



**HAL**  
open science

**Caractérisation des perturbations forestières par  
comparaison de deux campagnes LiDAR aéroporté :  
détection, caractérisation et quantification des  
perturbations forestières dans le territoire des Bauges**

Zouhir Oihi

► **To cite this version:**

Zouhir Oihi. Caractérisation des perturbations forestières par comparaison de deux campagnes LiDAR aéroporté : détection, caractérisation et quantification des perturbations forestières dans le territoire des Bauges. Géographie. 2023. dumas-04204666

**HAL Id: dumas-04204666**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04204666>**

Submitted on 12 Sep 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Caractérisation des perturbations forestières par comparaison de deux campagnes LiDAR aéroporté**

Détection, caractérisation et quantification des perturbations  
forestières dans le territoire des Bauges

Stage du 01 mars au 31 août 2023

Mémoire soutenu le 7 septembre 2023

Par : **Zouhir OIHI**

**Maître de stage** : Monsieur Jean-Mathieu MONNET (Ingénieur de recherche)

**Jury** : Madame Pauline DUSSEUX (Maître de Conférence en Géographie et directeur de mémoire) et Monsieur Sylvain BIGOT (Professeur des universités en Géographie)

**Etablissement** : Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine

**Formation** : Master SHS – Mention GAED – Parcours GEOIDES – Deuxième année

**Organisme d'accueil** : INRAE, 2 Rue de la Papeterie, 38402 Saint-Martin-d'Hères

**Année** : 2022-23

## **Résumé**

Ce mémoire a été rédigé dans le cadre d'un stage de 6 mois (de mars à août 2023) mené au sein du Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne (LESSEM), un laboratoire INRAE.

L'objectif de cette mission était de mettre en place une méthodologie permettant de caractériser les perturbations forestières dans le territoire des Bauges à partir de deux campagnes LiDAR et en s'appuyant des données ProdBois des parcelles de forêts publiques (ONF). Cette étude a eu pour vocation de prédire le type de coupe effectué et un volume commercial produit sur l'intégralité du territoire à partir des variables générées par LiDAR.

Ce stage se décompose en plusieurs axes :

- Une étude bibliographique sur la sylviculture et l'intégration des données LiDAR dans la gestion forestière,
- Une prise en main et un tri des données LiDAR et ProdBois sur le territoire des Bauges entre 2016 et 2021,
- La détection du type de coupe effectué en fonction des variables LiDAR,
- La mise en route d'une trame permettant de corréliser les volumes détectés par LiDAR et les volumes commerciaux effectués dans les parcelles publiques,
- L'extrapolation des résultats vers les parcelles privées,
- Une identification de facteurs pouvant expliquer ces perturbations et les comparaisons des pratiques de gestion entre le secteur public et privé,

Les premiers résultats montrent que cette caractérisation des coupes est applicable dans un territoire donné malgré certaines limites.

## **Table des matières**

Résumé .....	2
Remerciements .....	5
Introduction .....	6
Caractéristiques du milieu forestier .....	6
Situation actuelle et nouveaux apports .....	6
Problématisation, hypothèses et stage .....	7
1. Usages et dynamiques des forêts françaises : caractériser les perturbations à l'aide de la technologie LiDAR .....	9
1.1 La gestion forestière .....	9
1.1.1 Les fonctions de la forêt et l'action humaine .....	9
1.1.2 Des actions et acteurs des différenciés dans les forêts en France métropolitaine ....	10
1.2 Les origines et caractéristiques des perturbations forestières.....	11
1.2.1 Les perturbations, rôle et enjeux .....	11
1.2.2 Des problématiques à tous les niveaux .....	12
1.3 L'usage de la télédétection par LiDAR aéroporté pour l'amélioration de la gestion forestière et la caractérisation des perturbations.....	13
1.3.1 Définition du LiDAR .....	13
1.3.2 Usage du LiDAR dans la gestion forestière.....	14
1.3.3 Caractérisation des perturbations grâce au LiDAR et quantification du volume perturbé .....	15
2. Collecte des données dans la zone d'étude .....	17
2.1 Terrain d'étude .....	17
2.2 Données disponibles .....	18
2.2.1 Les campagnes LiDAR .....	18
2.2.2 Données ProdBois de l'ONF .....	19
2.3 Préparation et tri des données .....	20
2.3.1 Création des rasters .....	20
2.3.2 Différences et filtres .....	20
3. Méthodologie et analyses.....	22
3.1 Jointure des données .....	22
3.1.1 Modélisation des arbres et détection des houppiers et apex coupés .....	22
3.1.2 Obtention, calcul et jointure des variables .....	23

3.2	Régression linéaire et étude de corrélation.....	24
3.2.1	Analyse des variances (ANOVA) .....	24
3.2.2	Corrélations et analyses en composantes principales (ACP) .....	26
3.2.3	Régressions linéaires (lm) .....	27
3.3	Extrapolation vers les parcelles privées.....	29
3.3.1	Analyse Linéaire Discriminante (ALD).....	29
3.3.2	Prédiction .....	29
3.3.3	Synthèse des traitements .....	30
4.	Résultats et interprétations .....	31
4.1	Résultats globaux.....	31
4.1.1	Perturbations générales .....	31
4.1.2	Volume commercialisé.....	32
4.1.3	Les peuplements coupés.....	33
4.2	Différences entre les propriétaires forestiers .....	33
4.3	Facteur de l'accessibilité .....	34
	Conclusion, limites perspectives .....	36
	Bibliographie.....	38
	Rapports .....	41
	Webographie .....	41
	Annexes.....	43

## **Remerciements**

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de mon stage et à la rédaction de mon mémoire de stage.

Dans un premier temps je souhaiterais remercier l'Institut National de la Recherche Agronomique et Environnementale (INRAE), toute la direction et le Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne (LESSEM) pour l'accueil et l'intégration au sein des locaux ainsi que leur gentillesse.

Une mention spéciale pour mon tuteur de stage, Jean-Matthieu Monnet, qui m'aura encadré au sein de la structure et aura consacré son temps à m'apporter les outils méthodologiques indispensables et connaissances à la conduite de ma mission.

Je remercie également Pauline Dusseux, mon enseignant-chercheur référent qui a su répondre à mes questions autour du mémoire et de la soutenance de stage.

Par ailleurs, je remercie mes camarades stagiaires et chercheurs du LESSEM pour avoir su m'aiguiller et répondre à mes questions tout au long de mon stage.

Une mention honorable également à Vuitton Léa qui m'aura soutenu de manière exceptionnelle tout au long de cette période.

Enfin, j'ai une profonde reconnaissance à l'enseignement proposé par les enseignants-chercheurs et maîtres de conférences du Master GEOIDES m'a permis d'accentuer mes connaissances et ma réflexion sur le domaine de la géographie environnementale et tout ce qui touche le secteur de la gestion sylvicole couplée à la géomatique.

## **Introduction**

### **Caractéristiques du milieu forestier**

Les écosystèmes forestiers occupent, pour la préservation de la planète et de l'espèce humaine, une importance capitale. En effet, ces milieux permettent de produire de l'oxygène, stocker le carbone et réguler les sols et l'hydrologie. De plus, ils jouent un rôle fondamental dans le maintien d'une faune et d'une flore (WWF).

En France, le territoire métropolitain dispose d'une des plus vastes zones boisées en Europe de l'Ouest. En effet, grâce à des situations géographiques et climatiques favorables, en 2020, près de 17,4 millions d'hectares ; correspondant à environ 31 % du territoire métropolitain ; étaient couverts par des forêts (IGN, 2020).

Les forêts jouent un rôle fondamental pour prévenir des risques naturels importants. De plus, elles offrent une grande quantité de bois, essentielle pour de nombreuses industries et régions. Cela ouvre donc la voie à la création d'opportunités socio-économiques significatives, notamment en termes d'emploi et de développement local.

Bien que la productivité optimale reste le but principal des stratégies de gestion forestières, les facteurs environnementaux et sociaux des territoires intègrent de plus en plus les facteurs de décision dans la gestion moderne des forêts. Cela semble donc fonctionner puisque le territoire métropolitain connaît une augmentation du taux de couvert forestier depuis plusieurs dizaines d'années.

Afin de préserver leur durabilité et leur rôle crucial contre les dangers de la déforestation et du changement climatique actuels ; il est impératif de mettre en place des stratégies de conservation et de régulation des forêts. Cela implique nécessairement une augmentation de la résistance et de la résilience de ces territoires (ONERC, 2015).

La sylviculture peut se définir par l'ensemble des techniques et des interventions humaines ayant pour objectif la production de bois de façon optimale en tenant compte de l'ensemble des enjeux économiques, sociaux et environnementaux (ONF, 2021).

Il est donc nécessaire de mettre en place une sylviculture impliquant tous les acteurs concernés de près ou de loin par le milieu forestier (Etat, collectivités territoriales, gestionnaires, particuliers, entreprises, ...).

### **Situation actuelle et nouveaux apports**

Les forêts sont des espaces d'importances à la fois locales, via leur contribution à la bioéconomie des territoires, comme globales, en participant à la dynamique des écosystèmes. Dans le climat actuel incertain, il est nécessaire d'acquérir une meilleure connaissance des perturbations naturelles et des pratiques différenciées de gestion. En effet, renforcer la capacité des forêts à faire face au changement climatique et aux déforestations passe par l'élaboration de politiques adaptées à ces problématiques.

Aujourd'hui, les avancées dans les domaines des nouvelles technologies et en particulier de la télédétection permettent d'obtenir des informations précieuses pour la sylviculture et la gestion forestière. Elles permettent notamment de mesurer et cartographier des informations sur la forêt telles que l'indice de végétation, la hauteur de canopée, l'accroissement des forêts ou encore la détection de zones de perturbations naturelles ou anthropiques.

Avec l'avènement de la télédétection par Light Detection And Ranging (LiDAR), la gestion forestière a encore pu être améliorée. Cette technologie permet d'augmenter la précision des données et de générer des modèles numériques de surfaces et de canopées de haute qualité tout en caractérisant la structure 3D de la végétation forestière (Cambier, 2018).

Dans un contexte français marqué par l'hétérogénéité des forêts : la connaissance, l'identification et la caractérisation des perturbations et des coupes forestière est nécessaire afin d'étudier les différences socio-économiques et de gestion entre les territoires. Cela requière donc une cartographie de haute résolution des caractéristiques des forêts, nécessitant l'utilisation des outils de télédétection tel que le LiDAR.

## Problématisation, hypothèses et stage

En s'intéressant au sujet, une problématique globale peut émerger :

**Est-il possible de mettre en avant les perturbations forestières sur une période donnée en évaluant le potentiel de deux campagnes de télédétection LiDAR aéroporté dans une zone forestière ?**

Cette étude propose trois hypothèses envisageables. La première consiste à pouvoir identifier et catégoriser les types de coupes (rase, irrégulière, sélective, naturelles) et les types de peuplements (feuillus, conifères, mixtes) qui ont été exploités. La seconde est de pouvoir extraire un volume commercial à partir de données LiDAR en comparant avec les données de production de bois (disponible sur une majorité de parcelles publiques) et d'extrapoler sur l'ensemble du territoire des Bauges (Savoie / Haute-Savoie, France). Enfin, la dernière est d'identifier les facteurs qui peuvent expliquer ces perturbations et de comparer les pratiques de gestion entre les secteurs publics et privés afin d'évaluer les différences dans les résultats de gestion forestière ou de politiques forestières différenciées.

Afin de pouvoir répondre à la problématique initiale, l'étude sera divisée en trois parties distinctes. Dans un premier temps, un état de l'art sera réalisé sur le rôle des forêts, des perturbations forestières et l'apport du LiDAR dans leurs caractérisations globales.

Dans un second temps, une application sera mise en place dans le massif des Bauges avec une introspection de toutes les données mobilisables pour détecter, catégoriser et quantifier ces perturbations forestières.

Enfin, une analyse des résultats sera faite en répondant aux hypothèses énumérées en amont par le biais de la télédétection, des statistiques et la possibilité d'explorer les relations entre les gestions forestières, les caractéristiques des peuplements et socio-économiques des parcelles.

Ce mémoire est réalisé dans le cadre d'un stage de fin d'études d'une durée de six mois, réalisé au sein du centre de Lyon-Grenoble de l'Institut national de Recherche pour

l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE). Il s'agit d'un établissement public de recherche pluridisciplinaire issu de la fusion de l'Institut national de la Recherche agronomique (INRA) et de l'Institut national de la Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA).

Ce stage intègre les objectifs de l'équipe DYNAMICS (Dynamique et gestion durable des écosystèmes terrestres dans un contexte de changement global) du Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne (LESSEM) et dont la mission principale est de développer des connaissances et des outils (ex. modèles, méthodes, indicateurs, ...) afin de comprendre et de prédire la dynamique des écosystèmes terrestres, notamment ceux de la forêt et de la montagne. Ce pôle de recherche s'intéresse également à la gestion de ces écosystèmes et aux services qu'ils rendent à la société ainsi qu'à l'utilisation de la géomatique et de la télédétection pour analyser et cartographier la dynamique des forêts de montagne.

Ce stage est encadré par Jean-Matthieu Monnet, ingénieur de recherche (LESSEM) spécialisé dans la cartographie et télédétection des forêts de montagnes et des gestions intégrées des territoires forestiers ainsi que par Jérôme Bock (ONF), ingénieur d'étude dans le domaine la gestion forestière et la géomatique appliquée à la sylviculture.

# **1. Usages et dynamiques des forêts françaises : caractériser les perturbations à l'aide de la technologie LiDAR**

Il est difficile de définir de manière unanime la forêt. Pour une approche objective, il est donc préférable de se référer à une définition fournie par des organismes tels que l'Inventaire forestier national (IFN) ou l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Selon ces définitions, une forêt est un espace d'au moins 0,5 hectare, comprenant des arbres dont la hauteur dépasse 5 mètres et dont le couvert forestier représente plus de 10% (Rapport FAO, 2015).

Les perturbations forestières font référence aux processus qui altèrent l'état d'une forêt. Elles peuvent être causées par des facteurs naturels tels que les incendies, les tempêtes, les épidémies d'insectes ou les maladies, ainsi que par des activités humaines telles que l'exploitation forestière, la conversion des terres, la pollution ou le changement climatique.

Avec l'avènement des nouvelles technologies et notamment le LiDAR, la télédétection devient un outil majeur dans la gestion forestière. À partir de la modélisation par laser, il est possible de structurer de manière précise le couvert forestier. Couplés avec d'autres méthodes de mesures (terrain, mesure commerciale, télédétection par satellite, etc ...), les résultats acquis par LiDAR permettent d'ajouter une précision importante sur une étendue très importante.

