

**Caractérisation du degré de maturité des forêts  
du Morvan et cartographie des forêts matures**

**RAPPORT D'ETUDE**



(crédit photo : Marc Fuhr)

**Délia Ben Sussan, Jean-Matthieu Monnet, Marc Fuhr**

Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne (LESSEM), rattaché au centre INRAE Lyon-  
Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

**Septembre 2022**



## Préambule

L'étude s'inscrit dans le projet "Connaissance et préservation des forêts à Haute Valeur Écologique du Morvan" porté par le Parc naturel régional du Morvan grâce à un cofinancement de l'Union Européenne et de la Région Bourgogne-Franche-Comté".

Poursuivant la dynamique impulsée à l'échelle du Massif Central sur les forêts anciennes, elle caractérise la maturité biologique des peuplements forestiers, facteur déterminant de la biodiversité.



UNION EUROPÉENNE



Le projet « *Connaissance et préservation des Forêts à Haute Valeur Écologique du Morvan* » est cofinancé par l'Union européenne.  
L'Europe s'engage dans le Massif central avec le fonds européen de développement régional.



## Table des matières

Préambule .....	3
Introduction.....	7
Matériel & Méthodes .....	10
Sites d'étude et collecte des données de terrain .....	10
Évaluation de la maturité des placettes.....	12
Sélection des métriques LiDAR et des variables topographiques .....	13
Modélisation statistique et validation.....	15
Résultats .....	17
Maturité du référentiel de terrain .....	17
Précision des modèles .....	18
Importance des variables prédictives (fig. 5) .....	19
Effet des variables prédictives.....	20
Cartes intermédiaires .....	23
Placettes de contrôle.....	23
Prise en compte de la surface terrière, carte définitive.....	23
Conclusion .....	25
Bibliographie.....	26



## Introduction

Le terme forêt mature désigne les stades tardifs de la dynamique forestière, de la fin du stade de croissance (optimum sylvicole) au stade de sénescence ; ces stades sont souvent tronqués dans les forêts gérées pour la production de bois. Les forêts matures comprennent à la fois des forêts qui ne sont que rarement ou plus exploitées mais aussi des forêts régulièrement exploitées où l'on applique une sylviculture spécifique appelée sylviculture de rétention (Gustafson et al., 2013).

Les forêts matures sont caractérisées par les caractéristiques structurales suivantes, appelées attributs de maturité (Paillet et al., 2010 ; Cateau et al., 2015 ; Janssen, 2016) :

- une structure floristique dominée par des espèces autochtones,
- une structure dendrométrique hétérogène (diversité des diamètres et des hauteurs) et la présence d'arbres de très gros diamètre, conduisant à une surface terrière totale élevée,
- un volume important de bois mort sur pied et au sol, avec une grande diversité des pièces de bois mort au sol, en termes de dimensions et de stades de dégradation,
- la présence de nombreux dendro-microhabitats (cavités, fissures, décollements d'écorce, sporophores de champignons saproxyliques, etc.)
- une canopée relativement ouverte avec une distribution hétérogène des ouvertures, en termes de tailles ou de stades de fermeture.

De nombreux travaux ont souligné que les forêts matures fournissent un large bouquet de services écosystémiques, notamment un service de puits de carbone (Luyssaert et al., 2008), un service d'attractivité pour l'écotourisme (Gunes et Hans, 2007), un service de protection contre les chutes de pierres (Fuhr et al., 2015) et un service de conservation de la biodiversité (Paillet et al., 2010). Les études ont mis en évidence qu'une multitude d'espèces végétales et animales dépendent des attributs de maturité (voir Paillet et al., 2010 pour une revue de la littérature) :

- la quantité et la qualité du bois mort disponible influencent fortement la diversité spécifique ou fonctionnelle des organismes saproxyliques tels que les coléoptères ou les champignons saproxyliques (Janssen et al., 2017, 2016), les bryophytes et les lichens (Dittrich et al., 2014),
- les très gros arbres vivants et les arbres dépérissant offrent un abri et de la nourriture à de nombreuses espèces d'oiseaux, notamment les espèces qui nichent dans des cavités comme les pics ou les petites chouettes de montagne, ou encore les espèces de chauves-souris (Bouvet et al., 2016),
- une diversité des tailles de trouées conduit à une hétérogénéité importante des conditions lumineuses au niveau du sol, et profite à la diversité spécifique et fonctionnelle de plusieurs taxons.

Les forêts mettent des siècles, voire des millénaires, à atteindre un stade très mature. A l'inverse, les forêts matures peuvent être détruites ou dégradées très rapidement, même si la mise en place de zones protégées peut limiter cette destruction. En outre, si une forêt mature est trop petite, sa simple présence peut ne pas suffire à fournir des ressources aux espèces ayant des exigences minimales quant à la taille de leur domaine vital (Pe'er et al., 2014). Les gestionnaires forestiers classent généralement les éléments de forêts matures en fonction de leur taille, depuis les arbres isolés (souvent appelés arbres bio) ou les petits groupes d'arbres jusqu'aux îlots de vieux bois (environ 1 ha) et aux réserves forestières (de 10 ha à plus de 1000 ha ; Lachat et Büttler, 2007). La plupart des espèces dépendant des attributs des forêts matures se dispersent lentement (Komonen et Müller, 2018) ; par conséquent, la construction et le maintien de réseaux de forêts matures interconnectées sont essentiels à leur conservation (Svensson et al., 2020).

La première étape de la création d'un réseau de forêts matures consiste à identifier les éléments existants. Actuellement, ce processus d'identification repose sur des protocoles de terrain détaillés comportant de nombreux indicateurs structuraux qui fournissent des informations sur la biodiversité, le caractère naturel et la maturité, tels l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP, Larrieu et Gonin, 2008) ou le protocole « Forêts anciennes » du WWF (Rossi et Vallauri, 2013). Ces protocoles sont coûteux et longs à mettre en œuvre, ce qui les rend peu utiles pour identifier les éléments d'un réseau à l'échelle du paysage.

La technologie LiDAR (Light Detection And Ranging) est de plus en plus utilisée pour caractériser la structure des forêts, grâce à sa capacité à caractériser la structure 3D de la végétation. Le balayage laser aéroporté (ALS) est un système de télédétection actif dans lequel un avion émet des impulsions laser vers le sol. Ces impulsions sont réfléchies par les obstacles et la distance à l'appareil émetteur est calculée à partir du temps écoulé entre l'émission du signal et la réception de son retour (ou écho). L'avion est également équipé d'un récepteur GNSS (Global Navigation Satellite System) et d'une centrale inertielle, ce qui permet de calculer précisément les coordonnées 3D de chaque élément de surface ayant réfléchi une des impulsions laser. Le nuage de points obtenu est ensuite classé pour différencier les points "sol", utilisés pour générer un Modèle Numérique de Terrain (MNT), des autres points interagissant principalement avec la végétation forestière.

Deux types de métriques peuvent être extraites pour caractériser la structure de la forêt à partir du nuage de points LiDAR. Le premier type de métriques est directement calculé sur le nuage de points. Il comprend généralement les quantiles de la distribution des hauteurs des points au-dessus du sol, la moyenne et l'écart-type des hauteurs, et les valeurs d'intensité des échos. Ces mesures sont liées à la structure 3D de la canopée de la forêt vue par le scanner laser. Ces métriques sont aujourd'hui couramment utilisées pour prédire les variables structurales des peuplements forestiers telles que la hauteur dominante, le diamètre moyen, la surface terrière ou le volume sur pied (White et al., 2013). Les modèles prédictifs sont calibrés en reliant les variables dendrométriques des peuplements mesurées sur des parcelles de terrain, avec les métriques des nuages de points extraites pour les zones correspondantes.

Le calcul du deuxième type de métrique, les métriques orientées objet, repose sur l'utilisation de critères géométriques pour identifier à l'aide d'algorithmes ad-hoc des objets tels que des arbres, des trouées et des lisières dans le nuage de points. Ces métriques sont ajoutées aux précédentes pour compléter l'ensemble des métriques potentiellement explicatives (Glad et al., 2020). Cependant, les métriques orientées objet, telles que le nombre d'arbres d'une certaine hauteur ou la proportion de la surface couverte par des trouées, n'améliorent pas nécessairement le pouvoir prédictif d'un modèle (Marchi et al., 2018).

Le LiDAR aéroporté est utilisé depuis plusieurs années pour des inventaires forestiers, principalement orientés vers la production de bois. Des applications pour évaluer d'autres services écosystémiques, par exemple la protection contre les chutes de pierres (Monnet et al., 2017) ou la cartographie de la biodiversité (Bouvier et al., 2017 ; Glad et al., 2020), ont également été testées. L'utilisation de données LiDAR pour identifier les forêts matures est plus récente et s'est principalement concentrée sur la détection d'un attribut de maturité spécifique : le bois mort. Les résultats soulignent que l'identification des éléments de bois mort, qu'ils soient sur pied ou au sol, nécessite des densités de points élevées, par exemple plus de 20 pts/m<sup>2</sup> (voir Marchi et al. (2018) pour une revue de la littérature). De plus, même avec des densités de points élevées, le bois mort au sol reste difficile à détecter car la canopée et le couvert arbustif empêchent la pénétration du faisceau et parce que les pièces de bois mort au sol identifiées sur des critères de forme peuvent être confondues avec des rochers. De fait, comme mentionné par Marchi et al. (2018), les études ont surtout été conduites dans

des zones où la mortalité des arbres est élevée et où le bois mort est très abondant. Les méthodes développées à ce jour, bien qu'elles soient de plus en plus sophistiquées et prometteuses, peuvent ne pas être opérationnelles dans les zones où la dynamique forestière est dominée par des perturbations de petite à moyenne échelle, comme c'est le cas dans la plupart des forêts de montagne européennes (Brang et al., 2006). Néanmoins, les études portant sur des éléments de bois mort de taille moyenne à grande (diamètre >30 cm) ont obtenu des résultats prometteurs (Mücke et al., 2013 ; Wing et al., 2015 ; Yao et al., 2012).

L'objectif du présent projet est de cartographier la maturité relative des forêts du Parc Naturel Régional du Morvan par télédétection, à partir d'une campagne de données LiDAR acquise en 2019 (densité de points  $\approx 40$  pts/m<sup>2</sup>). Pour ce faire, nous avons :

- Caractérisé la maturité des peuplements sur le terrain en calculant des attributs élémentaires et un indice composite de maturité (IMAT) à l'intérieur d'un réseau de 257 placettes précisément géolocalisées. L'indice de maturité combine trois attributs élémentaires : la surface terrière totale des très gros arbres vivants, la surface terrière totale des gros arbres morts sur pied et le volume des grosses pièces de bois mort au sol.  
*NB : le référentiel de terrain est très majoritairement constitué de placettes installées dans des peuplements feuillus d'essences autochtones (principalement Chêne et Hêtre). Quelques placettes ont été installées dans des peuplements mixtes feuillus-résineux, dominés toutefois par ces mêmes essences. **Les cartes réalisées couvriront donc uniquement les surfaces couvertes par ces types de peuplements.** En conséquence, nous n'avons pas tenu compte de la structure floristique des peuplements pour caractériser la maturité des placettes de terrain (espèces autochtones largement dominantes).*
- Recensé puis calculé un ensemble de métriques LiDAR qui, lors de travaux antérieurs, s'étaient avérées utiles pour prédire des attributs individuels de maturité,
- Inclus ces métriques comme prédicteurs dans des modèles dits « de forêt d'arbres décisionnels » et évalué 1/ la capacité des modèles développés à prédire l'IMAT ou les attributs élémentaires de maturité, 2/ l'importance de chaque métrique, et 3/ le sens de la relation entre les métriques et les indicateurs de maturité,
- Puis, la qualité des modèles obtenus étant satisfaisante, extrait les métriques retenues par les modèles sur l'ensemble des peuplements feuillus ou mixtes et réalisé les cartes (IMAT, attributs élémentaires),
- Validé les cartes obtenues à partir d'un jeu de placettes de contrôle indépendant et proposé d'appliquer un seuil de surface terrière pour améliorer la qualité des cartes.

