.S., Hudak A.T., Faux R. & Smith A., (2009). Discrete Return Lidar in Natural Resources: Recommendations for Project Planning, Data Processing, and Deliverables. *Remote Sensing of Environment*.

Falkowski M.J., Evans J.S., Martinuzzi S., Gessler P.E. & Hudak A., (2008). Characterizing forest succession with Lidar data: An evaluation for the Inland Northwest, USA. *Remote Sensing of Environment*.

Gachet G., (2009). Analyse et exploitation des données de Lidar aéroportées pour la caractérisation des milieux boisés de la Suisse. Thèse École polytechnique de Lausanne.

Gatzolis D. & Andersen H-E., (2008). A guide to Lidar data acquisition and processing for the forests of the Pacific Northwest. USDA Forest Service - Pacific Northwest Research Station - University of Washington.

Harding D., Lefsky M., Parker G, Blair J., (2001). Lidar altimeter measurements of canopy structure. *Remote Sensing of Environment*.

Kini A. & Popescu S., (2004). TreeVaw: a versatile tool for analyzing forest canopy Lidar data: A preview with an eye towards future. *Remote Sensing Foundation for GIS Applications*.

Kraus K. & Pfeifer N., (2001). Advanced DTM generation from Lidar data. Vienna University of Technology, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.

Kraus K. & Pfeifer N., (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne Laser scanner data, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*.

Lee A., Lucas R. & Brack C., (2004). Quantifying vertical forest stand structure using small footprint Lidar to assess potential stand dynamics. *Remote Sensing and Spatial Informations Sciences*.

Lefsky M., Cohen W., Parker G. & Harding D., (2002). Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies.

Lemay V. & Staudhammer C., (2005). Indices of stand structural diversity mixing discrete continuous and spatiales variables. University of British Columbia.

McGaughey R.J., Andersen H-E & Reutebuch S.E., (2006). Considerations for planning, acquiring and processing Lidar data for forestry applications. USDA Forest Service - Pacific Northwest Research Station -University of Washington.

Means J., Acker S., Fltt B., Renslow M., Usa E. & Chad J., (2000). Predicting Stand Characteristics with Airborne Scanning Lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*.

Mugnier A., Cassagne B., Bayo N. & Lafon C., (2009). Estimation des stocks de carbone des forêts du Bassin du Congo pour la Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts. *Forêts Ressources Management*.

Pascal O. & Labat J.N. (2002). Plantes et forêts de Mayotte. Muséum d'Histoire Naturelle, Paris.

Popescu S., Wynne R. & Nelson R., (2003). Measuring individual tree crown diameter with LIDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*.

Sullivan A., (2008). LIDAR Based Delineation in Forest Stands. University of Washington.

The 9th international conference on Lidar applications for assessing forest ecosystems, (2009). Texas A&M University - College Station, USA.

Vietti-Violi C., (2007), Exploitation des données Lidar à haute résolution pour la foresterie. Travail de master Université de Lausanne.

Van Ewijk K., Treitz P. & Scott N., (2008). Characterizing Forest Succession in Central Ontario using Lidar derived Indices, Department of Geography, Queen's University Kingston, Ontario.

Zimble D.A., Evans D.L., Carlson C.G., Parker R.C., Gradob S.C. & Gerard P.D., (2003). Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne Lidar. *Remote Sensing of Environment*.

Moyens informatiques

Les logiciels commerciaux à vocation SIG commencent progressivement à intégrer la visualisation et le traitement des données Lidar. Les possibilités restent cependant limitées pour des applications spécifiques comme l'étude du milieu forestier qui constitue une discipline relativement jeune.

Outre les outils de restitutions cartographiques des informations géoréférencées, il est nécessaire de disposer de moyens adaptés en matière de traitement d'image et de traitement statistique des données, mais également de disposer d'une puissance de calcul en rapport avec le volume des informations à traiter.

Il convient de souligner l'intérêt que présente certaines applications libres développées dans le cadre universitaire comme le logiciel de visualisation et d'analyse des données Lidar dénommé FUSION/LDV (développé par McGaughey Robert, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, University of Washington) dont l'utilisation a largement contribué à la visualisation et l'exploitation des données Lidar dans le cadre du présent rapport.