Cet état de l'art se structurera en trois parties. La première partie se basera sur les fonctions de la forêt et sa gestion par l'humain. La seconde s'intéressera aux perturbations forestières avec toutes les problématiques qui en découlent. La dernière étudiera l'apport du LiDAR aidant à la quantification et l'analyse des perturbations.

## **1.1 La gestion forestière**

### **1.1.1 Les fonctions de la forêt et l'action humaine**

La forêt rend de multiples services qui contribuent à la bioéconomie à la fois locale et globale (Fuhr & al., 2022). Selon l'Office National des Forêts, les forêts sont assignées à plusieurs fonctions.

Dans un premier temps, en abritant une biodiversité importante et fournissant un habitat vital pour de nombreuses espèces animales et végétales, les forêts jouent un rôle primordial au niveau écologique (Brang et al., 1998). Elles contribuent à maintenir un équilibre en régulant les cycles de l'eau, en préservant les sols contre la sécheresse, en modérant le climat local (humidité, température, exposition au soleil) en créant des microclimats (Rajaonson et al, 2014) et en agissant comme des puits de carbone en absorbant le dioxyde de carbone de l'atmosphère (Gleizes, 2016).

En plus des effets bénéfiques sur l'environnement, les forêts garantissent également un rôle dans la protection contre les aléas et risques naturels notamment en limitant les inondations et réduisant l'érosion du sol grâce au système racinaire des arbres (Schwitter & Bucher, 2009). Dans les Alpes, elles préviennent des avalanches et des mouvements de terrain en stabilisant

les pentes. De plus, elles agissent comme des barrières naturelles contre les vents violents, minimisant ainsi les dégâts sur les infrastructures tout en protégeant les espèces vivantes (Terreaux & Chavet, 2009).

Elles assurent également un rôle social en se développant sur un aspect récréatif de la forêt (Tillier, 2011). Aujourd'hui, la forêt apparaît pour beaucoup comme un espace naturel de référence, motivé de manière générale par une pratique d'activité sportive, d'une observation de la faune et de la flore, de la chasse ou de la cueillette (Dehez, 2012). Avec la démocratisation d'une société de plus en plus basée sur le loisir, l'humain manifeste massivement son « besoin de nature » par la pratique d'activité dans les espaces forestiers (Bourg & Gougnet, 1998).

Enfin, les forêts jouent un rôle de production et d'apport considérable dans les économies locales et globales notamment termes de production de bois (Brändli, 2000). En effet, beaucoup de personnes et de territoires dépendent des forêts (33 millions de personnes dans le monde travaillaient dans le domaine forestier en 2021, selon l'Organisation internationale du travail, et plus de 400 000 en France selon le ministère de l'Agriculture). Longtemps considéré comme un espace servant à la production (bois de chauffage, navigation maritime, développement de l'industrie), les forêts se sont détachées depuis quelques décennies de cette vision productiviste et sont désormais reconnues pour d'autres fonctions (Devèze, 1966).

Aujourd'hui, 30 % des forêts mondiales sont affectées à des fonctions de production, 24 % à des usages multiples, 11,5 % à la conservation de la biodiversité, 8,2 % à des fonctions de protection et 3,7 % à des fonctions sociales (22,6 % non classé) (Marta-Pedreso et al, 2014).

Que ce soit dans le but de contrôler l'état de santé des peuplements, d'assurer une productivité et une biodiversité optimale ou bien de gérer de ces usages, l'humain a la nécessité d'agir sur les structures et dynamiques forestières (ONF, Guide Sylviculture). Comme pour tout écosystème, la forêt est également soumise à des cycles (croissance, maturité, déclin et régénération), influençant ainsi les interventions de l'humain dans la forêt (Le Tacon & al., 2000).

Toutes ces décisions d'action mises en place pour motif commercial, environnemental, touristique, ou concernant la protection de personnes ou d'infrastructures, assignent aux forêts des fonctions utilitaires à l'humain avec l'objectif d'un forestier incarnant le régulateur de cet écosystème (Le Tacon & al., 2000).

### 1.1.2 Des actions et acteurs des différenciés dans les forêts en France métropolitaine

En France, les actions doivent être conciliées par les acteurs pour garantir une gestion durable des ressources forestières. En effet, les objectifs de production commerciale de bois sont toujours revus à la hausse (50 millions de m<sup>3</sup> pour 2026 contre à 37,9 millions en 2016, selon le ministère de l'Agriculture) tandis que les questions socio-écologiques de la forêt sont de plus en plus présentes.

Par l'étendue importante des forêts en France, différents acteurs entrent en action pour sa gestion. D'un côté, il y a les forêts publiques, soumises au régime forestier, gérées par l'ONF et avec des objectifs de fonction clairs. De l'autre, les forêts privées, gérées par des propriétaires, qui doivent respecter le code forestier et dont les objectifs sont hétérogènes. La forêt privée occupe une place centrale en représentant plus de 75 % du couvert forestier français

et en étant la propriété de plus de 3,3 millions de citoyens (Fransylva, 2021). Il est alors assez complexe de connaître la gestion forestière dans le privé et donc mener des actions optimales sachant que le morcellement parcellaire y est très fort et que la plupart des propriétés font moins d'un hectare (NEOSYLVA, 2022).

L'action de l'humain sur les forêts en France est si importante qu'il n'existe aujourd'hui plus aucune forêt sans influence ou trace d'activité humaine (CNPFF, 2023). Rarement homogène sur tous les aspects, (climat, répartition des arbres, tailles, essences, qualité du bois, gestion passée, ...), les interventions sylvicoles nécessitent une conception flexible et adaptative pour garantir une durabilité optimale des fonctions forestières. Plusieurs approches de gestion apparaissent donc et sont définies en fonction des caractéristiques écologiques, des objectifs d'utilisation et des décisions par les acteurs engagés (CNPFF, 2023).

Cependant, il est possible de classer les forêts en fonction d'un type de peuplement. En effet, la structure (écart des âges, tailles et d'espèces dans le peuplement) et le régime (attribution d'une fonction au peuplement) peuvent être des critères de distinction dans la manière dont les arbres sont organisés au sein de l'écosystème forestier (DDT Poitou-Charentes, 2008). Ainsi, en France, quatre grands types de peuplements sont identifiés.

Le peuplement en futaies régulières dont les arbres sont sensiblement identiques (taille, âge, essence, diamètres voisins), ayant comme objectif principal la récolte en bois lorsque ceux-ci arrivent à maturation mais dont la gestion est vivement critiquée pour ses coupes rases pouvant être dénaturantes (Gondard, 2004).

Le peuplement en futaies irrégulières (ou jardinée), avec des arbres à caractéristiques variées et qui a le potentiel d'obtenir la plus grande richesse des écosystèmes (Turckheim, 2005).

Le peuplement en taillis sous futaie, avec un mixte de grands arbres (futaie) mélangés à de petits arbres ayant le même système racinaire (taillis).

Le peuplement en taillis simple, composé de jeunes pousses et de rejets de coupes d'arbres. (ONF).

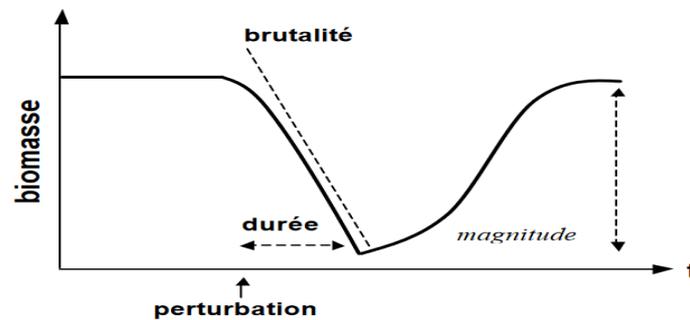
La gestion durable des forêts représente un défi complexe pour les acteurs. Étant donné les caractéristiques et fonctionnalités des forêts et des conditions actuelles, il est primordial d'intégrer une gestion cohérente pour que chaque forêt puisse convenir de manière optimale des besoins de l'humanité et des écosystèmes. L'une des craintes principales des gestionnaires forestiers est qu'une partie de la forêt, notamment celle du privé, ne puisse pas s'adapter aux enjeux du changement climatique entraînant une baisse dans son rôle économique (Poupardin, 1990).

## 1.2 Les origines et caractéristiques des perturbations forestières

### 1.2.1 Les perturbations, rôle et enjeux

Les écosystèmes forestiers sont exposés à une grande diversité de perturbations (Dhote, 2004). Souvent éléments déclencheurs de la phase de croissance d'une forêt, ces perturbations entraînent des conséquences significatives à court et à long terme sur la biodiversité, les cycles des nutriments et le cycle de l'eau (Gauthier et al., 2003).

Une perturbation forestière se définit par tout événement naturel (tempêtes, incendies, insectes, maladies, ect ...) ou anthropique (exploitation, déforestation, urbanisation, ect ...) changeant l'équilibre écologique d'une forêt en réduisant brutalement la biomasse dans un espace donné (Pickett & White, 1985).



**Figure 1** - Définition d'une perturbation forestière

**Source** - White et Jentsch (2001)

### 1.2.2 Des problématiques à tous les niveaux

Au cours de la seconde moitié du XXe siècle, une nette augmentation des perturbations a été observée en Europe, tant au niveau de la fréquence que de l'intensité et avec une tendance qui devrait persister dans le futur (Hlásny & al, 2019). Selon plusieurs experts et organismes de recherche, les principales causes sont souvent interconnectées dues à l'impact de l'humain sur l'environnement (Bonin et al, 2023).

D'une part, la gestion sylvicole actuelle à tendance productiviste est également responsable de la hausse de ces perturbations. La modulation des peuplements parfois non réfléchi, entraîne une faiblesse dans les forêts les rendant ainsi encore plus vulnérables aux aléas naturels (Bonin et al, 2023). Par ailleurs, d'un point de vue économique, cette surcapitalisation des forêts expose également à davantage de vulnérabilité et à moins de rendement (Kirilenko & Sedjo, 2007).

De l'autre part, le changement climatique, dont la responsabilité humaine est « sans équivoque » (GIEC, 2021), entraîne une augmentation des risques biologiques comme la multiplication de nuisibles tels que les insectes ou les champignons (Jactel et al, 2012). Il amène également à une hausse de la fréquence et de l'intensité des aléas naturels (GIEC, 2022).

Cependant, il est très important de dissocier les perturbations naturelles des perturbations anthropiques (Lesmerises, 2012). De manière générale, les perturbations naturelles sont vues comme des modeleurs de la dynamique forestière, elles sont responsables de la variété des habitats observables (Gauthier, 2001) et sont la principale raison de formation de trouées naturelles qui sont des zones propices au développement écologique (Garcia, 2001). Les perturbations anthropiques quant à elles ; c'est-à-dire la coupe forestière (rase ou d'éclaircie) avec pour objectif principal d'extraire du bois pour la consommation (Gondard et al, 2004) ; impactent généralement la dynamique de l'écosystème (végétal, animal, organique) et du peuplement (composition, caractéristiques) forestier (Trombulak & Frissell, 2000). Plusieurs chercheurs affirment que la réalisation de perturbations anthropiques étaient aux antipodes des besoins de la forêt et que si cela continuait, notamment avec les problèmes liés au climat, les conséquences négatives se multiplieraient (Lesmerises, 2012, Gondard et al,

2004). En effet, bien que celles-ci soient ressemblantes avec les perturbations naturelles (maladies, incendies), les coupes rases semblent se faire sur des surfaces trop importantes pour que la dynamique forestière y soit renouvelée (Ponge et al, 1994) et l'intervention de l'homme y sera de nouveau nécessaire pour « re-fabriquer » la forêt (Boivin et al, 1971).

Il est donc primordial de pouvoir intégrer ces perturbations dans la gestion forestière afin de mettre une résilience et résistance des forêts face à ces problématiques actuelles et ainsi pouvoir réussir à atteindre les objectifs de gestion (production, services à l'humain et biodiversité) (Delong & Tanner, 1996). Le gestionnaire forestier intégrera les dynamiques forestières locales afin de pouvoir gérer au mieux l'après perturbation (Vepakomma, 2008).

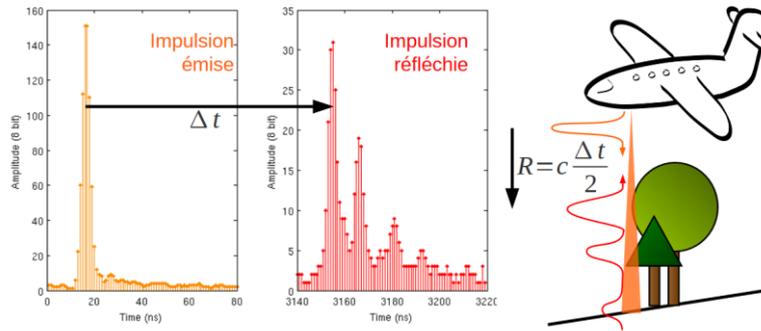
### 1.3 L'usage de la télédétection par LiDAR aéroporté pour l'amélioration de la gestion forestière et la caractérisation des perturbations

Avec la nécessité d'assurer une utilisation durable des forêts, la télédétection s'est imposée au fil du temps comme la norme dans le domaine de la gestion forestière (Monnet et al, 2015). Pour rappel, d'après le dictionnaire des termes normalisés des sciences (JO), la télédétection peut se définir comme « un ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance et sans contact matériel avec ceux-ci ».

Depuis quelques années, l'ONF a donc fait de la télédétection par LiDAR aéroporté et satellitaire sa priorité pour l'élaboration des aménagements et la gestion forestière (Jolly et al., 2018). En particulier, le développement des techniques LiDAR aéroporté qui attire l'attention de tous les gestionnaires et acteurs de la forêt (Bonnet et al., 2013).

#### 1.3.1 Définition du LiDAR

Apparu en 1971 par l'entreprise *Hughes Aircraft Company* et fortement démocratisé dans les années 2000 dans le domaine de la recherche (Kniess, 2010), le LiDAR (*Light Detection and Ranging*) est une technologie permettant d'obtenir des informations et des relevés précis et détaillés du terrain en émettant des impulsions lasers vers la cible voulue et jusqu'au contact d'un obstacle (Lamaille et al., 2016 / Ferraz, 2012). Ce dernier génère ; grâce à la densité de calcul de points pouvant aller jusqu'à 100 pts/m<sup>2</sup> (Maas & Vosselman, 1999) ; un nuage de points 3D géo-référencés (x, y et z) permettant de modéliser l'espace environnant (Ferraz, 2012).