# Matériel & Méthodes

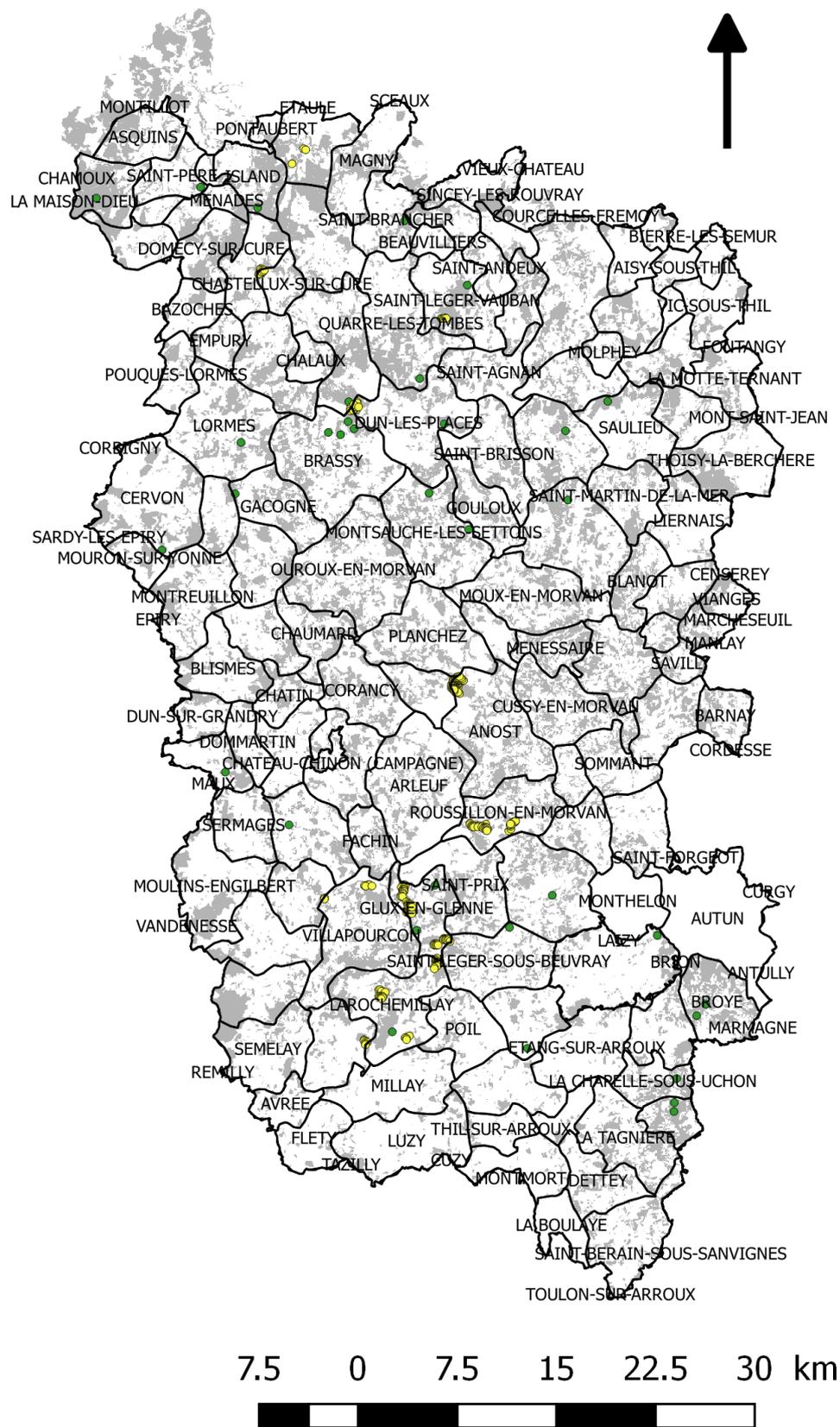
## Sites d'étude et collecte des données de terrain

La zone d'étude est le Parc Naturel Régional du Morvan (superficie : 3220 km<sup>2</sup>). C'est un massif de basse montagne avec des altitudes comprises entre 400 et 901m. La surface du PNR est recouverte à 47% de forêt, dont 85% est privée. Les peuplements forestiers sont partagés entre les forêts de feuillus purs (53%), dominées par le chêne sessile (*Quercus petraea*) (et pédonculé) ou le hêtre européen (*Fagus sylvatica*) et les peuplements résineux jeunes, principalement de douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Le principal régime sylvicole est la futaie régulière. La région est soumise à une forte exploitation forestière.

Les données de terrain utilisées (carte n° 1, tableau n° 1) ont été fournies par le PNR du Morvan et l'ONF-agence Bourgogne Est.

Jeu de données	Année	Protocole	Nombre de placettes
Diagnostic de Maturité (PNR Morvan)	2020	Maturité Morvan	173
Gorges de la Canche (ONF)	2015	PSDRF	15
Vernay (ONF)	2013	PSDRF	69
<b>Total</b>			<b>257</b>

Tableau n° 1 : référentiel de terrain



Carte n° 1 : localisation des placettes du référentiel de terrain  
(en jaune : placettes de calibration / en vert : placettes de validation)

Les protocoles de terrain utilisés (figure n° 1) diffèrent mais reposent tous sur des placettes circulaires 20 m de rayon :

- dont les centres ont été précisément localisés spatialement à l'aide d'un récepteur GNSS, et où
- les très gros arbres vivants (diamètre à hauteur de poitrine (dbh)  $\geq 55$  cm) et les gros arbres morts sur pied (dbh  $\geq 20$  cm) sont mesurés en dbh de manière à calculer leur surface terrière,
- les grosses pièces de bois mort au sol ( $\geq 20$  cm de diamètre et  $\geq 1$  m de longueur) sont mesurées en diamètre et longueur de manière à calculer leur volume. Leur stade de décomposition est évalué : 5 stades sont distingués en référence aux stades de pourriture du PSDRF (Réserves Naturelles de France, 2012).

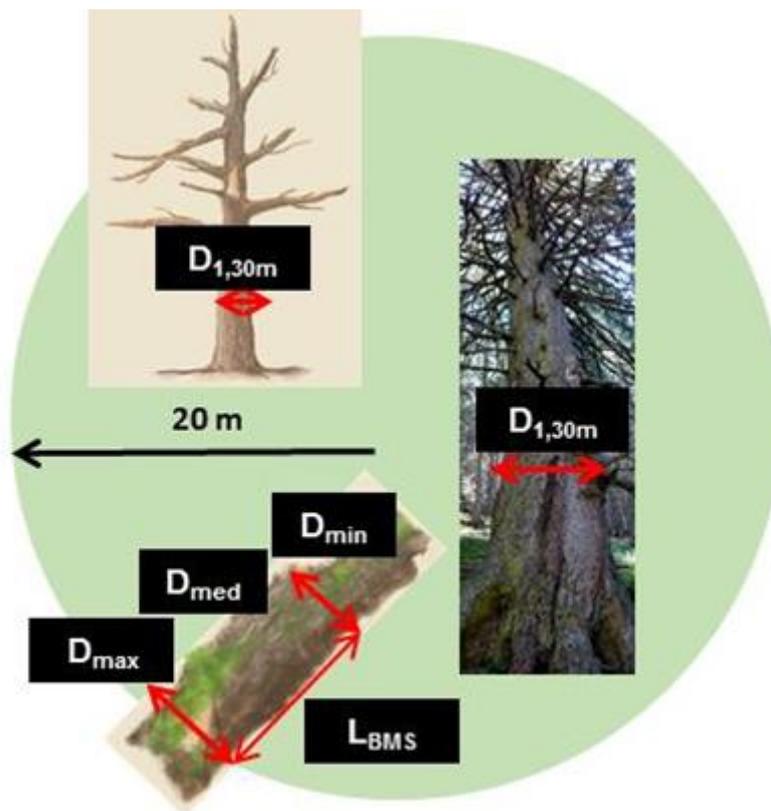


Figure n° 1 : représentation schématique d'une placette de terrain

## Évaluation de la maturité des placettes

Pour chaque placette, nous avons calculé un indice de maturité combinant quatre attributs structuraux ayant des liens bien connus avec la maturité :

- la surface terrière totale des très très gros arbres vivants ( $G_{TGB}$ ,  $m^2 \cdot ha^{-1}$ ,  $d_{1,30m} \geq 55$  cm),
- la surface terrière totale des gros arbres morts sur pied ( $G_{BMD}$ ,  $m^2 \cdot ha^{-1}$ ,  $d_{1,30m} \geq 20$  cm),
- le volume des grosses pièces de bois mort au sol ( $V_{BMS}$ ,  $m^3 \cdot ha^{-1}$ ,  $d_{min} \geq 20$  cm),
- le nombre de stades de décomposition des grosses pièces de bois mort au sol présent sur la placette ( $ND_{BMS}$ ).

L'indice de maturité a été calculé comme suit :

$$IMAT = \frac{1}{4} \left( \frac{G_{TGB}}{\eta \cdot 99(G_{TGB})} + \frac{G_{BMD}}{\eta \cdot 99(G_{BMD})} + \frac{V_{BMS}}{\eta \cdot 99(V_{BMS})} + \frac{ND_{BMS}}{5} \right)$$

Les valeurs  $G_{TGB}$ ,  $G_{BMD}$ ,  $V_{BMS}$  ont été plafonnées à leurs quantiles respectifs de 99% ( $\eta_{.99}$ ) afin de s'assurer que les valeurs extrêmes n'aient pas un poids disproportionné dans les calculs ultérieurs.

L'IMAT varie de 0 à 1 et permet d'ordonner les placettes sur une échelle de maturité relative.

## Sélection des métriques LiDAR et des variables topographiques

Les données LiDAR ont été acquises entre le 16 janvier et le 28 mars 2019 avec un capteur RIEGL LMS VQ780i. La densité moyenne d'environ 40 pts/m<sup>2</sup>. Nous avons sélectionné des métriques LiDAR a priori significantes pour la maturité, et qui s'étaient avérées utiles dans des études précédentes (tab. 2).