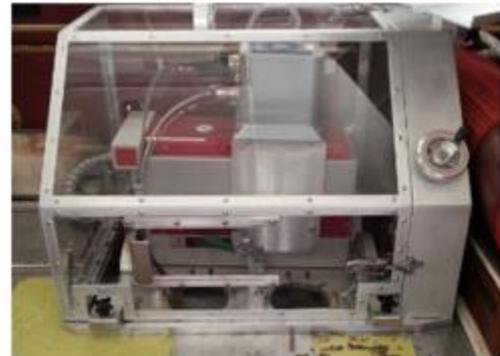


**Figure 2** : Principe des mesures des technologies LiDAR

**Source** : INRAE

Le LiDAR aéroporté (ALS), qui implique le montage de la technologie sur des avions ou hélicoptères, est équipé d'un système de balayage transversal qui permet de répartir équitablement les impulsions lasers vers le sol lors d'une campagne (Wehr & Lohr, 1999). Il est également muni d'un système GPS permettant d'obtenir les coordonnées géo-référencées des points (Monnet, 2022). Par ailleurs, chaque point en fonction de ces attributs et à l'aide d'algorithmes de classification, se verra attribué une classe telle qu'un point d'eau, de végétation ou de bâti (Bonnet et al., 2013).

Cette technologie présente de nombreux avantages comme une étendue et une variété de la couverture des territoires (Vuitton, 2000) ou encore une précision accrue des données qui permettent d'analyser des variables à petites échelles comme un arbre ou un banc de sédiments (Ferraz, 2012).



**Image 1 et 2** : Avion et capteur LiDAR utilisés lors de la campagne dans le territoire des Bauges en 2018

**Source** : PNR des Bauges

C'est pour cela que le LiDAR, aujourd'hui, est utilisé dans de nombreux domaines de recherches environnementales et archéologiques (Kasperski et al., 2010) et de plus en plus dans la vie quotidienne (Yashioka, 2022).

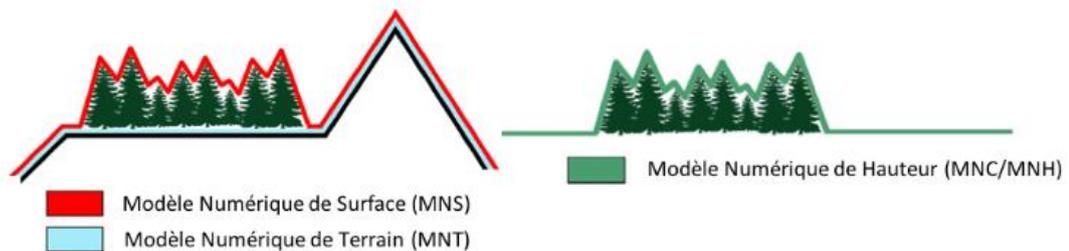
### 1.3.2 Usage du LiDAR dans la gestion forestière

Du fait de ses qualités citées en amont, le LiDAR est particulièrement adapté pour analyser, mesurer et structurer la quantité et la qualité des écosystèmes forestières (Shang, 2014). En effet, la gestion des peuplements forestiers et l'inventaire de terrain peut être

complexe car l'accessibilité n'est pas possible partout, notamment dans les territoires de montagne (Monnet, 2011). Le LiDAR aéroporté contourne ainsi le problème en fournissant une méthode de récolte d'informations à distance.

Afin de modéliser ces espaces de manière précise, la création de modèles numériques d'élévation sont générés à partir des nuages de points bruts de LiDAR. En effet, pour les points représentés au sol, ceux-ci permettent de créer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) alors que les points les plus hauts et hors du sol donne la possibilité de créer le Modèle Numérique de Surface (MNS) (Georges-Leroys et al., 2011).

Ainsi, un Modèle Numérique de Canopée (MNC) peut être créé en différenciant MNS et MNT qui permet de mesurer avec une haute précision la couverture végétale (Bonnet, 2009).



**Figure 3** : Représentation des modèles numériques d'élévation

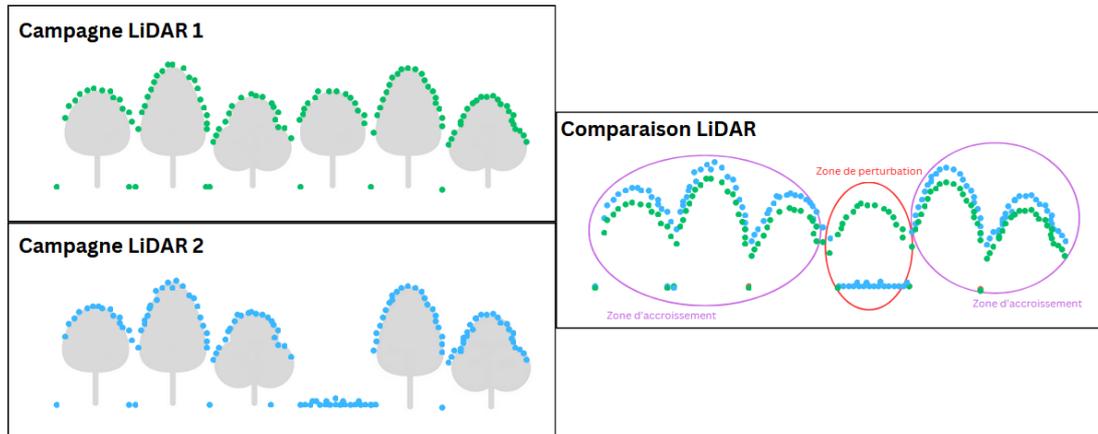
**Réalisation** : OIHI Zouhir

Ces méthodes de calcul de hauteurs et de densités de végétation sous forme de raster, sont ensuite filtrées par des techniques de traitement d'image et de segmentation des données pour extraire les cimes des arbres et délimiter leurs couronnes (Monnet et al., 2010).

Cette technique permet de discerner la hauteur, la surface, et potentiellement le volume de houppier de chaque arbre (Monnet et al., 2010). Elle permet également de cartographier la structure des peuplements forestiers, de mesurer les hauteurs dominantes et de quantifier la biomasse végétale (Vincent et al., 2008). Enfin, elle peut déterminer et caractériser les zones de perturbation telles que les routes, les trouées naturelles, les zones incendiées ou les coupes anthropiques dans une forêt (Vepakomma, 2008 / Lievin, 2020).

### 1.3.3 Caractérisation des perturbations grâce au LiDAR et quantification du volume perturbé

En obtenant deux campagnes LiDAR avec un intervalle de temps donné, il est possible de caractériser les changements des forêts et de quantifier les accroissements ou perturbations en superposant les deux MNC (Figure 4) (Tompalski, 2021).



**Figure 4 :** *Comparaison des deux acquisitions LiDAR et caractérisation des zones de perturbation*

**Réalisation :** OIHI Zouhir

En connaissant les zones de perturbation et les informations sur la structure des forêts (Campagne 1), il est ainsi possible d'en extraire un volume de bois initial perturbé (Tompalski, 2021).

De plus, en classifiant ; à l'aide de données de production ; la caractéristique initiale de la perturbation (coupes anthropiques ou produits accidentels) et la nature de la coupe forestière (coupes irrégulières ou coupes rases et sanitaires), il est possible d'évaluer l'impact des perturbations sur la structure forestière et d'en extraire un volume commercial qui permettrait de quantifier la tendance de l'exploitation forestière et d'aider dans les choix de gestion des forêts pour un usage optimal à long terme (Eggrickx, 2000).

## **2. Collecte des données dans la zone d'étude**

Afin de répondre aux problématiques posées en amont sur la caractérisation des perturbations forestières, il est nécessaire de travailler sur des surfaces ayant été couvertes au moins deux fois par des vols Lidar et ayant subi des coupes entre ces deux vols. Les données dendrométriques relatives aux coupes doivent être disponibles et détaillées. C'est ainsi que le territoire des Bauges apparaît comme le territoire idéal pour mener à bien cette étude.

### **2.1 Terrain d'étude**

La zone d'étude choisie est le territoire des Bauges. Situé entre quatre agglomérations des Alpes (Aix-les-Bains, Albertville, Annecy, Chambéry), et dans deux départements (Savoie et Haute-Savoie), le massif des Bauges ; d'étage subalpin ; comporte plusieurs sommets dépassant les 2000 m d'altitude, dont l'Arcalod culminant à 2200 m. (Carte 1)

D'un point de vue du climat, le massif des Bauges est influencé par sa situation géographique et son relief préalpin. On y observe un climat à tendance montagnard caractérisé par des hivers froids et des étés doux. D'un point de vue géologique, le territoire est principalement constitué de roches sédimentaires datant du Jurassique (calcaires, marnes).

D'une superficie d'environ 850 km<sup>2</sup>, le cœur du massif des Bauges est à dominante rural où l'agriculture joue un rôle essentiel dans la vie économique et culturelle de la région notamment avec l'élevage bovin et ses production laitières (AOC tome des Bauges).

Outre l'agriculture, le massif offre un terrain propice à de nombreuses activités de montagne (randonnées, VTT, ski, ...) et à un tourisme saisonnier qui attire de nombreux visiteurs tout au long de l'année. Composé de 67 communes, le massif est également intégré à un Parc Naturel Régional (PNR des Bauges) depuis 1995. Son but est d'apporter une gestion commune afin de préserver, valoriser et harmoniser le massif.

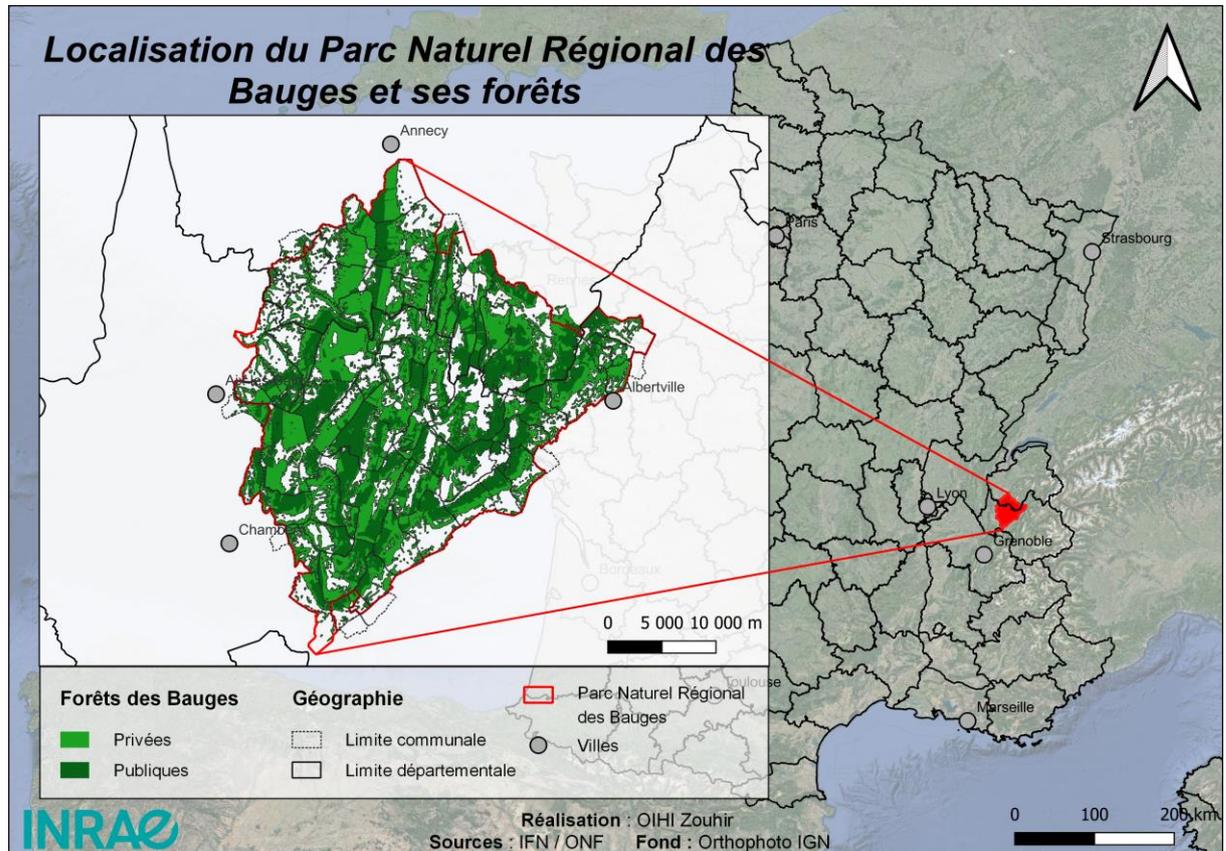
Par ailleurs, le parc jouit d'une diversité en termes de paysages naturels et notamment d'une présence importante de forêts. Celles-ci représentent environ 2/3 de la superficie totale du territoire total des Bauges.

La sylviculture au sein du massif est donc très importante, jouant un rôle essentiel dans la gestion des ressources forestières du territoire. Avec une superficie de 24 000 hectares de forêts publiques et 44 000 hectares de forêts privées, un morcellement parcellaire (surtout dans le privé) au sein du territoire est présent rendant la gestion sylvicole plus complexe.

Les peuplements forestiers présentent une diversité importante dans le territoire, mais des espèces dominantes prédominantes apparaissent. Parmi elles, on peut retrouver par exemple le Hêtre (*Fagus sylvatica*) en altitude plus basse, le Sapin blanc (*Abies alba*) et l'Épicéa commun (*Picea abies*) en plus haute altitude. Des peuplements mixtes peuvent également apparaître dans les zones de basse altitude et de transition vers la moyenne altitude.

Enfin, la futaie irrégulière est prédominante dans la gestion forestière privilégiant des coupes diverses et choisies afin de maintenir une structure forestière variée et stable. Cela tout en favorisant la régénération naturelle et en préservant la biodiversité. Cependant, comme dans

tout territoire forestier, des coupes rases ou sanitaires peuvent être réalisées occasionnellement pour des raisons économiques ou pour répondre à des besoins spécifiques (épidémie, incendie, ...).