Type de métrique	Nom de la métrique	Définition
Hauteurs maximales et moyennes	Zmax, Zmean	Hauteur maximale et moyenne des points classés comme végétation dans le nuage de points (m)
	Tree.meanH	Hauteur moyenne des arbres détectés (m)
	TreeSup30.density	Densité des arbres détectés de plus de 30 m de hauteur (tiges.ha <sup>-1</sup> )
Distribution des hauteurs	Zsd, Zkurt	Écart-type et aplatissement des valeurs de hauteur des points classés comme végétation dans le nuage de points
	Tree.sdH, Tree.giniH	Écart-type et coefficient de Gini des hauteurs des arbres détectés
Dimensions du houppier	Tree_meanCrownSurface Tree_meanCrownVolume	Surface et volume moyens des houppiers des arbres détectés
Intensité	lmean, lsd	Moyenne et écart type des intensités normalisées des points classés comme végétation dans le nuage de points.
Densité du peuplement	Tree.density	Densité des arbres détectés (tiges.ha <sup>-1</sup> )
Couvert végétal	Tree.canopy_cover	Pourcentage de la surface de la placette couverte par les couronnes des arbres détectés
Variables environnementales	Elevation	Altitude au-dessus du niveau de la mer (m)
	Slope	Pente (%)

Tableau n° 2 : métriques LiDAR sélectionnées

Le prétraitement et la classification des données ont été effectués par le fournisseur de données. Les points au sol ont été séparés des points de végétation avec l'algorithme itératif TIN (Axelsson, 2000) pour produire un modèle numérique de terrain (MNT). Nous avons utilisé la fonction « `normalize_height` » (option de l'algorithme TIN) implémentée dans le package `lidR` (Roussel et al., 2020) pour calculer la hauteur de chaque point de végétation en soustrayant la valeur d'altitude de la valeur d'élévation du sol interpolée aux coordonnées planimétriques. Les métriques LiDAR ont été calculées pour les nuages de points normalisés extraits sur des disques de rayon horizontal 20 m dont les centres correspondent aux relevés GNSS effectués aux centres des placettes de terrain. Les métriques LiDAR ont été soit directement dérivées du nuage de points (hauteurs et intensités des retours de végétation), soit calculées après la détection individuelle des arbres. Les calculs ont été effectués à l'aide des fonctions des packages R `lidR` (<https://github.com/Jean-Romain/lidR/>) et `lidaRtree` (<https://gitlab.irstea.fr/jean-matthieu.monnet/lidaRtree>). Un exemple est disponible sur [https://gitlab.irstea.fr/jean-matthieu.monnet/lidartree\\_tutorials/-/wikis/Forest-structure-metrics-mapping](https://gitlab.irstea.fr/jean-matthieu.monnet/lidartree_tutorials/-/wikis/Forest-structure-metrics-mapping).

Les métriques LiDAR caractérisant les distributions de la hauteur (`Zmax`, `Zmean`, `Tree.meanH`, `TreeSup30.density` et `Zsd`, `Zkurt`, `Tree.sdH`, `Tree.giniH`) sont de bons prédicteurs pour les très gros arbres. Des métriques similaires se sont avérées appropriées pour prédire la surface terrière totale des peuplements (Bright et al., 2013) et la densité des arbres de gros diamètre (Korhonen et al., 2016). En effet, même si au-delà d'un certain seuil de diamètre, la croissance en diamètre ne s'accompagne plus d'une croissance en hauteur, les plus gros arbres sont potentiellement aussi les plus hauts (Jennings, 1999). De plus, les métriques LiDAR caractérisant la distribution de la hauteur sont également de bons prédicteurs des gros arbres morts debouts (Bater et al., 2009 ; Casas et al., 2016 ; Martinuzzi et al., 2009) ou du volume de bois mort au sol (Pesonen et al., 2008).

De la même manière, les arbres les plus gros sont aussi potentiellement les arbres dont les houppiers sont les plus développés. Nous avons donc sélectionné deux métriques caractérisant les dimensions des houppiers des arbres détectés (`Tree_meanCrownSurface` et `Tree_meanCrownVolume`).

Les informations sur l'intensité des échos (`lmean`, `lsd`) fournissent des informations sur la distribution des éléments photosynthétiques et non photosynthétiques dans le peuplement et sont de bons prédicteurs de la biomasse morte totale (Kim et al., 2009), de la surface terrière des arbres morts debout (Bright et al., 2013 ; Wing et al., 2015) et du volume des grosses pièces de bois mort au sol (Pesonen et al., 2008).

De plus, en supposant que la canopée des peuplements matures peut être légèrement plus dense et plus ouverte que celle des peuplements environnants, nous avons sélectionné une métrique LiDAR liée à la densité des arbres (`Tree.density`) et une autre liée à la couverture de la canopée (`Tree.canopy_cover`). Casas et al. (2016) ont constaté qu'une métrique similaire, nommée "fraction de couvert", était un bon prédicteur pour détecter les arbres morts debout.

Les métriques LiDAR sélectionnées ne sont pas fortement corrélées (coefficient de corrélation de Spearman < 0,85). Nous avons ajouté deux variables topographiques susceptibles d'avoir un impact sur la distribution spatiale des forêts matures : l'altitude et la pente, que nous avons considérées comme des approximations appropriées de l'accessibilité et de l'exploitabilité des peuplements.

## Modélisation statistique et validation

Nous avons relié l'indice de maturité (IMAT) et les attributs de maturité (GTTGB, GBMD, VBMS), calculés à partir de nos données de terrain, aux métriques LiDAR sélectionnées à l'aide d'un algorithme dit "de forêt d'arbres décisionnels", technique d'apprentissage automatique basée sur des arbres de décision multiples (Breiman, 2001). Les forêts aléatoires ont été développées à partir de 1000 arbres et la valeur optimale du nombre de prédicteurs échantillonnés à chaque nœud de chaque arbre a été fixée à deux selon une procédure de réglage qui minimise l'erreur d'estimation (Liaw et Wiener, 2002). L'importance de chaque métrique LiDAR a été évaluée selon le pourcentage d'augmentation de l'erreur quadratique moyenne lorsque la variable est permutée de façon aléatoire (Liaw et Wiener, 2002). Ces valeurs d'importance sont calculées pour 20 répliqués afin de stabiliser les résultats. Enfin, le modèle a été évalué à l'aide de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSEP), calculée à partir de l'ensemble du jeu de données ou de 100 répliqués d'une validation croisée avec remise (partition du jeu de données en 10 sous-ensembles). Pour faciliter l'interprétation de cet indice, nous avons calculé le rapport entre le RMSEP et l'indice de maturité moyen observé. L'erreur exprimée par le RMSEP s'interprète donc comme une proportion relative à la valeur moyenne des indices de maturité. Enfin, nous avons calculé la corrélation entre les indices de maturité observés et prédits avec le coefficient de Spearman, sur l'ensemble du jeu de données ou à partir de la validation croisée. Ces analyses ont été réalisées avec le logiciel R **v.3.6.0** et le package **randomForest v.4.6-14** (Liaw et Wiener, 2002).

## Réalisation des cartes de maturité

La qualité des modèles obtenus étant jugée satisfaisante, nous avons extrait les métriques LiDAR sur l'ensemble de la zone couverte pour construire les cartes suivantes :

- Cartes de maturité des seuls peuplements feuillus (base BD Forêt V2), pour lesquels les valeurs prises par les métriques LiDAR restent dans la gamme des valeurs prises sur le référentiel terrain : carte de maturité relative (IMAT), carte de localisation des zones riches en Très Gros Bois, carte de localisation des zones riches en gros Bois Mort Debout, carte de localisation des zones riches en grosses pièces de bois mort au sol,
- Cartes de maturité des peuplements feuillus et mixtes (sur la base BD Forêt V2), pour lesquels les valeurs prises par les métriques LiDAR restent dans la gamme des valeurs prises sur le référentiel terrain : carte de maturité relative (IMAT), carte de localisation des zones riches en Très Gros Bois, carte de localisation des zones riches en gros Bois Mort Debout, carte de localisation des zones riches en grosses pièces de bois mort au sol,
- Cartes de maturité des seuls peuplements feuillus et des peuplements feuillus et mixtes (sur la base BD Forêt V2) quelles que soient les valeurs prises par les métriques LiDAR : carte de maturité relative (IMAT), carte de localisation des zones riches en Très Gros Bois, carte de localisation des zones riches en gros Bois Mort Debout, carte de localisation des zones riches en grosses pièces de bois mort au sol.

## **Validation terrain**

41 placettes de validation (carte n° 2) ont été réalisées sur le terrain pour contrôler la qualité des cartes obtenues en utilisant la carte de maturité relative (IMAT) des peuplements feuillus et mixtes pour lesquels les valeurs prises par les métriques LiDAR restent dans la gamme des valeurs prises sur le référentiel terrain. L'objectif étant d'identifier les zones les plus matures, les placettes ont été installées aléatoirement dans les surfaces forestières avec une valeur d'IMAT prédite supérieure à 0,25 (peuplements feuillus et mixtes, métriques LiDAR dans la gamme des valeurs prises sur le référentiel terrain).

Les valeurs prédites par le modèle et observées sur les placettes de contrôle ont été réparties en deux catégories : placettes pas ou peu matures ( $IMAT \leq 0,25$ ) et placettes assez à très matures ( $IMAT > 0,25$ ). Le taux de vrais positifs (maturité prédite = maturité observée) a permis d'évaluer la qualité de la carte.

NB : en raison de la précision du GPS utilisé, 2 placettes initialement prévues avec un IMAT prédit supérieur à 0,25 ont été réalisées à proximité dans des zones où l'IMAT prédit était plus faible.

## **Prise en compte de la surface terrière des peuplements**

Les données LiDAR ont également été utilisées pour construire un modèle de prédiction et une carte de la surface terrière des peuplements (annexe 1). La carte réalisée a ainsi permis d'exclure de la carte de maturité relative les zones couvertes par des peuplements forestiers à faible surface terrière ( $\leq 15 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ). En effet, les observations de terrain ont montré que ces peuplements étaient pour partie des peuplements exploités au stade de la coupe d'ensemencement, peuplements dont la structure présente des points communs avec celle des forêts matures (gros arbres séparés par des trouées).

# Résultats

## Maturité du référentiel de terrain

Les placettes du référentiel de terrain sont en majorité pas ou peu matures (71%, fig. 2). L'IMAT varie de 0,01 à 0,73 avec une valeur moyenne de 0,18. Les placettes matures représentent 5,1 % du jeu de données.