*Carte 1 – Localisation du Parc Naturel Régional des Bauges et identification des propriétaires forestiers*

**Source – IFN / ONF Réalisation – OIHI Zouhir**

## 2.2 Données disponibles

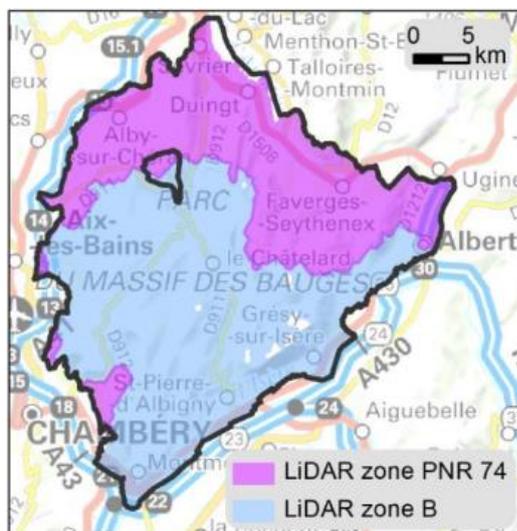
### 2.2.1 Les campagnes LiDAR

Comme dit dans la revue bibliographique, Le *LiDAR* est une technologie précise permettant d'obtenir des relevés et générer des nuages de points 3D. Dans le cadre de l'étude, afin de caractériser les perturbations forestières, deux campagnes *LiDAR ALS* (Aerial *LiDAR* Scanner) ont été nécessaires à des périodes différentes.

Le territoire des Bauges fait donc l'objet de ces deux acquisitions.

La première a été réalisée par deux prestataires à des années différentes. La partie sud (Savoie, obtenu par la Régie de Gestion de Données Savoie Mont Blanc) a été couverte entre juin et septembre 2016, alors que la partie nord (Haute-Savoie, obtenu par le Parc Naturel des Bauges dans le cadre du projet PROTEST) en septembre 2018. Celles-ci ont été combinées pour couvrir l'intégralité du massif.

La seconde provient du *programme national LiDAR HD* de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Ce dernier a pour but de cartographier l'intégralité du territoire français en trois dimensions à travers l'acquisition de vols ALS. Le territoire des Bauges a ainsi pu bénéficier de ce programme en septembre 2021.



*Carte 2 – Première campagne LiDAR dans le territoire des Bauges*

Source – INRAE / ADEME Réalisation – ONF

### 2.2.2 Données ProdBois de l'ONF

"Prodbois" est un projet de l'ONF qui a pour objectif la réalisation d'une base de données fournissant des informations sur les coupes dans les parcelles publiques forestières françaises.

Cette base de données est un outil essentiel pour suivre et analyser l'évolution de l'exploitation forestière en France. En effet, elle permet aux gestionnaires, chercheurs et autres parties prenantes de consulter des données actualisées sur les volumes de bois prélevés, les essences d'arbres concernées ou encore les méthodes d'exploitation utilisées.

En ce qui concerne les Bauges, les informations relatives aux coupes forestières ont été recensées dans l'Unité Territoriale (UT) de Savoie à partir de 2016 et sont mises à jour en temps réel dès lors qu'un coupe ou un martelage est réalisé puis validé par les équipes en charge de la gestion projet.

UT	Exercice	Code forêt	Type	AD	UPC	TDS	EA	S. à désigner	S. désignée	E. de coupe	E. de peuple.	M. Prédect.	M. Cubage	Responsable désignation	Etat FDP	D. DCM	D. d'arrêt	D. de clôture	D. désignation	Début planif.
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	Nb FDP - 15 459	NA	NA	NA	NA	NA	NA	46202 07	493499 75	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
884505	2016	AVANCHER	AS	NA	E	Manuelle	NA	1.00	13 24	IRR	I SPE M 2	8800_DE	88TA_Beta1	MAGNIEN BRUNO	Désignée	NA	2016-08-09 15:47:09	2016-08-09 15:47:19	NA	NA
884505	2016	AVANCHER	AS	NA	F	Manuelle	NA	1.00	19 35	IRR	I SPE M 2	8800_DE	88TA_Beta1	MAGNIEN BRUNO	Désignée	NA	2016-08-09 16:07:38	2016-08-09 16:07:52	NA	NA
884505	2016	AVANCHER	AS	NA	G	Manuelle	NA	1.00	9 40	IRR	I SPE M 2	8800_DE	88TA_Beta1	MAGNIEN BRUNO	Désignée	NA	2016-08-09 16:26:10	2016-08-09 16:26:17	NA	NA
884505	2016	AVANCHER	AS	NA	H	Manuelle	NA	1.00	13 30	IRR	I SPE M 2	8800_DE	88TA_Beta1	MAGNIEN BRUNO	Désignée	NA	2016-08-09 16:52:48	2016-08-09 16:52:57	NA	NA
884505	2016	AVANCHER	AS	NA	O	TDS	3001	8.00	8 00	IRR	I EPC X X	8800_BSP	88TA_Beta1	MAGNIEN BRUNO	Désignée	NA	2015-10-08 08:00:00	2015-11-10 08:25:33	2015-10-08	NA
884505	2016	BATHIE	AS	NA	27	TDS	3002	8.41	8 41	IRR	I EPC X X	8800_BSP	88TA_Beta1	COCHET YVES	Désignée	NA	2006-12-31 08:00:00	2015-10-20 10:00:41	2015-09-24	NA
884505	2016	BATHIE	AS	NA	28	TDS	3003	9.20	9 20	IRR	I EPC X X	8800_BSP	88TA_Beta1	COCHET YVES	Désignée	NA	2006-12-31 08:00:00	2015-10-20 10:04:35	2015-09-24	NA
884505	2016	BATHIE	AS	NA	K	TDS	3004	2.00	2 00	TS	T A F X X	8800_DE	88TA_Beta1	COCHET YVES	Désignée	NA	2007-01-01 08:00:00	2015-10-20 18:56:22	2015-10-15	NA
884505	2016	BELLECOM	AS	NA	B	Manuelle	3072	1.00	1 00	AMEL	I FRM M 2	8800_DE	DT12_MOY	MAGNIEN BRUNO	Désignée	NA	2017-01-10 15:36:11	2017-01-10 16:19:33	NA	NA
884505	2016	BELLECOM	AS	NA	BELLECOM	Manuelle	NA	NA	59 48	PA	I EPC I 2	8800_BSP	88TA_Beta1	MAGNIEN BRUNO	Désignée	NA	2016-05-31 09:59:37	2016-05-31 10:02:00	NA	NA
884505	2016	BELLECOM	AS	NA	F	Manuelle	3071	2.00	2 00	AMEL	I FRM M 2	8800_DE	DT12_MOY	MAGNIEN BRUNO	Désignée	NA	2017-01-10 17:30:59	2017-01-10 17:40:41	NA	NA
884505	2016	BELLECOM	AS	NA	G	Manuelle	3070	1.00	1 00	AMEL	I FRM M 2	8800_DE	DT12_MOY	MAGNIEN BRUNO	Désignée	NA	2017-01-10 16:43:15	2017-01-10 17:20:57	NA	NA
884505	2016	BOIS	AS	NA	17	Manuelle	3007	5.00	5 00	IRR	F HET G 3	8800_BF	88TA_Beta1	MAGNIEN BRUNO	Désignée	2015-11-26	2016-02-08 14:45:42	2016-02-08 14:46:26	NA	NA
884505	2016	BOIS	AS	NA	19	Manuelle	3008	2.00	2 00	IRR	I SPE G 3	8800_BF	88TA_Beta1	MAGNIEN BRUNO	Désignée	2015-11-26	2016-02-08 14:27:13	2016-02-08 14:27:32	NA	NA
884505	2016	BOIS	AS	NA	8	Manuelle	3005	2.00	2 00	IRR	I SPE G 3	8800_BF	88TA_Beta1	MAGNIEN BRUNO	Désignée	2015-11-26	2015-10-23 14:22:21	2016-02-08 14:10:03	NA	NA
884505	2016	BOIS	AS	NA	9	Manuelle	3006	2.00	2 00	IRR	F HET G 3	8800_BF	88TA_Beta1	MAGNIEN BRUNO	Désignée	2015-11-26	2016-02-08 14:37:11	2016-02-08 14:37:17	NA	NA
884505	2016	BONNEVAT	AS	NA	10	Manuelle	NA	2.00	11 04	PA	I HSE M 2	8800_DE	88TA_Beta1	MALINVERNO JEAN-BAPTISTE	Désignée	NA	2016-05-18 15:08:43	2016-05-18 15:17:28	NA	NA

*Tableau 1 – Visualisation des données brutes ProdBois Savoie sur R Studio*

Source – ONF

Réalisation – OIHI Zouhir

## 2.3 Préparation et tri des données

### 2.3.1 Création des rasters

Afin de pouvoir traiter les données LiDAR de manière optimale, il convient de convertir les nuages de points en trois dimensions en représentations raster de la canopée de deux dimensions et de résolution de 1m<sup>2</sup> (1.3.2).

Avant de générer le Modèle Numérique de Canopée (MNC), les données *LiDAR* sont filtrées afin d'éliminer les points jugés aberrants ou indésirables.

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est ensuite généré à l'aide de la méthode d'interpolation basée sur le *Triangulated Irregular Network* (TIN). Celui-ci permet d'estimer les points les plus bas de chaque cellule de la grille. Le MNT représente l'altitude au sol, sans couverture végétale. Cela permet de fournir une base solide pour l'évaluation de la hauteur de la canopée.

Dans un second temps, une différence entre les valeurs du Modèle Numérique de Surface (MNS) et celles du MNT est effectuée. Le MNS représente la surface complète de la terre avec tous les éléments. En effectuant cette différence, il est donc possible d'obtenir le MNC et ainsi évaluer la couverture végétale du territoire prospecté.

Enfin, un post-traitement a été effectué en créant une matrice (3x3) qui calcule la médiane des pixels autour des valeurs aberrantes, non valides (valeurs négatives et valeurs supérieures à 50 mètres de hauteurs) ou absentes afin de produire une représentation plus réaliste de la canopée.

Ces erreurs à la base peuvent être dues à un manque de points à certains endroits du territoire, à un problème de réflectance de l'appareil ou bien à une présence d'obstacle non filtrée en amont (poteau, oiseau, ...).

En somme, deux MNC sont élaborés. Le premier intègre les données des deux campagnes LiDAR de 2016 et 2018, le second est créé à partir des données *LiDAR HD* de l'IGN.

### 2.3.2 Différences et filtres

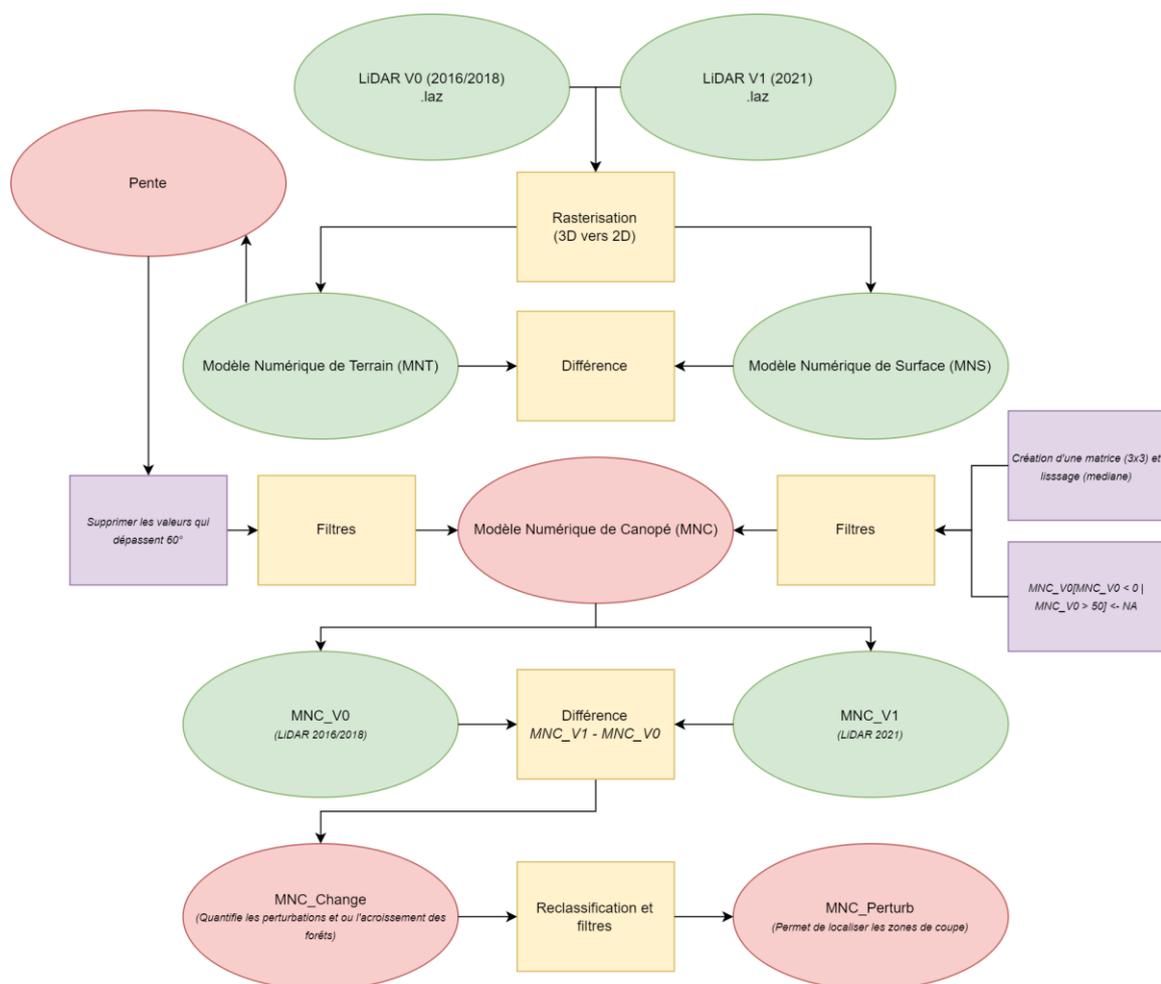
Afin d'obtenir les zones de perturbation, une différence est calculée entre les deux MNC en soustrayant les pixels du MNC de la seconde période (*MNC\_VI*) de ceux du MNC de la première période (*MNC\_V0*). Cela permet de produire un modèle de différence (*MNC\_Change*). En utilisant la fonction *clamp* de R Studio ; avec une limite inférieure de -50 et une limite supérieure de 20 ; les variations excessivement élevées ou basses sont définies comme des valeurs manquantes (*NA*). Un nouveau filtrage permet d'éliminer ainsi les données non valides ou peu fiables.

Une étape supplémentaire est entreprise afin d'éliminer les zones possédant une pente supérieure à 60 degrés. Ces zones de fortes pentes peuvent se confondre avec des zones de perturbation et fausser les résultats de l'analyse. De plus, les pentes très élevées peuvent être

associées à des zones rocheuses, des falaises ou d'autres caractéristiques topographiques abruptes, qui ne sont pas pertinentes pour l'étude des changements de la canopée.