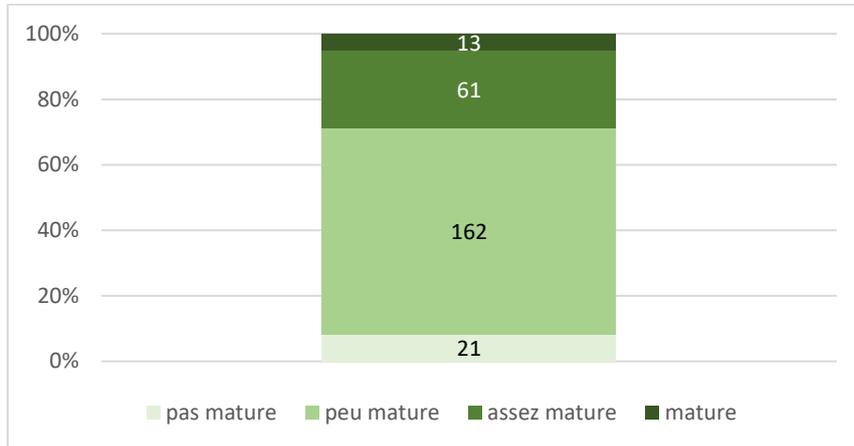


Figure n° 2 : maturité du référentiel de terrain

(IMAT = 0 pas mature ;  $0 < \text{IMAT} < 0.25$  peu mature ;  $0.25 \leq \text{IMAT} < 0.5$  ; assez mature ;  $\text{IMAT} \geq 0.5$  très mature) Le chiffre désigne le nombre de placettes

Les valeurs plafonnées de la surface terrière totale des très gros arbres vivants et des gros arbres morts sur pied varient respectivement 0 à  $26,9 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$  et de 0 à  $10,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ . La valeur plafonnée du volume des grosses pièces de bois mort au sol varie de 0 à  $73,0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ .

La surface terrière des très très gros bois est faiblement corrélée (positivement) à la surface terrière des gros bois morts debout et au nombre de stades de dégradation des grosses pièces de bois mort au sol (fig. 3). Les attributs relatifs au bois mort sont assez fortement corrélés (positivement) entre eux, en particulier le volume et le nombre de stades de dégradation des grosses pièces de bois mort au sol (fig. 3). En d'autres termes, la maturité du référentiel de terrain semble d'une part portée par des placettes riches en très très gros bois, d'autre part par des placettes riches en bois mort.

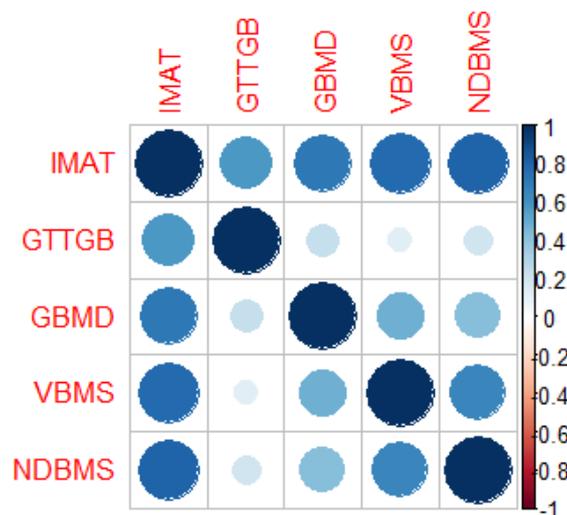


Figure 3 : Corrélations entre les attributs de maturité calculés à partir des placettes terrain.

## Précision des modèles

Les erreurs d'estimation moyennes (fig. 4) sont relativement faibles pour les modèles de prédiction de l'IMAT et de la surface terrière des très gros bois (RMSEP respectives : 0,28 et 0,35). Elles sont plus importantes pour la surface terrière du gros bois mort debout et le volume des grosses pièces de bois mort au sol (RMSEP respectives : 0,63 et 0,62). Elles traduisent un biais de prédiction : les valeurs d'indices faibles ont tendance à être légèrement surestimées, tandis que les valeurs élevées sont sous-estimées par les modèles (fig. 4).

La corrélation sur les rangs entre les valeurs observées et prédites est cependant très élevée pour l'IMAT et pour la surface terrière des très gros bois (coefficients de corrélation de Spearman 0,95) ; elle reste assez élevée pour la surface terrière du gros bois mort debout et pour le volume des grosses pièces de bois mort au sol (coefficients de corrélation de Spearman 0,87). En d'autres termes, en dépit des erreurs de prédiction, les modèles obtenus conservent la hiérarchie entre les placettes sur un gradient de maturité.

Les écarts de précision entre les données de calibration et de validation sont importants que ce soit pour l'erreur d'estimation moyenne ou le coefficient de corrélation.

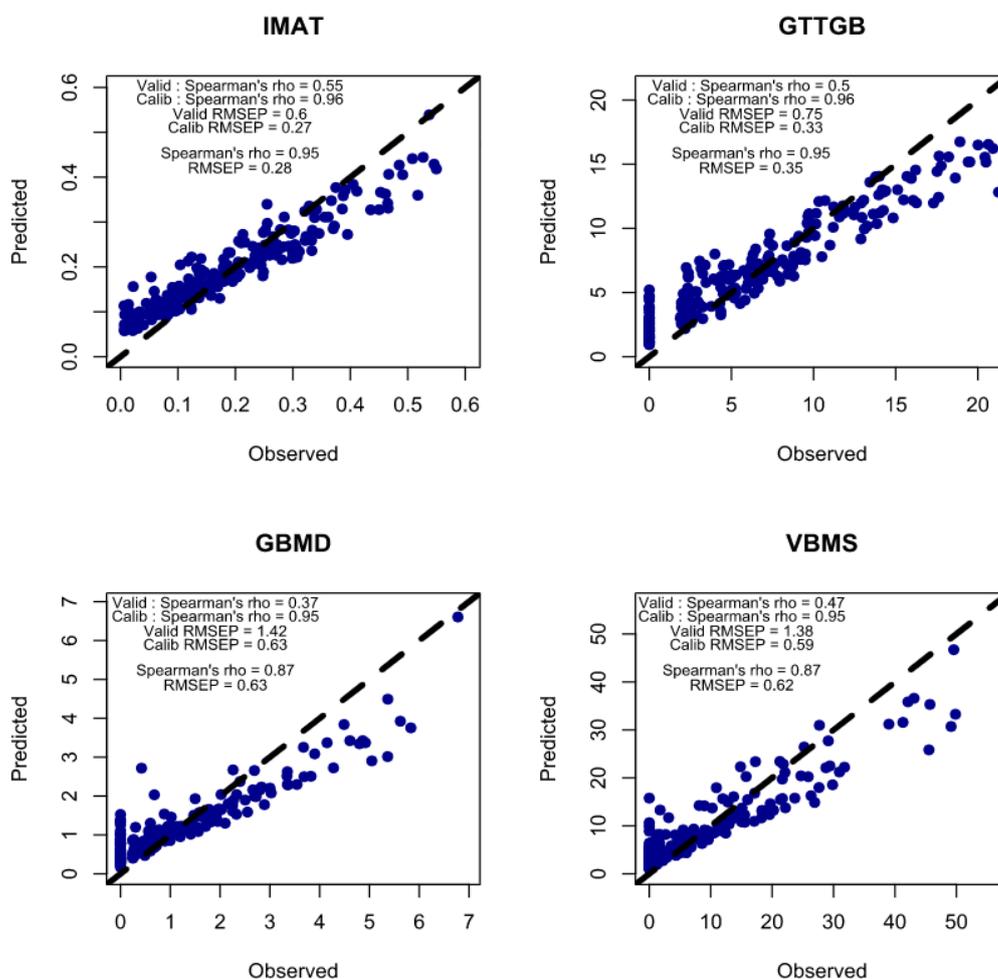


Figure 4 : Relation entre les indices de maturité observés et prédits. RMSEP : erreur quadratique moyenne de prédiction, exprimée proportionnellement à la valeur moyenne des indices. Le RMSEP et le coefficient de corrélation de Spearman ( $\rho$ ) sont calculés à partir des données de calibration ou de validation uniquement (*Calib* et *Valid*) ou les deux. La ligne en pointillés est la ligne 1:1 ( $y=x$ ).

## Importance des variables prédictives (fig. 5)

L'altitude (Elevation) est classée au premier rang en termes d'importance pour prédire l'IMAT. La hauteur maximale des points du nuage (Zmax) est seconde, les autres métriques calculées à l'échelle du nuage de points (Zmean et Zkurt) sont de faible importance. Les métriques calculées à l'échelle des arbres détectés sont classées parmi les plus importantes (Tree.sdH, Tree\_meanCrownSurface, Tree\_meanCrownVolume, Tree.CanopyCover, Tree.giniH, Tree.density, Tree.meanH, TreeSup30.density). Les métriques liées à l'intensité des échos (lmean et lsd) ont une faible importance. La pente (Slope) a l'importance la plus faible.

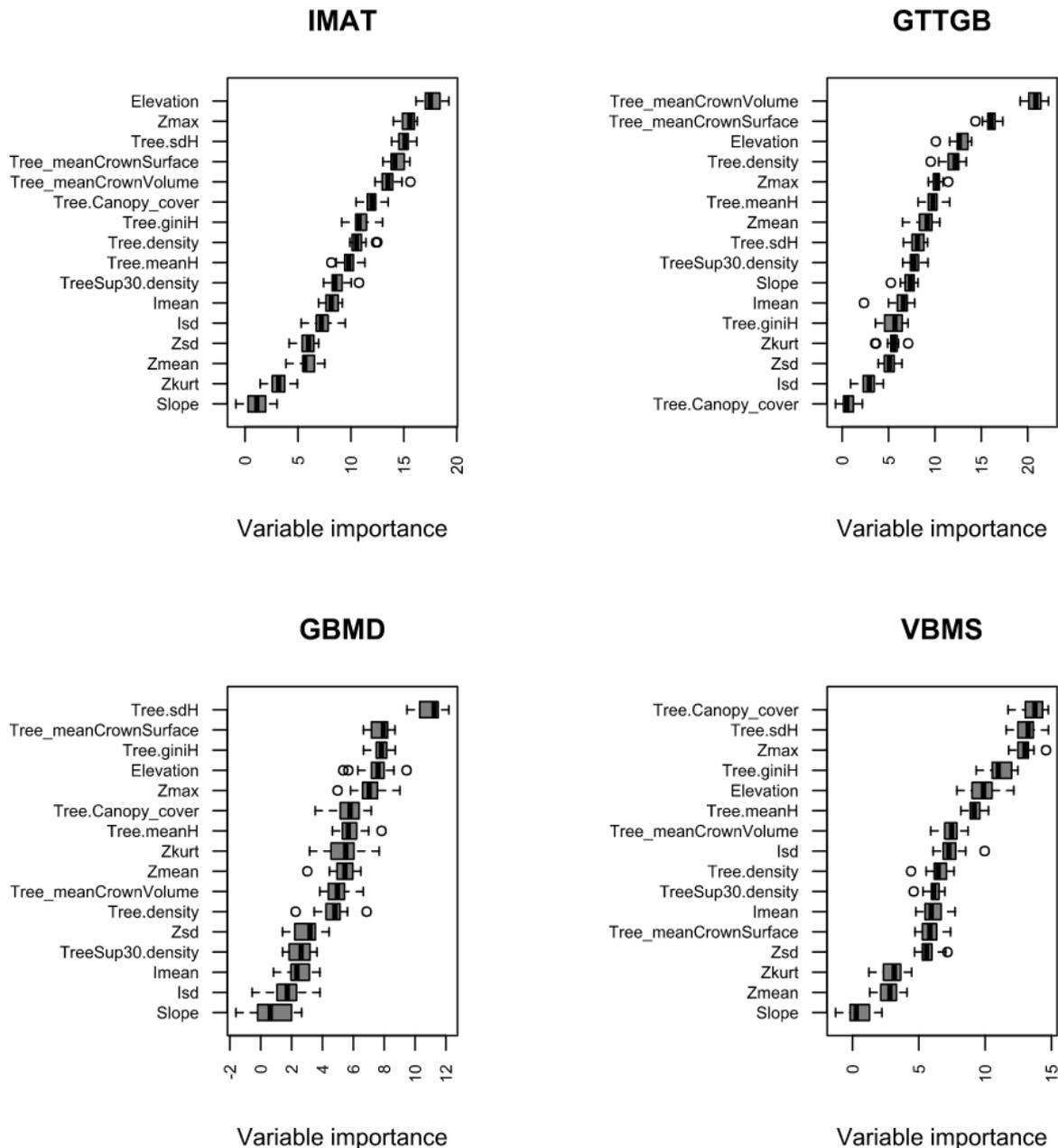


Figure 5 : Importance des métriques LiDAR et des variables topographiques. L'importance est l'augmentation moyenne de l'erreur quadratique (en pourcentage) calculée à partir des données de validation en permutant la variable de manière aléatoire. Voir le tableau 3 pour les abréviations.