Une version perturbée du modèle de différence est ensuite créée (*MNC\_Perturb*). Les accroissements de hauteur de la canopée, représentées par des valeurs positives dans le raster, sont supprimées en les remplaçant par des zéros. Cela permet de se concentrer uniquement sur les valeurs négatives des pixels qui représentent les diminutions de hauteur, c'est-à-dire, les zones où la canopée a été perturbée.

Enfin, une version binaire est générée à partir du modèle perturbé (*MNC\_Perturb\_bin*). Dans cette version, les valeurs égales ou inférieures à -5 sont définies comme « perturbation », identifiant ainsi les zones significativement perturbées où la hauteur de la canopée a diminué de manière importante. Toutes les autres valeurs supérieures à -5 sont définies comme « non perturbation », représentant les zones où la diminution de la hauteur de la canopée est moins marquée ou nulle. Cette différenciation s'explique notamment par un nouveau filtrage qui permet de sélectionner uniquement les grosses perturbations et d'éviter toute erreur de décalage ou d'interprétation liée à des variations mineures ou au bruit présent dans les données.



**Figure 6** – Synthèse de la préparation des données LiDAR  
Traitements réalisés à partir du logiciel R Studio (package LiDR)

Réalisation – OIHI Zouhir

### **3. Méthodologie et analyses**

L'un des objectifs initiaux de l'étude consistait à distinguer les différents types de coupes forestières effectuées et à quantifier le volume de bois coupé et commercialisé à partir des valeurs *LiDAR*. Parallèlement, l'étude visait à établir une corrélation entre ces données et les valeurs obtenues par *ProdBois* et ainsi potentiellement extrapoler ce volume commercial vers l'intégralité du territoire des Bauges.

#### **3.1 Jointure des données**

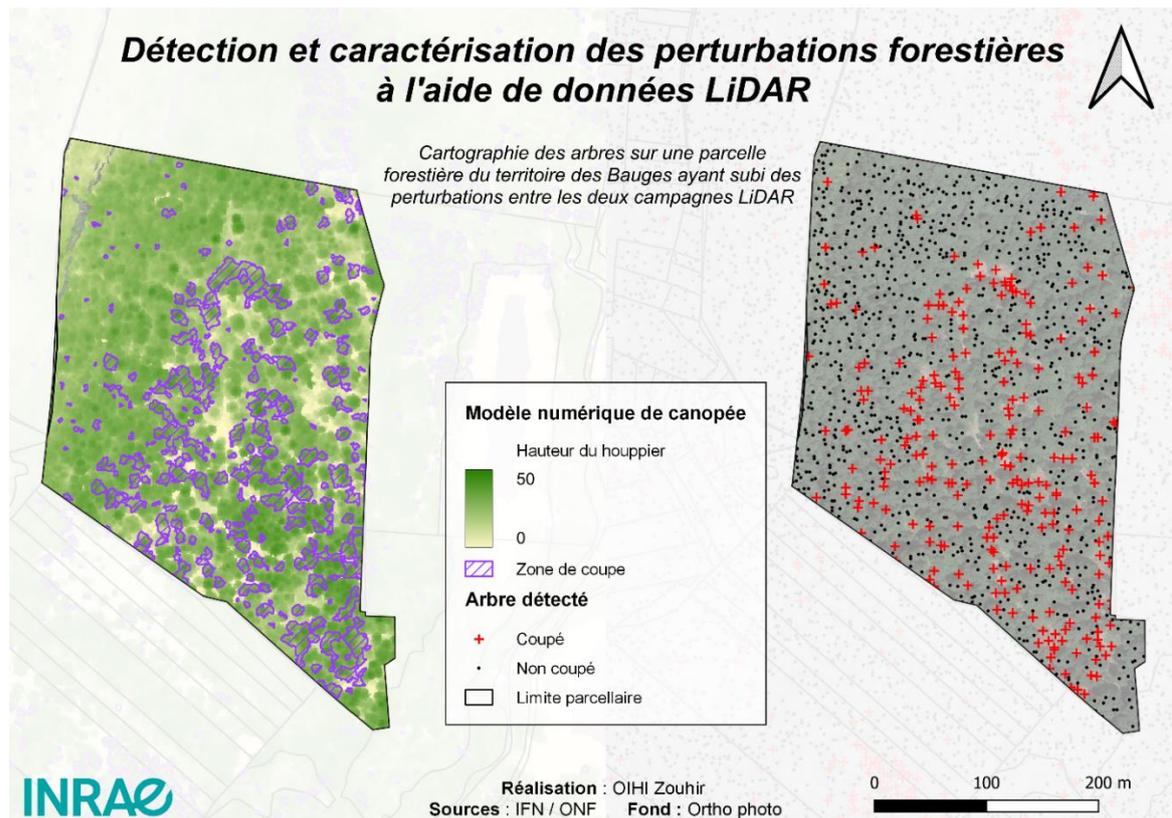
Dans un premier temps, il est nécessaire de sélectionner les informations sur les parcelles forestières publiques où des coupes ont été effectués entre la période des deux campagnes LiDAR.

##### **3.1.1 Modélisation des arbres et détection des houppiers et apex coupés**

Ainsi, à partir des MNC créés au préalable, il est possible de modéliser le contour des houppiers des arbres ainsi que leur apex (sommet de l'arbre). Cela a été rendu possible grâce à l'utilisation du package *LidaRtRee* sur R Studio créé par Jean-Matthieu Monnet. Le package *LidaRtRee* est un outil avancé d'analyse de traitement des structures forestières à partir des données *LiDAR*.

Une fois les contours des houppiers identifiés avec la fonction *tree\_segmentation*, la localisation des apex des arbres ; c'est-à-dire les points les plus élevés de chaque houppier ; est possible en utilisant la fonction *tree\_extraction* du même package. Ces traitements permettent d'obtenir la surface et le volume du houppier et la hauteur de chaque arbre détecté. En procédant à la jointure des points d'apex avec le raster *MNC\_Perturb\_bin*, la différenciation des arbres coupés des non coupés est réalisable.

Ainsi, il est possible de calculer les volumes et les surfaces totales des arbres coupés sur toutes les parcelles forestières. La normalisation à l'hectare par la suite permettra de prendre en compte la taille variable des parcelles, facilitant ainsi la comparaison des volumes et des surfaces des arbres coupés indépendamment de la superficie des parcelles étudiées. Cela permettra par la même occasion d'évaluer plus précisément l'impact de la coupe d'arbres sur différentes parcelles afin d'effectuer des analyses comparatives pertinentes.



**Carte 3** – Cartographie des arbres sur une parcelle forestière du territoire des Bauges ayant subi des perturbations entre les deux campagnes LiDAR

**Réalisation** – OIHI Zouhir

### 3.1.2 Obtention, calcul et jointure des variables

À partir des données de surface et de volume calculés par parcelle, des opérations supplémentaires ont été mesurées dans le but de caractériser les coupes forestières. Pour ce faire, les volume des arbres et le nombre de tiges, non seulement des zones perturbées mais également des zones non perturbées, ont été quantifiés. De plus, un calcul avec les coefficients de variation a été réalisé afin d'évaluer la variabilité des surfaces et des volumes individuels des houppiers.

En ce qui concerne les données issues de ProdBois, seules les informations nécessaires aux prochaines étapes de caractérisation des perturbations entre 2016 (2018 pour la campagne PROTEST) et 2021 dans les unités de gestion situées dans le territoire Savoyard et Haut-savoyard des Bauges ont été gardées.

Enfin, d'autres variables externes (quantitatives et qualitatives) ont été jointes aux parcelles forestières (topographie, essence majoritaire, propriétaire, distance aux pistes, accessibilité des machines, zone protégée, ect...).

Les variables du tableau 8 (Annexes) ont donc été calculées, jointes et utilisées dans les parcelles pour les analyses ci-contre. Toutes ces données ont été traitées avec le logiciel R Studio offrant une plateforme puissante pour la manipulation, l'analyse et la visualisation de données.

## 3.2 Régression linéaire et étude de corrélation

Dans un but d'analyse statistique de la relation entre les données ProdBois et les données LiDAR, il a été décidé d'émettre l'hypothèse qu'une coupe humaine ou accidentelle dans une parcelle forestière serait considérée à partir d'un seuil de 4 m<sup>3</sup> par hectare (4 m<sup>3</sup>/ha). Cette hypothèse de seuil a été établie comme point de départ pour étudier la corrélation. Cela représente environ la moyenne en m<sup>3</sup> de bois coupé par hectare dans les forêts françaises.

Toute intervention de coupe de bois inscrite sur ProdBois et / ou détectée par LiDAR en dessous de ce seuil ne sera pas prise en compte dans l'analyse. L'objectif est d'obtenir des résultats plus significatifs et représentatifs des coupes forestières sur les données étudiées et vise à exclure les variations mineures et les interventions de faible impact.

Ainsi, 239 parcelles forestières publiques ayant subi des perturbations entre 2016 / 2018 et 2021, ayant été inscrites sur ProdBois et détectées par LiDAR serviront de base à cette analyse. Cela regroupe 146 coupes irrégulières, 54 coupes de produits accidentels et 39 coupes rases ou sanitaires réparties sur les 5 (ou 3) années d'intervalle des campagnes LiDAR.

### 3.2.1 Analyse des variances (ANOVA)

Une analyse des variables catégorielles a tout d'abord été effectuée afin de voir si celles-ci peuvent influencer les variables quantitatives. L'analyse de Variance (ANOVA) détermine la significativité des variables catégorielles grâce à la comparaison des moyennes des différents groupes.

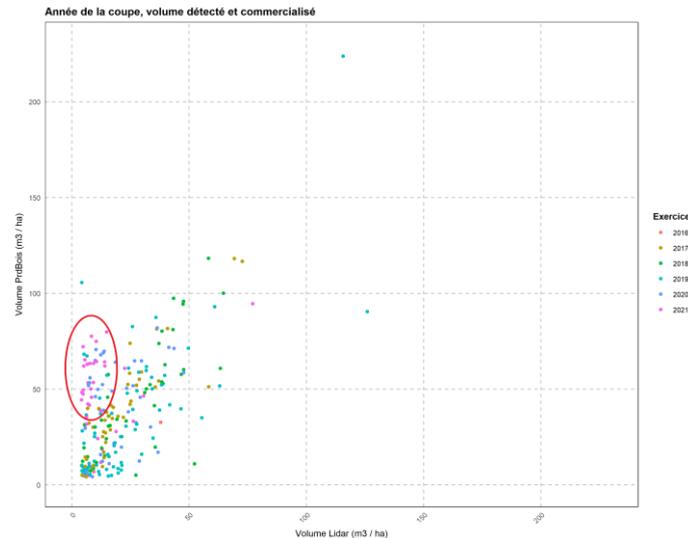
Ainsi, les trois principales variables catégorielles présentes dans notre ensemble de données (Type de coupe, année de coupe, essence principale) ont été soumises à des ANOVAs (Tableau 7 - Annexe).

Le type de coupe recensé sur ProdBois a une influence significative sur le volume de bois commercialisé (Vol\_Pb\_ha) ainsi que le nombre de tiges coupées (Nb\_tiges) et la hauteur dominante coupée (h\_dom\_C).

L'essence majoritaire dans la parcelle n'influence ni les données ProdBois, ni les résultats LiDAR. Seules les variables d'accessibilité sont influencées par la variable.

Pour ce qui est de la dernière année ou la parcelle a été coupée, beaucoup de variables issues des données LiDAR sont influencées de manière significative en fonction de l'année ou celle-ci a été coupée. Cela semble tout de même assez surprenant puisque les variables ProdBois ne sont pas influencées par la date de coupe.

En superposant le volume commercialisé et le volume détecté par LiDAR en fonction de l'année de coupe, il est facilement notable qu'en 2021 (et en partie en 2020), certaines parcelles présentent un volume LiDAR très bas par rapport au volume commercialisé (cercle rouge dans la Figure 7). Cette divergence suggère que certaines parcelles ont été martelées et inscrites sur ProdBois mais ont été partiellement voire pas été exploitées en temps voulu (retards, contraintes, années Covid, ...).



**Figure 7** – Comparaison volume LiDAR / ProdBois en fonction de la dernière année de coupe dans la parcelle

**Réalisation : OIHI Zouhir**

Ces parcelles ont donc été supprimées et les ANOVAs recommencées.

Dans le tableau ci-dessous, les résultats de la nouvelle ANOVA démontrent que le type de coupe continue d'exercer une influence significative sur le volume de bois commercialisé dans les parcelles. Les essences majoritaires, quant à elles, demeurent inchangées, n'ayant pas d'effet notable sur les données ProdBois ni sur les résultats LiDAR. Cependant, il est intéressant de noter que les variables d'accès continuent d'exercer une forte influence sur les données LiDAR, confirmant ainsi leur rôle crucial dans les résultats obtenus.

Cette nouvelle analyse ANOVA confirme que le type de coupe est un facteur significatif dans la détermination du volume de bois commercialisé dans les parcelles étudiées, dans une moindre mesure, le volume détecté par LiDAR.

Variable	p.value_Coupe	p.value_Essence	p.value_Acces
Arbres_Tra	0.1891887	0.0000445	0.0000000
Coef_coupe	0.2134646	0.6533489	0.0732982
h_dom_C	0.0091989	0.7056783	0.0052020
Ind_coupe1	0.5815003	0.1497868	0.0587023
Ind_dist_c	0.6322602	0.2476574	0.2452683
nb_ar_C	0.4169882	0.2618495	0.5882080
Nb_tiges	0.0011452	0.1216159	0.7019436
P_Pente	0.0430273	0.6732780	0.0010168
pct_bois	0.2553586	0.6953521	0.0880505
pertu_5m	0.5968429	0.3320833	0.1532526
Rte_distan	0.9457029	0.0028905	0.0002029
sur_tot_c	0.1813398	0.1773899	0.6352538
Surface	0.1420739	0.6251658	0.8486200
vCV	0.2073083	0.8791471	0.5026979
Vol_LdR_ha	0.1163744	0.4503576	0.0801552
Vol_Pb_ha	0.0000000	0.1658904	0.3642810

**Tableau 2** – Analyse des variances des variables qualitatives (en rouge les variables quantitatives influencées)

**Réalisation : OIHI Zouhir**

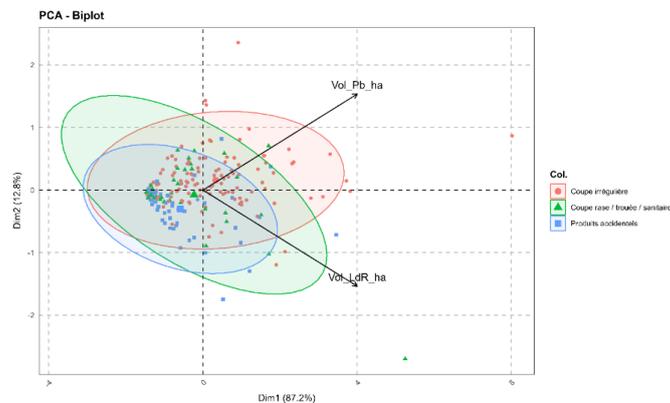
### 3.2.2 Corrélations et analyses en composantes principales (ACP)

Après visualisation des variables catégorielles, il convient d'explorer les éventuelles relations entre les variables quantitatives avec des analyses des composantes principales (ACP). Cette démarche permettra de déterminer si certaines variables présentent des variations conjointes et si celles-ci sont influencées par d'autres en combinant les variables entre elles.