Le classement des métriques par ordre d'importance diffère pour la surface terrière des très gros bois. Les deux variables de taille du houppier (Tree\_meanCrownVolume et Tree\_meanCrownSurface) sont les plus importantes. Comme pour l'IMAT, l'altitude est parmi les variables haut classées. Tree.density et Tree.meanH sont ensuite respectivement en 4<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> positions, Zmax et Zmean en 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> positions.

Pour la surface terrière des gros bois mort debout, la métrique Tree.sdH est la variable prédictive la plus importante et se détache des autres. Viennent ensuite les métriques Tree\_meanCrownSurface, Tree.giniH, Elevation et Zmax.

Enfin, pour le volume des grosses pièces de bois mort au sol, les trois métriques les plus importantes sont Tree.Canopy\_cover, Tree.sdH et Zmax. Viennent ensuite Tree.giniH, Elevation et Tree.meanH. A l'exception de Zmax, les métriques calculées sur le nuage de points sont de faible importance.

### Effet des variables prédictives

L'indice de maturité des forêts du Morvan (IMAT) augmente avec la hauteur max (Zmax), l'hétérogénéité de la distribution des hauteurs (Tree.sdH et Tree.giniH) ainsi qu'avec la taille des houppiers (Tree\_meanCrownSurface et Tree\_meanCrownVolume). En moyenne, la maturité diminue avec l'altitude (Elevation), la fermeture du couvert à partir de 96% (Tree.Canopy\_cover) et la densité d'arbres (Tree.density). Les autres variables ont une plus faible importance et ne montrent pas de tendance claire.

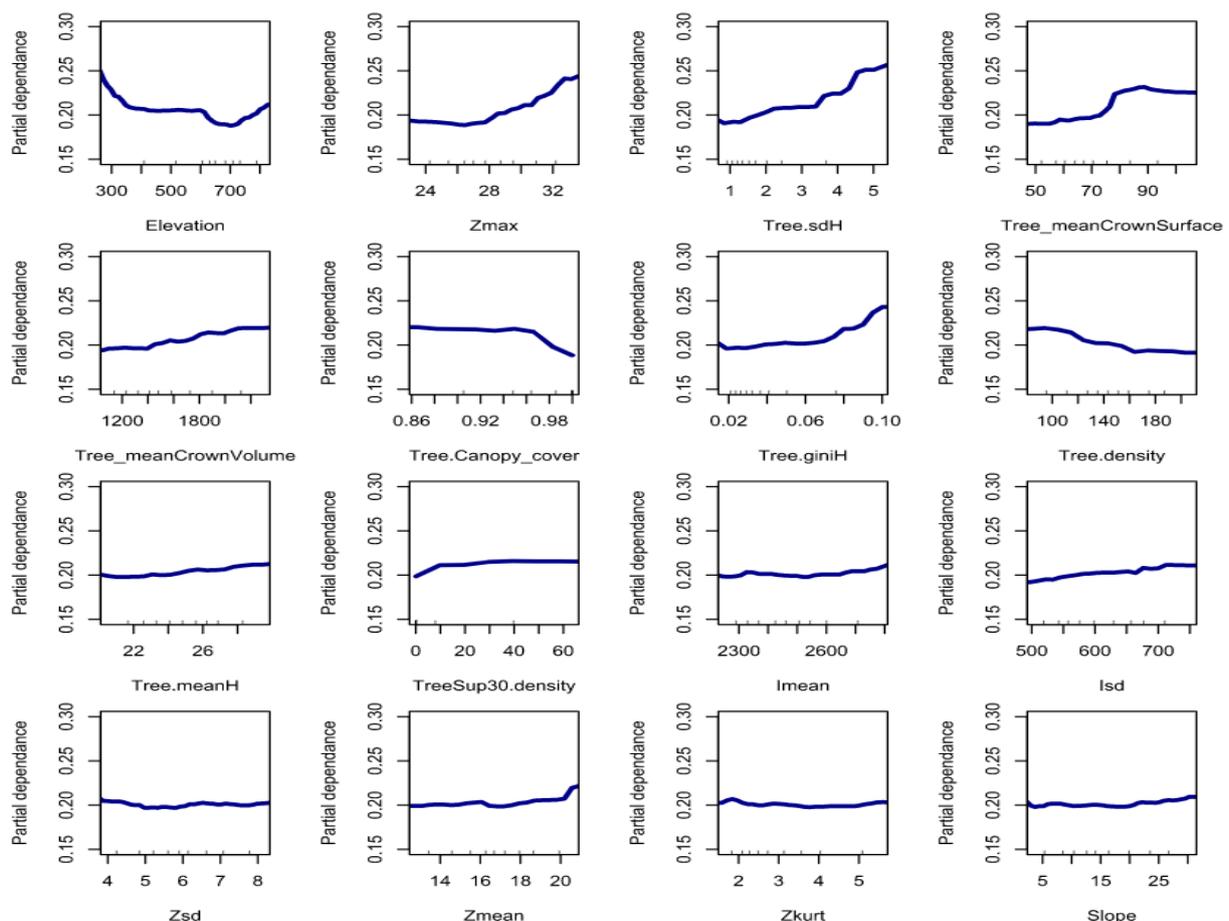


Figure 6a : Relation entre l'IMAT et les variables LiDAR et topographiques. La réponse d'une variable (*partial dependence*) est évaluée en fixant les autres variables prédictives à leur valeur moyenne (Friedman, 2001).

Les effets des métriques sur GTGB sont similaires à ceux sur l'IMAT, avec des effets positifs marqués des houppiers (volume et surface). Les hauteurs moyenne et maximale des points du nuage ainsi que la hauteur moyenne des arbres détectés arbres (Zmax, Tree.meanH, Zmean) sont aussi positivement corrélées à la présence de très gros bois.

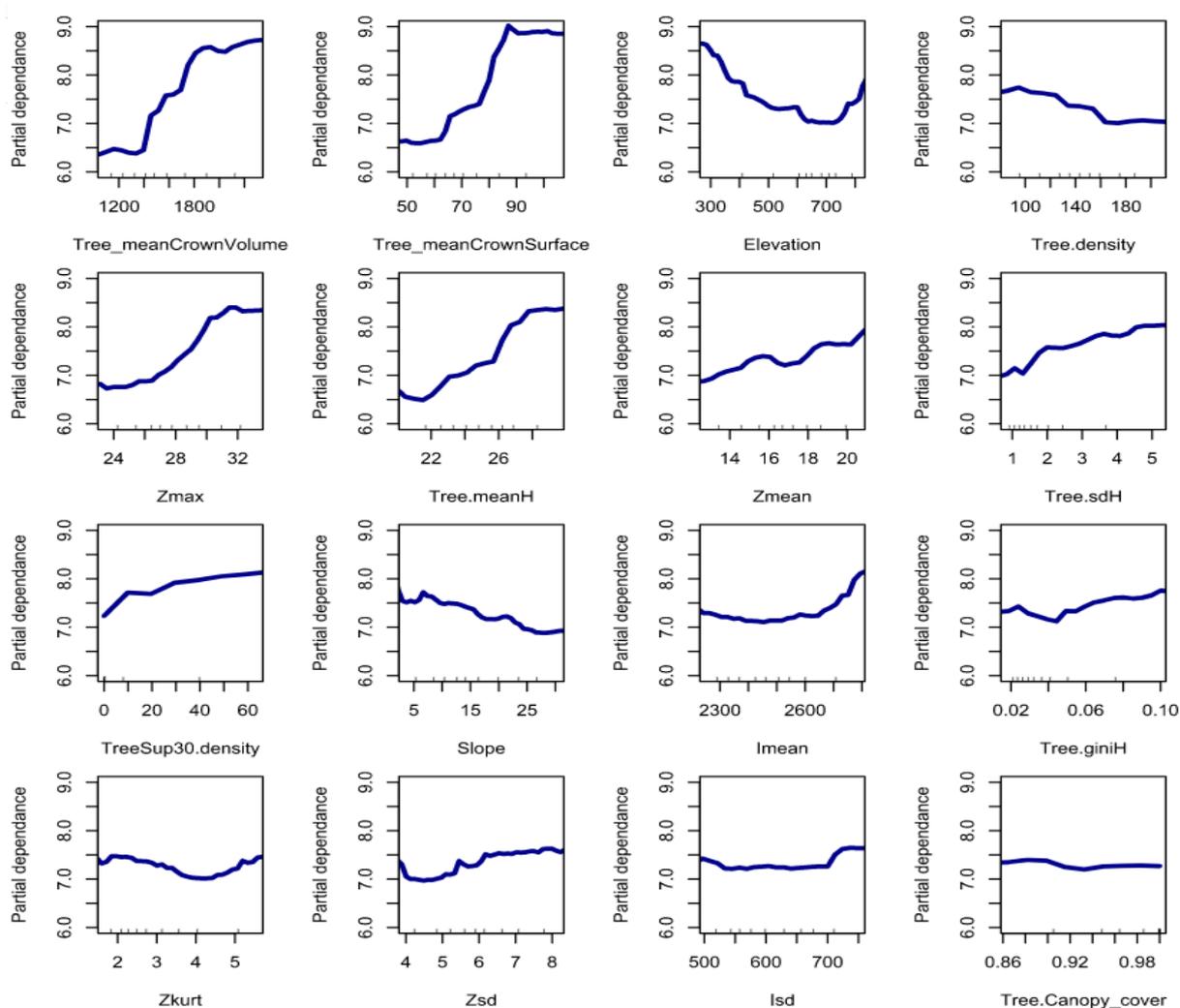


Figure 6b : Relation entre GTGB et les variables LiDAR et topographiques. La réponse d'une variable (*partial dependence*) est évaluée en fixant les autres variables prédictives à leur valeur moyenne (Friedman, 2001).

On retrouve des effets similaires pour GBMD pour les 6 premières variables en termes d'importance. Les tendances sont moins claires pour les autres.