Deux ACP ont donc été réalisées. La première afin de comparer les volumes détectés par LiDAR et ceux inscrits sur ProdBois. La seconde où toutes les variables sont ajoutées afin d'expliquer potentiellement si une corrélation existe.

La première ACP (Figure 8) ; avec uniquement les deux volumes à l'hectare que l'on cherche à comparer ; semble montrer qu'il n'y a pas de corrélation entre elles. En effet, le fait que les deux flèches soient perpendiculaires indique que les deux variables sont non corrélées, ne varient pas de manière linéaire et donc exercent des influences différentes dans la première composante principale.

Par ailleurs, dans le graphique ci-dessous, les coupes rases présentent une assez grande dispersion et semblent fortement influencées par le volume détecté par LiDAR (ellipse verte). Les coupes accidentelles suggèrent également une influence marquée par le volume LiDAR mais de moindre mesure (ellipse bleue). Les coupes irrégulières, quant à elles, sont relativement distinctes avec une dispersion équilibrée le long des deux composantes principales. Celles-ci semblent davantage tendre vers une influence par le volume commercialisé ProdBois.



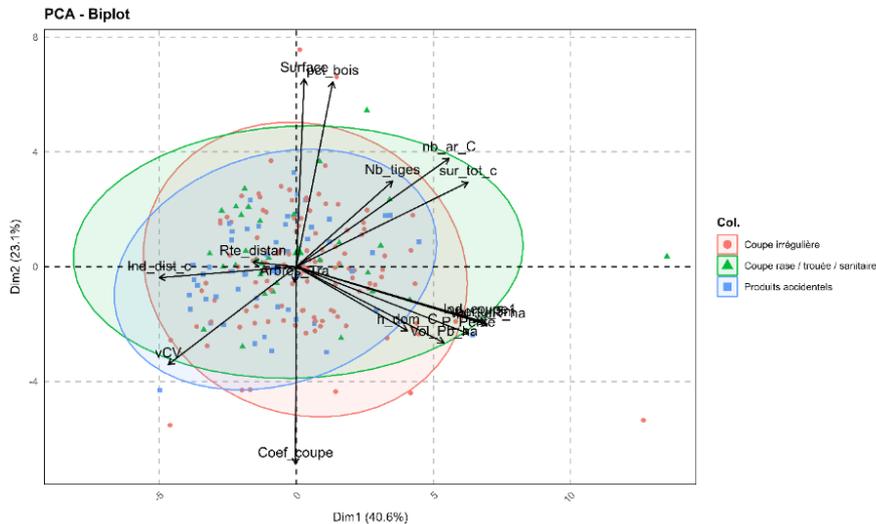
**Figure 8** – ACP entre les deux volumes ( $Vol\_Pb\_ha = ProdBois$ ,  $Vol\_LdR\_ha = LiDAR$ )

#### Réalisation : OIHI Zouhir

Cependant, dans la seconde ACP (Figure 9), dès lors qu'on rajoute toutes les variables quantitatives dans les composantes, les deux variables qu'on cherche à corréler suivent un même axe. Cela suggère donc que les variables de volumes semblent être en corrélation entre-elles dès lors que d'autres variables viennent les influencer.

L'alignement des flèches représentant les volumes à l'hectare le long du même axe dans la deuxième ACP indique que ces deux variables partagent une variation commune qui est expliquée par les autres variables introduites dans l'analyse. Cela pourrait signifier que d'autres caractéristiques liées aux coupes rases, accidentelles et irrégulières exercent une influence sur les volumes à l'hectare et contribuent à la corrélation observée entre ces volumes.

Cette analyse fournit des informations et un aperçu intéressant permettant de déduire que les caractéristiques forestières spécifiques ont un impact significatif sur les variations observées dans les volumes à l'hectare. Cependant, il convient de noter que cette corrélation ne permet pas de conclure directement sur la relation entre le volume détecté et le volume réel final commercialisé, notamment en fonction du type de coupe dans la parcelle et des objectifs de production de bois.



**Figure 9** – ACP entre toutes les données disponibles (les deux volumes suivent un même axe)

**Réalisation : OIHI Zouhir**

### 3.2.3 Régressions linéaires (lm)

Avec les analyses de variances (ANOVA) et les analyses des composantes principales (ACP) réalisées en amont il est donc possible de réaliser une régression linéaire multiple (lm).

Afin de choisir quelles variables doivent intégrer le modèle, les critères d'information d'Akaike (AIC) pour chaque combinaison de variables sont calculés et le plus bas est gardé. En effet, cet indice permet de sélectionner le modèle statistique le plus approprié en évaluant la balance entre l'ajustement aux données et la complexité du modèle. Il favorise ainsi les modèles qui expliquent bien les données tout en évitant le surajustement, contribuant ainsi à une meilleure régression linéaire.

Après le calcul de plusieurs milliards de combinaisons possibles, les variables gardées pour comprendre le volume commercialisé sont le volume détecté par LiDAR (*Vol\_LdR\_ha*), le pourcentage de perturbation dans la parcelle (*pct\_pertu*), le nombre d'arbres coupés détectés (*Nb\_ar\_C*), le volume moyen coupé dans la parcelle (*Vol\_moy\_C*), le neuvième quantile du volume coupé dans la parcelle (*Vol\_Q9\_c*), le volume médian coupé dans la parcelle (*Vol\_med\_C*), le type de coupe (*Coupe\_Pb*) et la surface moyenne coupée des perturbations dans la parcelle (*Coef\_ZC*). L'AIC de ces variables est d'une valeur d'environ 1209, le plus petit résultat obtenu.

En observant les résultats de la régression linéaire (tableau 3), le modèle de régression semble être validé.

Dans un premier temps, en se basant sur les critères du  $R^2$  (ou coefficient de détermination). Il s'agit d'un indice qui montre si les variations de la variable ciblée sont ajustées par les variations des variables explicatives. Plus celui-ci est proche de 1, plus le modèle est ajusté et les variations expliquées. Ici le  $R^2$  est de 0,7855 qui est un premier résultat intéressant puisqu'il montre bien que les variations du volume commercialisé est influencé par les variables sélectionnées.

Il est dans un second temps validé par le résultat de la valeur p qui est de  $2.2 \times 10^{-16}$ . Il s'agit d'une entité qui évalue la significativité entre la variable ciblée et les variables observées. En règle générale, si celle-ci est inférieure à 0.05, il y a une significativité dans le modèle. Ici, le résultat est nettement inférieur ce qui montre donc une significativité marquée dans le modèle.

Enfin, malgré le fait qu'il y ait une significativité de toutes les variables du modèle car toutes possèdent une valeur inférieure à 0,10 (hormis *Coef\_ZC*, mais qui est tout de même proche de 0.12), le volume détecté par LiDAR et le type de coupe semblent être les facteurs principaux de cette régression linéaire (forte significativité des éléments).

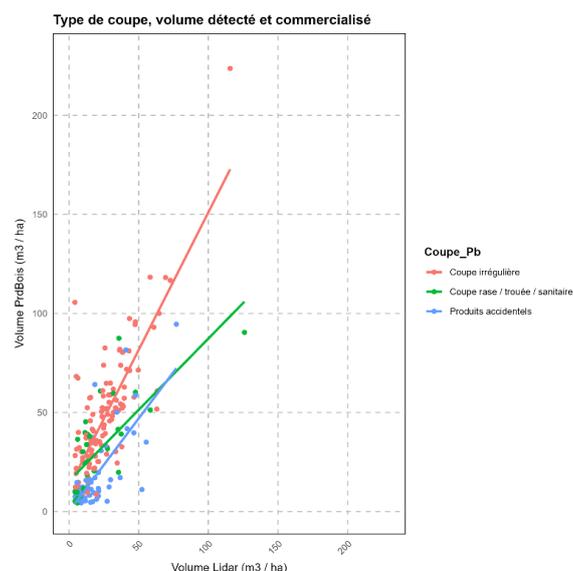
coefficients:					
	Estimate	Std. Error	t	value	Pr(> t )
(Intercept)	5.106007	6.235119	0.819	0.41427	
pertu_5m	253.015582	100.567746	2.516	0.01304	*
nb_ar_C	-0.037622	0.015315	-2.456	0.01529	*
vol_moy_c	0.065685	0.029782	2.205	0.02910	*
med_vol_c	-0.036042	0.020501	-1.758	0.08098	.
q9_vol_c	-0.016825	0.007613	-2.210	0.02878	*
Vol_LdR_ha	0.781983	0.343532	2.276	0.02439	*
Coef_ZC	-0.088297	0.056762	-1.556	0.12214	
Coupe_PbCoupe rase / trouée / sanitaire	-8.914300	3.360436	-2.653	0.00893	**
Coupe_PbProduits accidentels	-17.896645	3.186361	-5.617	1.06e-07	***

Multiple R-squared: 0.7995, Adjusted R-squared: 0.7863 p-value: < 2.2e-16

**Tableau 3** – Modèle de régression linéaire (lm) entre le volume détecté et réel

**Réalisation** : OIHI Zouhir

Selon la régression linéaire, les parcelles ayant des produits accidentels influencent fortement le volume commercialisé (qui en moyenne est 5,6 fois plus bas qu'un volume d'une coupe irrégulière) alors que pour les coupes irrégulières, le volume commercialisé semble être plus gros que le volume détecté.



**Figure 10** – Graphique à points illustrant les volumes en fonction des types de coupe

**Réalisation** : OIHI Zouhir

### 3.3 Extrapolation vers les parcelles privées

#### 3.3.1 Analyse Linéaire Discriminante (ALD)

Afin de pouvoir prédire le volume commercial dans toutes les parcelles présentes, il est nécessaire de connaître le type de coupe présente sur la parcelle.

Une analyse linéaire discriminante (ALD) a été réalisée afin de voir si les variables disponibles influencent le type de coupe et ainsi pouvoir déterminer l'appartenance de la parcelle sans connaître sa véritable nature.

Cette détermination a pu être réalisée en utilisant la fonction `lda` (fonction de l'ALD de R studio) et en y intégrant les variables jugées pertinentes selon l'ANOVA (section 3.2.1). Par ailleurs, la distance moyenne entre les perturbations, la distance moyenne coupée entre chaque arbre dans la parcelle et le facteur de pente ont été rajoutés dans le modèle. Ce choix a été réalisé à l'aide d'une boucle qui essayait toutes les variables entre elles et le plus gros taux a été gardé (Tableau 4).

La classification paraît donc être fonctionnelle, puisque en comparant les types de coupe réels (ProdBois) avec le modèle de prédiction (ALD), le taux de bonnes classifications atteint environ 74 %. Cela montre ainsi que les variables calculées par LiDAR semblent significativement aider à déterminer le type de coupe dans la parcelle.

Cependant, même si les résultats demeurent positifs, en s'intéressant à la matrice de confusion et malgré la présence de différences significatives dans le volume coupé à l'hectare, le modèle donne l'impression d'avoir plus de mal à distinguer les « Produits accidentels » des « Coupes irrégulières », en particulier dans les parcelles où il y a eu très peu d'arbres détectés.

Predicted	True			
	Coupe irrégulière	Coupe rase / trouée / sanitaire	Produits accidentels	
Coupe irrégulière	110	18	26	
Coupe rase / trouée / sanitaire	1	20	4	
Produits accidentels	2	2	20	

**"Taux de bonnes classifications : 73.8916256157635 %"**

**Tableau 4** – Matrice de confusion entre le type de coupe déterminé par l'ALD et le type de coupe réel ; taux de bonnes classifications du type de coupe. (R Studio)

**Réalisation** : OIHI Zouhir

Malgré cela, la détermination du type de coupe a tout de même été réalisé afin d'obtenir des volumes commercialisés dans toutes les parcelles du territoire.

#### 3.3.2 Prédiction

Après avoir pu prédire le type de coupe dans les parcelles (fonction `predict` sur R studio), il est désormais possible de prédire le volume commercial sur l'ensemble de ces parcelles du territoire des Bauges. Pour éviter tout problème de détermination dans le type de coupe, les parcelles ayant moins de 8 arbres détectés coupés ont été classées en « Faible coupe commerciale ». Il s'agit du plus petit nombre d'arbres coupés par LiDAR dans les parcelles publiques (ProdBois). Les parcelles avec aucune perturbation ont été classées en « Aucune coupe détectée ».

### 3.3.3 Synthèse des traitements

Le graphique ci-dessous a été réalisé en tant que synthèse des traitements effectués lors de la méthodologie et de l'analyse.