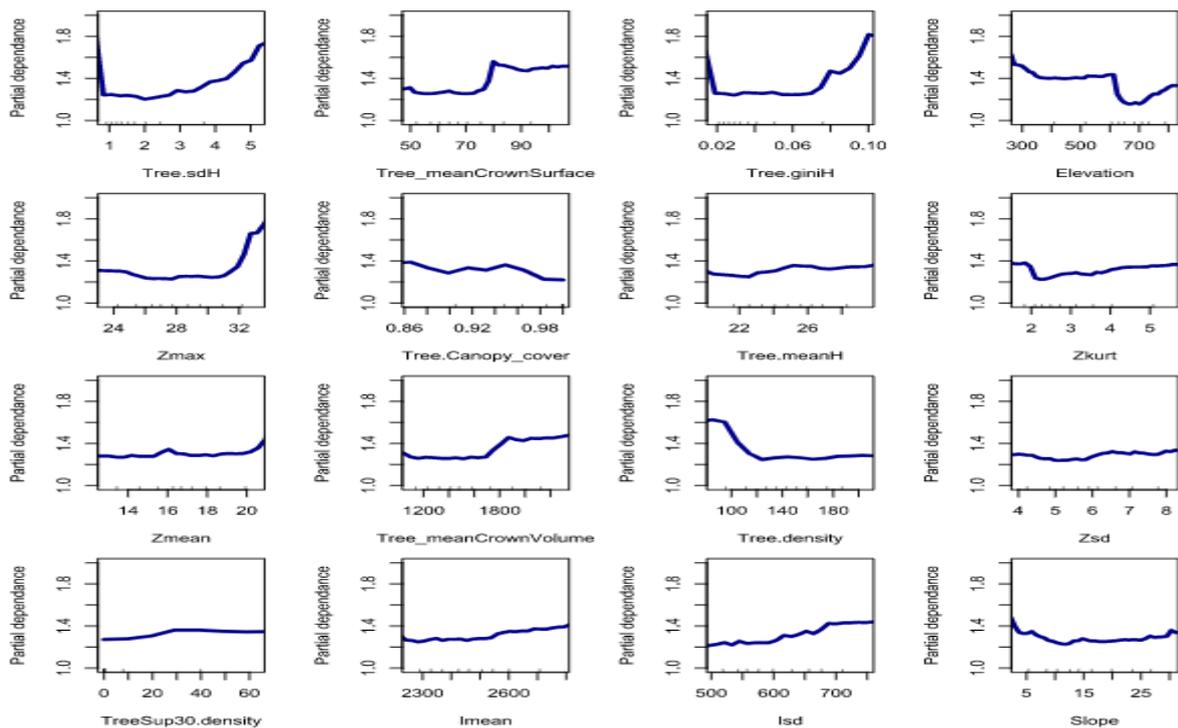


Figure 6c : Relation entre GBMD et les variables LiDAR et topographiques. La réponse d'une variable (*partial dependence*) est évaluée en fixant les autres variables prédictives à leur valeur moyenne (Friedman, 2001).

Les effets des métriques sont similaires sur VBMS. Les cinq variables les plus importantes ont des tendances assez claires, les autres sont plus difficiles à interpréter.

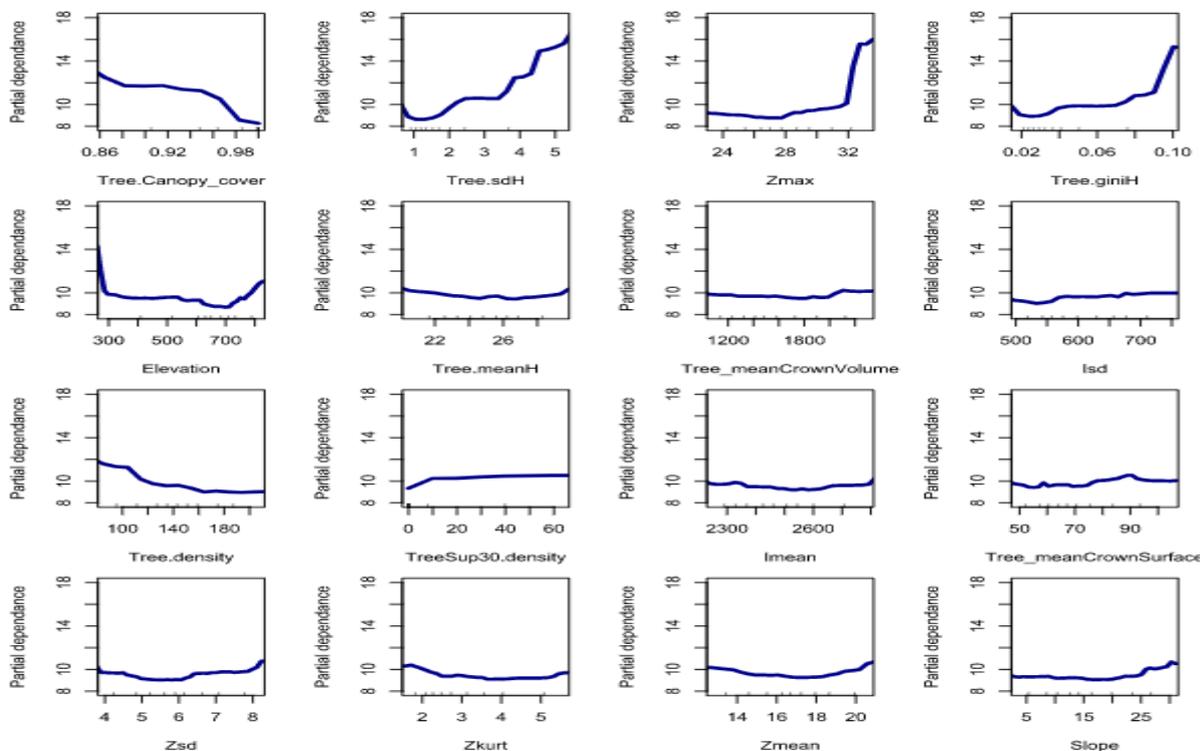


Figure 6d : Relation entre VBMS et les variables LiDAR et topographiques. La réponse d'une variable (*partial dependence*) est évaluée en fixant les autres variables prédictives à leur valeur moyenne (Friedman, 2001).

## Cartes intermédiaires

L'ensemble des cartes de maturité produites (cf. Matériel & méthodes / Réalisation des cartes de maturité) est fourni sous forme numérique au format tif. La résolution spatiale des cartes est de 35 m.

**Attribut\_feuillus\_sansextrapolation.tif** : cartes des attributs de maturité des seuls peuplements feuillus (base BD Forêt V2), pour lesquels les valeurs prises par les métriques LiDAR restent dans la gamme des valeurs prises sur le référentiel terrain

**Attribut\_feuillus&mixtes\_sansextrapolation.tif** : cartes des attributs de maturité des peuplements feuillus et mixtes (base BD Forêt V2), pour lesquels les valeurs prises par les métriques LiDAR restent dans la gamme des valeurs prises sur le référentiel terrain

**Attribut\_feuillus.tif** : cartes des attributs de maturité des seuls peuplements feuillus (base BD Forêt V2), quelles que soient les valeurs prises par les métriques LiDAR

**Attribut\_feuillus&mixtes.tif** : cartes des attributs de maturité des peuplements feuillus et mixtes (base BD Forêt V2), quelles que soient les valeurs prises par les métriques LiDAR

## Placettes de contrôle

La liste des placettes de contrôle prospectées est jointe en annexe 2.

Parmi les 41 placettes prospectées, 6 placettes correspondent à des peuplements très récemment exploités. De plus, 1 placette n'a pas été réalisée en raison d'un décalage des coordonnées. Au total, le contrôle de la qualité de la carte porte sur le relevé des attributs permettant de calculer l'indice de maturité sur 34 placettes aléatoirement réparties dans les peuplements feuillus et mixtes (sur la base IFN V2), pour lesquels les valeurs prises par les métriques LiDAR restent dans la gamme des valeurs prises sur le référentiel terrain de calibration.

Le taux de vrais positifs (maturité prédite = maturité observée, seuil IMAT : 0,25) est de 76 %.

## Prise en compte de la surface terrière, carte définitive

L'exclusion des zones couvertes par des peuplements forestiers à faible surface terrière ( $\leq 15 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) permet d'améliorer la qualité de la carte de l'IMAT et d'atteindre un taux de vrais positifs égal à 81 %.

En conséquence, les cartes présentées précédemment ont été précisées (fig. 7), les cartes complètes sont fournies sous forme numérique au format tif).

**Attribut\_feuillus\_sansextrapolation\_G15.tif** : cartes des attributs de maturité des seuls peuplements feuillus (base IFN V2), pour lesquels les valeurs prises par les métriques LiDAR restent dans la gamme des valeurs prises sur le référentiel terrain, avec une surface terrière supérieure à  $15 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$

**Attribut\_feuillus&mixtes\_sansextrapolation\_G15.tif** : cartes des attributs de maturité des peuplements feuillus et mixtes (base IFN V2), pour lesquels les valeurs prises par les métriques LiDAR restent dans la gamme des valeurs prises sur le référentiel terrain, avec une surface terrière supérieure à  $15 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$

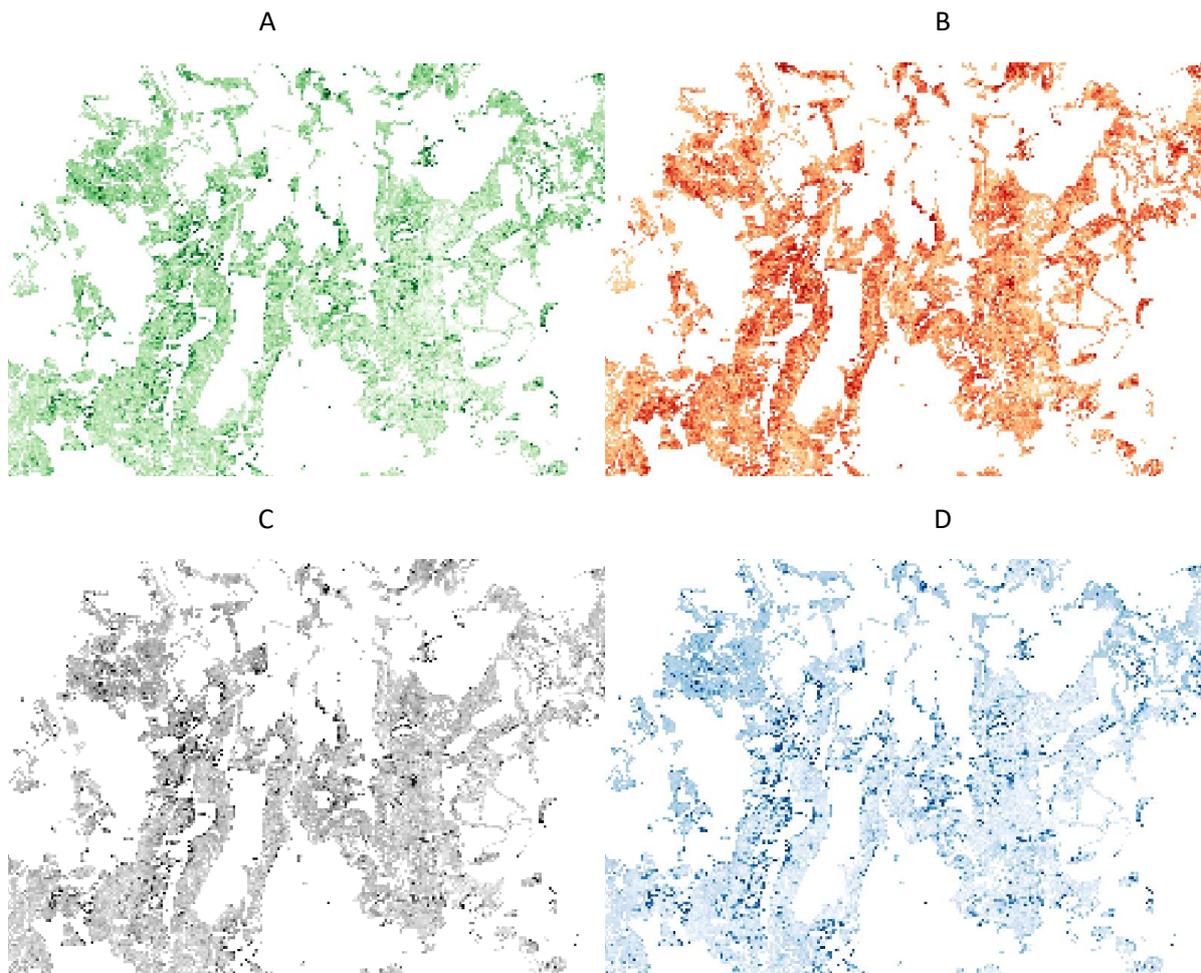


Figure 7 : extraits des cartes de maturité des forêts du PNR du Morvan (peuplements feuillus et mixtes, métriques LiDAR dans la gamme des valeurs prises sur le référentiel terrain,  $G > 15 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ );  
 A/ IMAT B/ GTTGB C/ GBMD D/ VBMS

## Conclusion

Toutes les relations attendues entre l'indice de maturité (IMAT) et les métriques LiDAR ont été confirmées par notre modèle statistique. La maturité structurale des peuplements est positivement corrélée avec les métriques LiDAR quantifiant la hauteur (maximum et hétérogénéité) des points des nuages ou des arbres détectés, les dimensions des houppiers des arbres détectés, l'hétérogénéité de la distribution de l'intensité des signaux retours, et négativement corrélée avec les métriques quantifiant la densité des arbres et la fermeture du couvert.

Le classement des variables prédictives par ordre d'importance varie selon l'attribut de maturité prédit :

- les dimensions des houppiers détectés (surface et volume) sont les deux variables les plus importantes pour prédire la surface terrière des très gros bois,
- les métriques traduisant l'hétérogénéité des hauteurs sont de bons prédicteurs de la surface terrière du bois mort (debout et au sol),
- les métriques traduisant la fermeture du couvert et, dans une moindre mesure, l'hétérogénéité de la distribution de l'intensité des signaux retours, sont également de bons prédicteurs du bois mort au sol.

La bonne corrélation entre les valeurs observées et prédites de l'indice ou des attributs de maturité permet de classer les peuplements forestiers sur un gradient de maturité relative et d'établir des cartes. L'application de filtres successifs (type de peuplement selon la BD Forêt V2, gamme des valeurs prises par les métriques LiDAR à l'intérieur du référentiel de calibration, surface terrière des peuplements) permet d'accroître la qualité des cartes mais, en corollaire, diminue les surfaces couvertes par ces dernières.

La bonne corrélation entre les valeurs observées et prédites des indices de maturité est néanmoins associée à des erreurs d'estimation non négligeables principalement dues à un biais de prédiction. Notre modèle sous-estime la maturité des peuplements les plus matures et surestime légèrement la maturité des peuplements moins matures. Il convient donc de bien garder à l'esprit que la maturité prédite est une maturité relative et en aucun cas une maturité absolue.

## Bibliographie

- Axelsson, P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptative TIN models. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* XXXIII, 110–117.
- Bater, C.W., Coops, N.C., Gergel, S.E., LeMay, V., Collins, D., 2009. Estimation of standing dead tree class distributions in northwest coastal forests using lidar remote sensing. *Can. J. For. Res.* 39, 1080–1091. <https://doi.org/10.1139/X09-030>
- Bouvet, A., Paillet, Y., Archaux, F., Tillon, L., Denis, P., Gilg, O., Gosselin, F., 2016. Effects of forest structure, management and landscape on bird and bat communities. *Environ. Conserv.* 43, 148–160. <https://doi.org/10.1017/S0376892915000363>
- Bouvier, M., Durrieu, S., Gosselin, F., Hergigny, B., 2017. Use of airborne lidar data to improve plant species richness and diversity monitoring in lowland and mountain forests. *PLOS ONE* 12, e0184524. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184524>
- Brang, P., Schönenberger, W., Frehner, M., Schwitter, R., Wasser, B., 2006. Management of protection forests in the European Alps: an overview. *For. Snow Landsc. Res.* 80, 23–44.
- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Mach. Learn.* 5–32.
- Bright, B.C., Hudak, A.T., McGaughey, R., Andersen, H.-E., Negron, J., 2013. Predicting live and dead tree basal area of bark beetle affected forests from discrete-return lidar. *Can. J. Remote Sens.* 39, 13.
- Casas, Á., García, M., Siegel, R.B., Koltunov, A., Ramírez, C., Ustin, S., 2016. Burned forest characterization at single-tree level with airborne laser scanning for assessing wildlife habitat. *Remote Sens. Environ.* 175, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.044>
- Cateau, E., Larrieu, L., Vallauri, D., Savoie, J.-M., Touroult, J., Brustel, H., 2015. Ancienneté et maturité : deux qualités complémentaires d'un écosystème forestier. *C. R. Biol.* 338, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2014.10.004>
- Dittrich, S., Jacob, M., Bade, C., Leuschner, C., Hauck, M., 2014. The significance of deadwood for total bryophyte, lichen, and vascular plant diversity in an old-growth spruce forest. *Plant Ecol.* 215, 1123–1137. <https://doi.org/10.1007/s11258-014-0371-6>
- Friedman, J.H., 2001. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Ann. Stat.* 29. <https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>
- Fuhr, M., Bourrier, F., Cordonnier, T., 2015. Protection against rockfall along a maturity gradient in mountain forests. *For. Ecol. Manag.* 354, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.012>
- Glad, A., Reineking, B., Montadert, M., Depraz, A., Monnet, J., 2020. Assessing the performance of object-oriented Li DAR predictors for forest bird habitat suitability modeling. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 6, 5–19. <https://doi.org/10.1002/rse2.117>
- Gunes, G., Hans, L., 2007. Ecotourism in Old-Growth Forests in Turkey: The Kure Mountains Experience. *Mt. Res. Dev.* 281–283.
- Gustafson, L., bauhus, J., Kouki, J., Löhmus, A., Sverdrup-Thygeson, A., 2013. Retention Forestry - an integrated approach in practical use, in: *Integrative Approaches as an Opportunity for the Conservation of Forest Biodiversity*. Kraus D., Krumm F., pp. 74–81.
- Janssen, P., 2016. Influences relatives de l'ancienneté et de la maturité sur la biodiversité : implications pour la conservation en forêts de montagne. *Grenoble Alpes, Grenoble*.

- Janssen, P., Cateau, E., Fuhr, M., Nusillard, B., Brustel, H., Bouget, C., 2016. Are biodiversity patterns of saproxylic beetles shaped by habitat limitation or dispersal limitation? A case study in unfragmented montane forests. *Biodivers. Conserv.* 25, 1167–1185. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1116-8>
- Janssen, P., Fuhr, M., Cateau, E., Nusillard, B., Bouget, C., 2017. Forest continuity acts congruently with stand maturity in structuring the functional composition of saproxylic beetles. *Biol. Conserv.* 205, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.11.021>
- Jennings, S., 1999. Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry* 72, 59–74. <https://doi.org/10.1093/forestry/72.1.59>
- Kim, S., McGaughey, R.J., Andersen, H.-E., Schreuder, G., 2009. Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. *Remote Sens. Environ.* 113, 1575–1586. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.03.017>
- Kim, Y., Yang, Z., Cohen, W.B., Pflugmacher, D., Lauver, C.L., Vankat, J.L., 2009. Distinguishing between live and dead standing tree biomass on the North Rim of Grand Canyon National Park, USA using small-footprint lidar data. *Remote Sens. Environ.* 113, 2499–2510. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.010>
- Komonen, A., Müller, J., 2018. Dispersal ecology of deadwood organisms and connectivity conservation. *Conserv. Biol.* 32, 535–545. <https://doi.org/10.1111/cobi.13087>
- Korhonen, L., Salas, C., Østgård, T., Lien, V., Gobakken, T., Næsset, E., 2016. Predicting the occurrence of large-diameter trees using airborne laser scanning. *Can. J. For. Res.* 46, 461–469. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0384>
- Lachat, T., Büttler, R., 2007. Gestion des vieux arbres et du bois mort. Ilots de sénescence, arbres-habitat et métapopulations saproxyliques. EPFL WSL, Lausanne.
- Larrieu, L., Gonin, P., 2008. L'indice de biodiversité potentielle (ibp) : une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers. *Rev. For. Fr.* <https://doi.org/10.4267/2042/28373>
- Liaw, A., Wiener, M., 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News* 2, 6.
- Luyssaert, S., Schulze, E.-D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., Ciais, P., Grace, J., 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213–215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Marchi, N., Pirotti, F., Lingua, E., 2018. Airborne and Terrestrial Laser Scanning Data for the Assessment of Standing and Lying Deadwood: Current Situation and New Perspectives. *Remote Sens.* 10, 1356. <https://doi.org/10.3390/rs10091356>
- Martinuzzi, S., Vierling, L.A., Gould, W.A., Falkowski, M.J., Evans, J.S., Hudak, A.T., Vierling, K.T., 2009. Mapping snags and understory shrubs for a LiDAR-based assessment of wildlife habitat suitability. *Remote Sens. Environ.* 113, 2533–2546. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.002>
- Monnet, J.-M., Bourrier, F., Dupire, S., Berger, F., 2017. Suitability of airborne laser scanning for the assessment of forest protection effect against rockfall. *Landslides* 14, 299–310. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0687-5>
- Mücke, W., Deák, B., Schroiff, A., Hollaus, M., Pfeifer, N., 2013. Detection of fallen trees in forested areas using small footprint airborne laser scanning data. *Can. J. Remote Sens.* 10.
- Paillet, Y., Bergès, L., Hjältén, J., Ódor, P., Avon, C., Bernhardt-Römermann, M., Bijlsma, R.-J., De Bruyn, L., Fuhr, M., Grandin, U., Kanka, R., Lundin, L., Luque, S., Magura, T., Matesanz, S., Mészáros, I., Sebastià, M.-T., Schmidt, W., Standovár, T., Tóthmérész, B., Uotila, A., Valladares, F., Vellak, K., Virtanen, R., 2010. Biodiversity Differences between Managed and Unmanaged Forests: Meta-Analysis of Species Richness in Europe. *Conserv. Biol.* 24, 101–112. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01399.x>