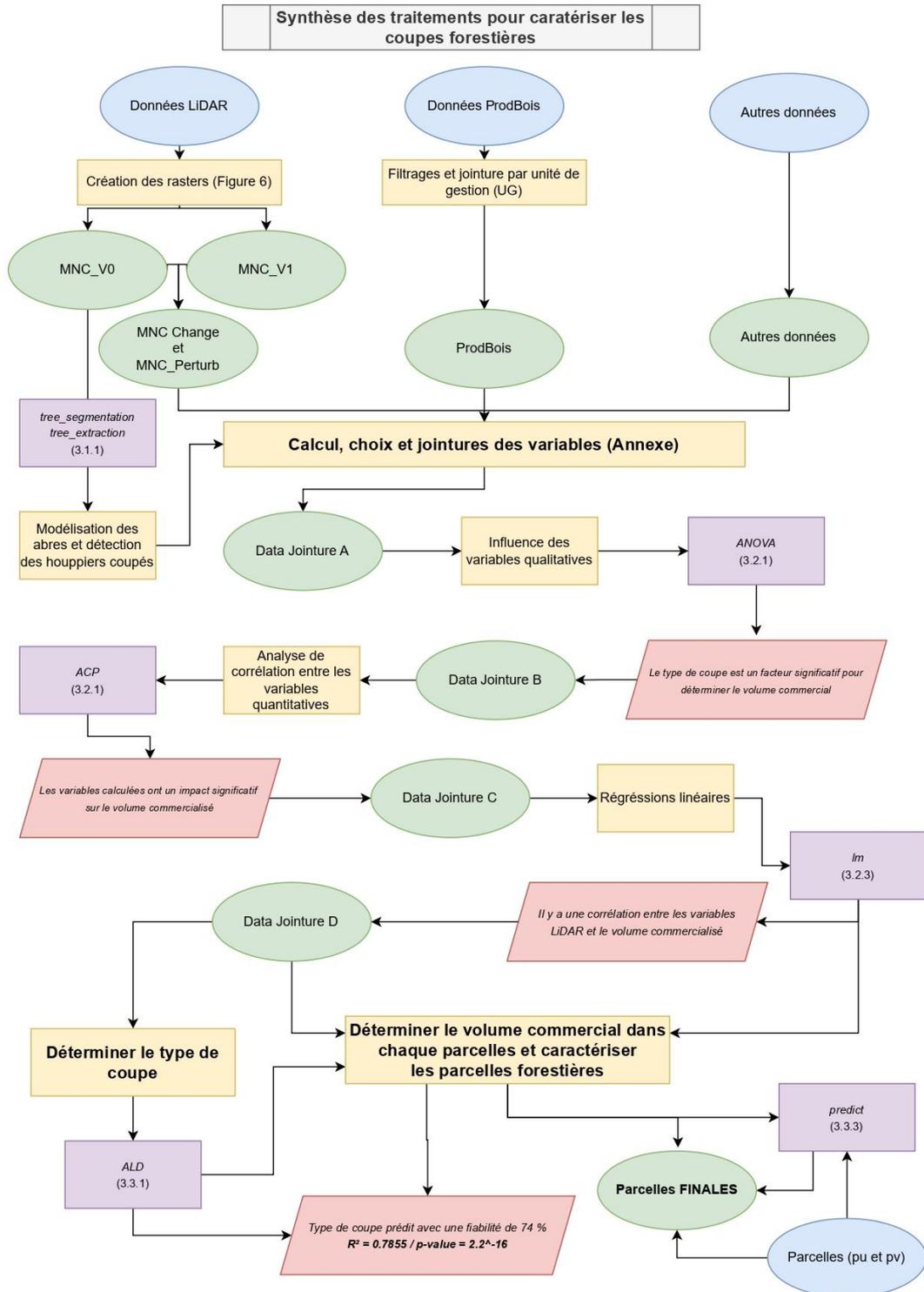


Figure 11 : Synthèse des traitements

Réalisation : OIHI Zouhir

## 4. Résultats et interprétations

### 4.1 Résultats globaux

#### 4.1.1 Perturbations générales

Dans le territoire forestier des Bauges, environ 7 100 000 arbres ont été détectés en 2016 / 2018, dont 280 000 ont été coupés. Durant cette période, **2,4 %** du territoire forestier a subi des perturbations.

En ce qui concerne les types de coupes, sur 133382 parcelles forestières dans le territoire, 93645 parcelles n'avaient pas de perturbation, 34075 parcelles avaient des coupes insignifiantes, 3013 avaient eu de la coupe irrégulière, 1370 de la coupe rase et 1247 des produits accidentels. A première vue, il semble y avoir peu de parcelles coupées. Cependant, dès qu'on parle en termes de superficie, les parcelles où des coupes ont eu lieu sont en réalité plus importantes. En effet, 4,2 % des parcelles (celles coupées) représentent 45,8 % du territoire étudié.

Cela peut s'expliquer par un morcellement très fort des parcelles et à une division des propriétaires forestiers. Ainsi, un petit propriétaire aurait beaucoup moins tendance à couper dans ses petites parcelles car la proportion de bois coupé serait importante pour finalement peu de volume (Figure 12 et Carte 4).

De plus, les coupes rases et sanitaires semblent minoritaires et plutôt rares dans la zone d'étude, ce qui suggère une approche de gestion forestière plus durable et équilibrée avec une approche plus travaillée de la sylviculture.

Diagramme du nombre de parcelles par type de coupe

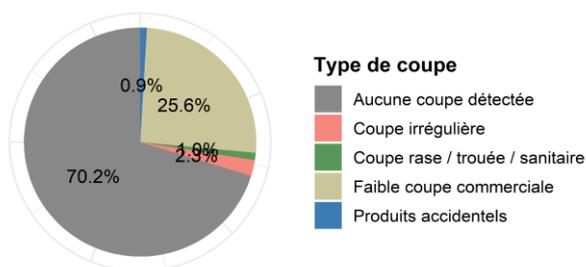
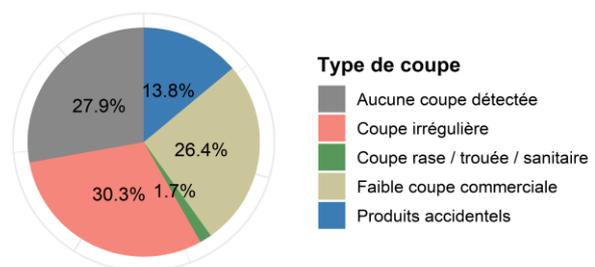
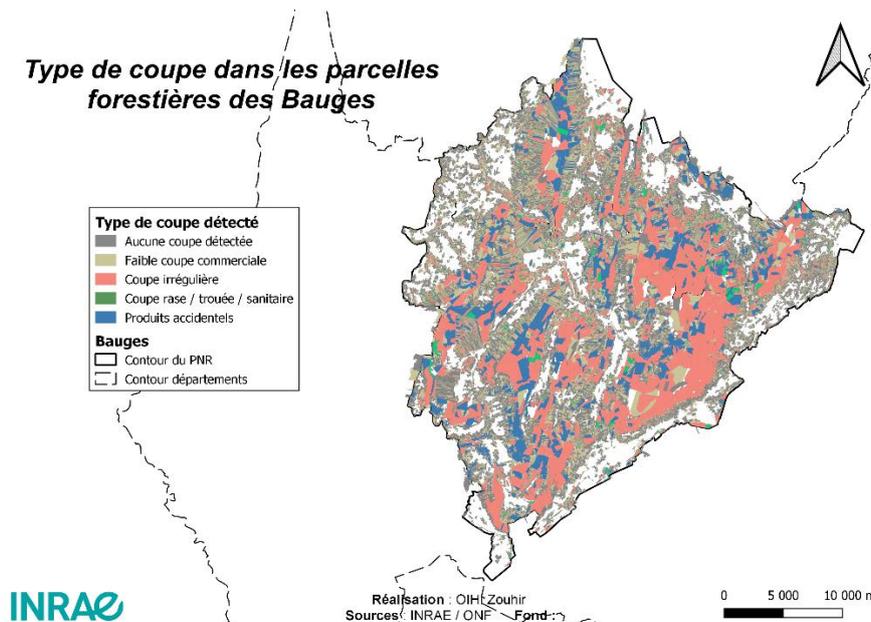


Diagramme de la surface totale par type de coupe



*Figure 12 : Répartition du nombre et de la proportion en surface des parcelles en fonction du type de coupe*

**Réalisation : OIHI Zouhir**



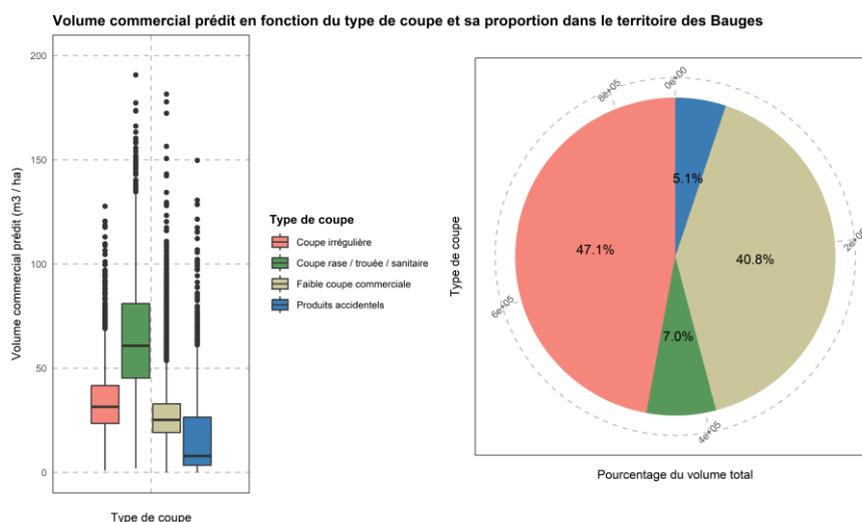
**Carte 4 : Type de coupes majoritaires dans les parcelles forestières des Bauges**

**Réalisation : OIHI Zouhir**

#### 4.1.2 Volume commercialisé

Le volume commercialisé prédit dans le territoire des Bauges durant la période étudiée montre que les coupes rases produisent une quantité de bois plus importante lors de la coupe (Figure 13 et Tableau 5).

Par, ailleurs, la coupe irrégulière y est largement majoritaire avec 47% du volume prédit et les coupes dites « faibles » représentent plus de 40 % du volume total commercial prédit. Ces deux résultats montrent que plusieurs types de coupes sont présentes dans les Bauges mais que les coupes moins agressives et moins impactantes pour l'environnement semblent être la préférence pour les méthodes de production.



**Figure 13 : Volume commercial prédit en fonction du type de coupe**

**Réalisation : OIHI Zouhir**

#### 4.1.3 Les peuplements coupés

En ce qui concerne le peuplement des forêts, il ne semble pas y avoir de différence de volume coupé selon l'essence majoritaire dans la parcelle. Il est à noter qu'on observe légèrement plus de bois extrait par hectare pour les conifères. (Tableau 6)

Cela laisse également dire que les coupes ne sont pas influencées par l'aspect montagneux du territoire, puisque en général dans les Alpes, les conifères sont fréquemment plus présents en altitude que les feuillus (meilleure adaptation aux conditions climatiques).

ESSENCE	Nombre de parcelle	Volume total coupé (m3)	Volume moyen (m3 / ha)	Surface (ha)
Conifères	14342	281926.9	12.207546	17671.10
Feuillus	82760	320846.2	7.206562	31315.22
Mixte	36248	248426.7	9.521371	18838.45

**Tableau 6 :** Volume commercial prédit en fonction de l'essence majoritaire dans la parcelle

**Réalisation :** OIHI Zouhir

#### 4.2 Différences entre les propriétaires forestiers

L'un des objectifs principaux de cette étude était de comparer les perturbations forestières en fonction de la nature des propriétaires. Même si le nombre et la superficie des parcelles privées sont supérieurs, il est tout de même pertinent de pouvoir comparer ces deux types de propriétés pour comprendre l'impact global sur les perturbations forestières.

En effet, le volume moyen de bois coupé par hectare est deux fois plus élevé dans les parcelles publiques (16,76 m<sup>3</sup> / ha) que dans les privées (8,28 m<sup>3</sup> / ha) (Tableau 7). Cette disparité peut découler de politiques ou d'objectifs de gestion complètement divergents. Les petits propriétaires auraient tendances à couper avec parcimonie les ressources tandis que les parcelles publiques, plus grandes, suivent une planification et des objectifs de volume à atteindre.

Etat_Prop	Nombre de parcelles	Surface (ha)	Volume commercial total (m3)	Volume moyen coupé (m3 / ha)
Prive	131734	44079.66	548907.3	8.276641
Public	1616	23745.11	302292.6	16.759547

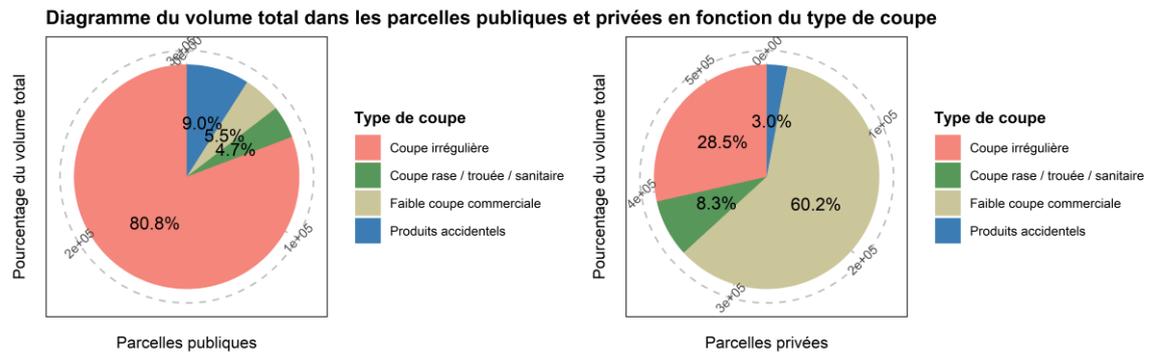
**Tableau 7 :** Comparaison sur le volume produit entre forêt publique et privée

**Réalisation :** OIHI Zouhir

En s'intéressant aux types de coupes forestières, des disparités marquées se dessinent entre les forêts publiques et privées (Figure 14). Les parcelles publiques sont dominées par la coupe irrégulière (80,8 %) tandis que dans les parcelles privées, il s'agit des coupes avec une faible coupe commerciale (60,2 %). Il y a également une plus haute proportion de coupe rase (8,3 % des coupes).

Cela laisse entendre que les parcelles publiques bénéficient d'une gestion plus orientée vers la durabilité, favorisant des coupes moins importantes et préservant ainsi la structure et la continuité des forêts alors que les propriétaires privés pourraient être plus motivés par des considérations économiques à court terme et donc des coupes plus importantes (coupe rase).

Par ailleurs, le morcellement important des parcelles dans le privé est également l'une des raisons de l'importance des coupes faibles. Cette fragmentation des terrains en unités plus petites résulte souvent de successions et d'héritages au fil du temps. Cela rend la modélisation plus complexe et ne permet pas toujours de déterminer si des coupes ont été effectuées sur plusieurs parcelles collées appartenant au même propriétaire.