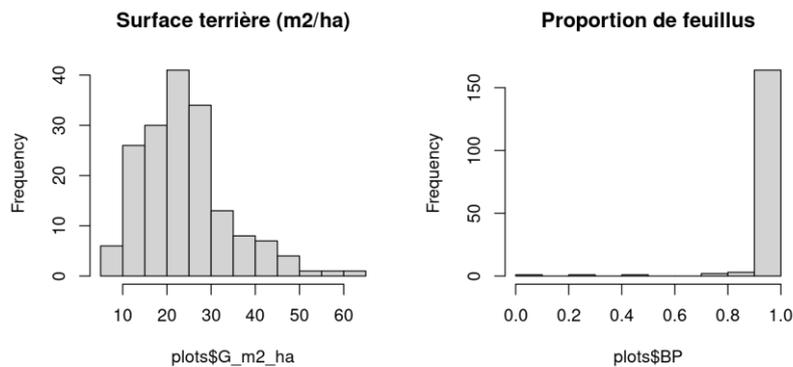
- Pe'er, G., Tsianou, M.A., Franz, K.W., Matsinos, Y.G., Mazaris, A.D., Storch, D., Kopsova, L., Verboom, J., Baguette, M., Stevens, V.M., Henle, K., 2014. Toward better application of minimum area requirements in conservation planning. *Biol. Conserv.* 170, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.12.011>
- Pesonen, A., Maltamo, M., Eerikäinen, K., Packalèn, P., 2008. Airborne laser scanning-based prediction of coarse woody debris volumes in a conservation area. *For. Ecol. Manag.* 255, 3288–3296. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.02.017>
- Réserves Naturelles de France, 2012. Notice pour la mise en place et la saisie des données du protocole de suivi dendrométrique des réserves forestières. AgroParisTech, Office National des Forêts, Paris, 13 p.
- Rossi, M., Vallauri, D., 2013. Evaluer la naturalité. Guide pratique version 1.2, WWF, Marseille. ed. WWF.
- Roussel, J.-R., Auty, D., Coops, N.C., Tompalski, P., Goodbody, T.R.H., Meador, A.S., Bourdon, J.-F., de Boissieu, F., Achim, A., 2020. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sens. Environ.* 251, 112061. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061>
- Svensson, J., Bubnicki, J.W., Jonsson, B.G., Andersson, J., Mikusiński, G., 2020. Conservation significance of intact forest landscapes in the Scandinavian Mountains Green Belt. *Landsc. Ecol.* 35, 2113–2131. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01088-4>
- White, J.C., Wulder, M.A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N.C., Cook, B.D., Pitt, D., Woods, M., 2013. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. Canadian Forest service.
- Wing, B.M., Ritchie, M.W., Boston, K., Cohen, W.B., Olsen, M.J., 2015. Individual snag detection using neighborhood attribute filtered airborne lidar data. *Remote Sens. Environ.* 163, 165–179. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.013>
- Yao, W., Krzystek, P., Heurich, M., 2012. IDENTIFYING STANDING DEAD TREES IN FOREST AREAS BASED ON 3D SINGLE TREE DETECTION FROM FULL WAVEFORM LIDAR DATA. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 1–7, 359–364. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-1-7-359-2012>

## Annexe n° 1 : Cartographie de la surface terrière

### Données

#### Terrain

La surface terrière a été calculée pour 172 placettes relevées avec le protocole PSDRF sur le PNR du Morvan. Il s'agit de la surface terrière des arbres vivants de plus de 7,5 cm de diamètre, sur une surface fixe de 20 m de rayon. Les histogrammes de la surface terrière totale et de la proportion de feuillus figurent ci-dessous.



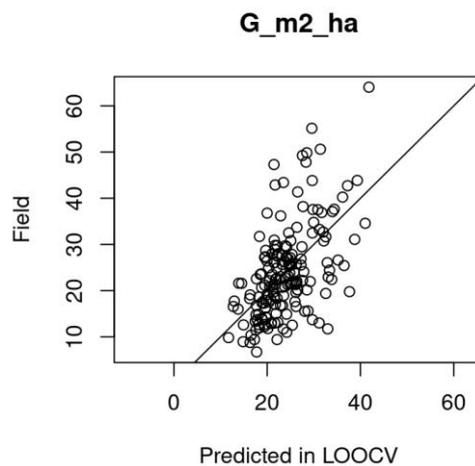
#### Métriques Lidar

Les métriques ont été calculées pour les nuages de points extraits sur un rayon de 20 m autour des coordonnées relevées par GPS sur les placettes. La résolution pour la détection préalable au calcul des métriques "arbres" est 1 m.

Le jeu de données LiDAR comporte plus de placettes : celles de Canche et Vernay pour lesquelles la surface terrière n'est pas calculable, ainsi que la placette 187.

#### Modèle

On cherche un modèle d'estimation de la surface par régression linéaire multiple, avec au maximum 6 métriques. Une transformation "Boxcox" est appliquée à la surface terrière pour normaliser sa distribution.



Le R2 ajusté du modèle n'est que de 0.32, ce qui n'est pas surprenant étant donné la précision des données de diamètre et de géolocalisation. On peut espérer que le modèle soit en fait légèrement plus performant. Il pourrait cependant être légèrement biaisé. Le graphique de validation du modèle est présenté ci-dessous.

## Cartographie

### Application du modèle

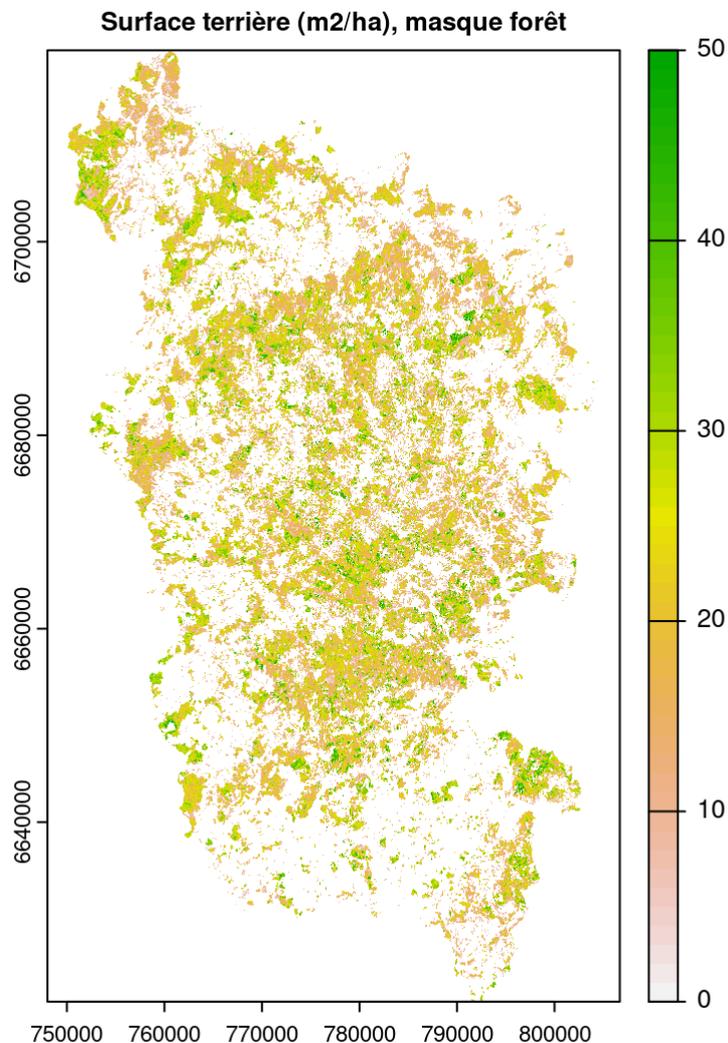
Les métriques sont calculées sur l'ensemble de la zone couverte par le vol LiDAR à résolution 35 m. le modèle est appliqué pour obtenir une estimation de surface terrière pour chaque pixel.

### Application du masque forêt

Afin de ne conserver les estimations que dans les zones d'intérêt, deux masques sont appliqués :

- un masque "forêt" défini par la couche "predictedIMAT\_Morvan\_forest.tif".
- un masque "peuplements" défini par la couche "predictedIMAT\_Morvan\_stands.tif".

Les valeurs sont seuillées à 70 m<sup>2</sup>/ha.



## Annexe n° 2 : placettes de contrôle

Placette	X_L93	Y_L93	IMA prédit	IMAT terrain	Classe prédite	Classe terrain	OK	OK_15
3344	777149	6691545	0.349	0.300	mature	mature	OK	OK
4585	771740	6688268	0.373	0.727	mature	mature	OK	OK
1024T	764902	6704567	0.395	0.217	mature	non mature	FP	FP
13310remp	778314	6652913	0.274	0.325	mature	mature	OK	OK
13597T	787178	6652154	0.385	0.592	mature	mature	OK	OK
14164T	795107	6649095	0.248	0.233	non mature	non mature	OK	OK
15279T	798779	6643852	0.400	0.413	mature	mature	OK	OK
15604T	798085	6642984	0.389	0.476	mature	mature	OK	OK
15886T	775083	6641744	0.446	0.407	mature	mature	OK	OK
16085T	785299	6640497	0.290	0.106	mature	non mature	FP	FP exclu
16257T	796583	6638188	0.389	0.116	mature	non mature	FP	FP exclu
16673T	796373	6635668	0.318	0.131	mature	non mature	FP	FP
1868T	780753	6698672	0.435	0.266	mature	mature	OK	OK
3858T	791364	6689812	0.391	0.263	mature	mature	OK	OK
4650T	779006	6688094	0.292	0.389	mature	mature	OK	OK
4938T	772190	6687724	0.312	0.672	mature	mature	OK	OK
5050T	788180	6687565	0.308	0.306	mature	mature	OK	OK
5101T	770246	6687441	0.363	0.381	mature	mature	OK	OK
5251T	771169	6687269	0.323	0.532	mature	mature	OK	OK
6868T	777859	6682814	0.338	0.126	mature	non mature	FP	FP
7008remp	763209	6682762	0.315	0.536	mature	mature	OK	OK
7067T	788354	6682292	0.378	0.654	mature	mature	OK	OK
8236T	757663	6678480	0.391	0.283	mature	mature	OK	OK
Morvan_remp p1	752714	6705300	0.458	0.226	mature	non mature	FP	FP
10remp	763646	6686682	0.147	0.179	non mature	non mature	OK	OK
1T	762465	6661551	0.336	0.606	mature	mature	OK	OK
4T	783944	6649703	0.349	0.182	mature	non mature	FP	FP
8T	760590	6706141	0.352	0.275	mature	mature	OK	OK
12T	767278	6657527	0.364	0.547	mature	mature	OK	OK
13T	776015	6703582	0.349	0.178	mature	non mature	FP	FP
14T	771793	6689781	0.378	0.558	mature	mature	OK	OK
16T	776936	6649486	0.413	0.361	mature	mature	OK	OK
21T	780853	6680045	0.328	0.419	mature	mature	OK	OK
27T	796402	6636350	0.393	0.315	mature	mature	OK	OK