**Figure 14 : Type de coupe en fonction du propriétaire**

**Réalisation : OIHI Zouhir**

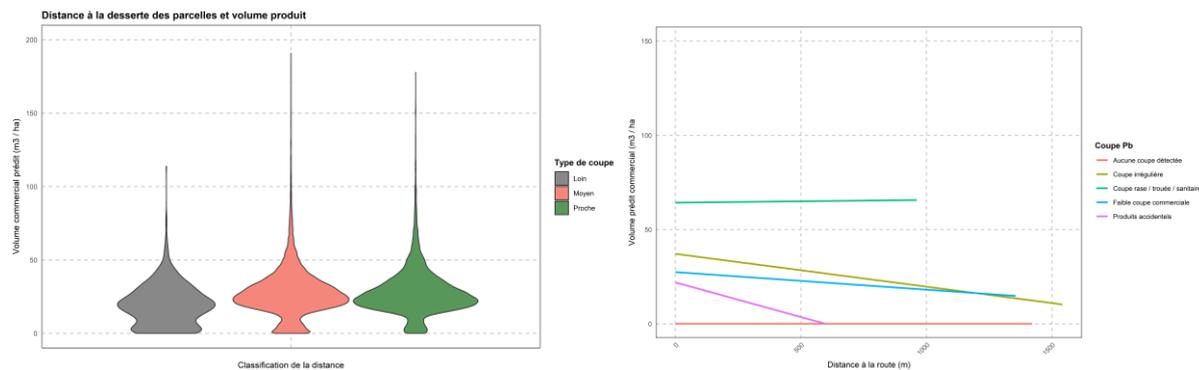
### 4.3 Facteur de l'accessibilité

Enfin, il a été question d'évaluer si la distance par rapport aux routes forestières, l'accessibilité générale des engins d'extraction de bois et le facteur de pente, influençaient le volume produit dans le territoire des Bauges.

Dans un premier temps, en classant la distance de la route la plus proche à la plus grande zone de perturbation dans la parcelle en trois classes (50 m en « proche », 50/500 m en « moyen » et 500 m et plus en « loin »). Puis, en comparant avec le volume moyen prédit des parcelles. A première vue, les parcelles loin des routes forestières semblent moins touchées par les coupes forestières que les parcelles à moins de 500 mètres.

En se focalisant par la suite sur les types de coupes réalisés dans les parcelles (Figure 15), toutes les catégories tendent vers une baisse du volume lorsque la distance à la route forestière augmente hormis les coupes rases. Cette particularité peut s'expliquer par des considérations d'accessibilité et de logistique spécifiques. En effet, de manière générale, à mesure que la distance par rapport aux routes forestières augmente, les coûts augmentent, entraînant ainsi une réduction du volume potentiellement récoltable pour ces types de coupes.

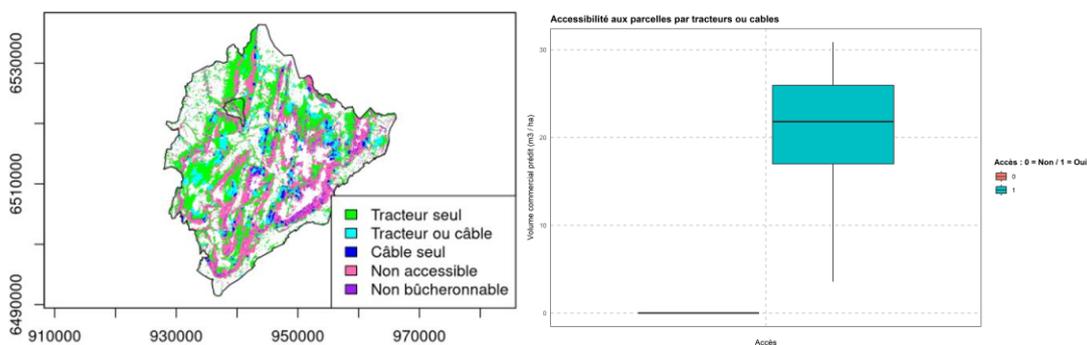
Les coupes rases suivent donc moins ce processus puisque des moyens plus grands peuvent être mis en place pour réaliser ce type de coupe.



**Figure 15 :** Mise en relation entre distance à la route forestière, volume prédit et type de coupe

**Réalisation :** OIHI Zouhir

L'accessibilité dans le territoire des Bauges et issu de l'outil open source *Sylvaccess* (INRAE, Carte 4) a été rajoutée dans l'analyse et permet de différencier les parcelles accessibles avec les matériels de débardage forestier (tracteur, câble et porteur forestier). Ainsi, les parcelles majoritairement accessibles (1) ont été différenciées des parcelles majoritairement non accessibles (zones où le tracteur et le câble ne sont pas accessibles) et non bûcheronnables (pente trop élevée, 0). En comparant le volume commercial prédit, il y a une différence élevée entre les parcelles 1 et les parcelles 0. Cela montre une nouvelle fois que le facteur d'accessibilité dans la planification forestière et la gestion de la ressource bois est pris en compte.



**Carte 5 :** Accessibilité dans les forêts du territoire des Bauges

**Réalisation :** Projet PROTEST

**Figure 16 :** Comparaison du volume prédit en fonction de l'accessibilité de la forêt (Bleu = OUI / Rouge = NON)

**Réalisation :** OIHI Zouhir

## **Conclusion, limites perspectives**

L'analyse réalisée dans cette étude aura permis de mettre en relation les caractérisations et l'évaluation des perturbations forestières avec l'utilisation de deux campagnes LiDAR sur le territoire des Bauges. Les résultats obtenus ont permis la mise en place d'une corrélation prometteuse entre les informations détectées par les outils de télédétection et les caractéristiques inscrites dans les forêts publiques.

Cette relation a également pu être extrapolée aux parcelles privées, offrant ainsi des dynamiques de gestion potentiellement communes entre les différents acteurs de la forêt.

Néanmoins, des limites subsistent dans l'approche réalisée. En effet les données LiDAR peuvent être sensibles aux facteurs topographiques et environnementaux des territoires. C'est d'autant plus le cas ici puisqu'il s'agit de deux campagnes LiDAR combinées en une seule (2016 / 2018).

En ce qui concerne la technologie LiDAR, il est important de noter qu'elle a ses propres limites. Cet outil détecte uniquement à la surface, ne capturant pas nécessairement les informations sous la canopée. Cette limitation peut influencer la précision des données recueillies, en particulier dans des environnements forestiers denses. Une prise de conscience de ces limites est essentielle pour interpréter les résultats de manière équilibrée et éclairée.

Par ailleurs, les données ProdBois utilisées en tant que référence, ont été conçues à la base pour suivre et analyser l'évolution de l'exploitation forestière en France. Son usage dévié de celui d'origine augmente donc le risque d'erreurs et de difficultés dans la caractérisation et la compréhension des perturbations forestières.

Les variations entre les pratiques de gestion dans les secteurs publics et privés peuvent également introduire des différences notables dans les résultats observés. N'ayant aucune information dans le secteur privé, il faut bien garder en tête qu'il s'agit d'une extrapolation et d'une comparaison entre privé / public avec uniquement des informations de parcelles publiques.

Enfin, comme dit précédemment (4.2), le découpage parcellaire dans le privé est également une des limites à l'étude pouvant rendre difficile la détermination de mêmes coupes sur plusieurs parcelles en biaisant potentiellement les résultats.

Cependant, des perspectives d'amélioration de l'analyse sont nombreuses et entrevoient à de meilleurs résultats et une caractérisation des parcelles forestières.

Dans un premier temps, l'acquisition de données de télédétection en compléments des deux campagnes LiDAR peut être une première source d'amélioration significative. En effet, l'acquisition régulière de données Sentinel-2 à intervalle annuel pourrait offrir une opportunité de suivre l'évolution des perturbations forestières dans le territoire et ainsi quantifier les années de manière précise. De plus, en combinant les données LiDAR avec des cartographies d'occupation du sol forestier, il serait possible de renforcer et de valider les résultats obtenus à partir des données LiDAR seules. Cette approche intégrée permettrait d'obtenir une perspective plus complète et dynamique des changements forestiers au fil du temps.

Dans un second temps, la réalisation d'une phase de terrain afin de combler les défauts de la technologie LiDAR. Cette démarche permettrait de vérifier et de valider les résultats obtenus à partir des données LiDAR, tout en identifiant les détails que cette technologie pourrait manquer, tels que les informations situées en dessous de la canopée. Cette validation terrain contribuerait à renforcer la confiance dans les conclusions de l'analyse.

Enfin, pour compléter cette démarche, adopter une échelle d'analyse différente serait également un choix intéressant. Envisager des échantillonnages à l'échelle de placettes ou de quadrillages à surfaces égales pourrait fournir une vue plus fine et représentative des changements forestiers. Cette approche pourrait mieux tenir compte des structures et caractéristiques forestières et permettre de réduire les problématiques des parcelles (différence de taille, effets de bords de parcelles, coupes séparées, ...). Cette mise en place d'une échelle permettrait également de pouvoir créer un modèle de prédiction précis pour les futures coupes, en fonction des caractéristiques déjà exploitées. Cela pourrait améliorer la planification forestière en intégrant les informations historiques et les tendances observées, favorisant ainsi une gestion plus efficace et durable des ressources forestières.

## **Bibliographie**

Boivin, J. L. (1971). Étude de la régénération après coupe rase dans des peuplements feuillus et mélangés de l'ouest québécois. *The Forestry Chronicle*, 47(2), 82-85.

Bonin, F., Maurice, S., & Bastit, F. (2023). Une planification des forêts à adapter face à des défis encore inconnus.

Bonnet, S. (2009). Un Modèle Numérique de Canopée pour l'estimation de la hauteur dominante des peuplements résineux en Région wallonne. *Forêt Wallonne*, 98, 53-59.

Bourg, J. F., & Gouguet, J. J. (1998). Analyse économique du sport. (*No Title*).

Brändli, U. B. (2000). Etat et évolution de la ressource forestière feuillue en Suisse. Résultats du deuxième inventaire forestier national (IFN 2) | State and Development of Hardwood Resources in Swiss Forests—Results of the Second National Forest Inventory (NFI 2). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 151(7), 247-252.

Brang, P., Ott, E., & Schoenenberger, W. (1998). La Forêt de montagne en Suisse: écologie, sylviculture, aménagement. *Revue forestière française*, 50(sp), 97-115.

Cambier, C. (2018). Caractérisation de la hauteur et de l'accroissement de peuplements en régénération avec des données photogrammétriques et LiDAR: Application à la forêt boréale québécoise.

Dehez, J. (2013). *L'ouverture des forêts au public: Un service récréatif*. Editions Quae.

Devèze, M. (1966). Les forêts françaises à la veille de la Révolution de 1789. *Revue d'histoire moderne et contemporaine (1954-)*, 13(4), p16-19.

Dhote, J. F. (2004). *Perturbations, diversité et permanence des structures dans les écosystèmes forestiers* (Doctoral dissertation, Université Paris).

Drever, R., Bio, R. P., & Lorenzetti, M. F. (2003). Changements climatiques: impacts sur les forêts québécoises-revue de littérature.

Eggrickx, Ariel. « Dynamiser la filière bois par le développement durable : Le cas d'un Pôle d'Excellence Rurale Bois Bio-ressources », *Gestion 2000*, vol. 33, no. 2-3, 2016, pp. 95-114.

Eysn, L., Hollaus, M., Lindberg, E., Berger, F., Monnet, J. M., Dalponte, M., ... & Pfeifer, N. (2015). A benchmark of lidar-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the alpine space. *Forests*, 6(5), 1721-1747.

Ferraz, A. (2012). *Cartographie 3D d'une forêt à partir de données LIDAR aéroporté* (Doctoral dissertation, Paris, Institut de physique du globe).

Fuhr, M., Becquey, J., Berger, F., Bock, J., Bourhis, F., Dubus, N., ... & Tivadar, M. (2022). PSDR4 OUIGEF-Outils innovants pour une gestion concertée des forêts. *Innovations Agronomiques*, 86, 319-329.

- García, D. E. (2001). *Aménagement sylvicole dans les trouées formées après coupe dans la forêt feuillue de la région Atlantide du Honduras*. National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa.
- Gauthier, S., Leduc, A., Harvey, B., Bergeron, Y., & Drapeau, P. (2001). Les perturbations naturelles et la diversité écosystémique. *Nat. Can.*, 125(3), 10-17.
- Georges-Leroy, M., Bock, J., Dambrine, É., & Dupouey, J. L. (2011). Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye. *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, (35), 117-129.
- Gleizes, O. (2016). Les projets carbone en forêt: des initiatives d'atténuation du changement climatique. *Forêt Méditerranéenne*, 37(4), 299-304
- Gondard, H., Romane, F., Shater, Z., Grandjanny, M., & Renaux, A. (2004). Conséquence d'une coupe rase ou d'une éclaircie sur la richesse spécifique et le mode de dissémination des espèces végétales dans des forêts de pin d'Alep du Var (Sud de la France). *Forêt méditerranéenne*, 25(1), 3-14.
- Hlásny, T., Krokene, P., Liebhold, A., Montagné-Huck, C., Müller, J., Qin, H., ... & Viiri, H. (2019). *Living with bark beetles: impacts, outlook and management options* (No. 8). European Forest Institute.
- Jactel, H., Loustau, M. L. M. D., Marçais, B., Piou, D., Robinet, C., & Roques, A. (2012). Evolution des risques biotiques en forêt. *Innovations Agronomiques*, 18, 87-94.
- Kirilenko, A. P., & Sedjo, R. A. (2007). Climate change impacts on forestry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19697-19702.
- Kniess, U. (2011). *Quantification de l'évolution de glissements de terrain argileux par des techniques de télédétection. Application à la région du Trièves (Alpes Françaises)* (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).
- Lamaille, G., Lahaye, J., Vandenberg, T., & Bruxelles, E. C. A. M. (2016). L'utilisation du Scanning Laser 3D pour la documentation as-built des projets BIM. *Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels*, (30).
- Le Tacon, F., Selosse, M. A., & Gosselin, F. (2000). Biodiversité, fonctionnement des écosystèmes et gestion forestière. 1ère partie. *Revue forestière française*, 52(6), 477-495.
- Lievin Kasanda, N. (2020). *Détection automatisée du réseau routier en forêt boréale par télédétection* (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- Lesmerises, F. (2012). *Impacts des perturbations anthropiques sur la sélection d'habitat et la distribution spatiale du loup gris (Canis lupus) en forêt boréale* (Doctoral dissertation, Université du Québec à Rimouski).
- Maas, H. G., & Vosselman, G. (1999). Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3), 153-163.

- Marta-Pedroso, C., Laporta, L., Proença, V., Azevedo, J. C., & Domingos, T. (2014). Changes in the ecosystem services provided by forests and their economic valuation: a review. *Forest Landscapes and Global Change: Challenges for Research and Management*, 107-137.
- Monnet, J. M., Mermin, E., Chanussot, J., & Berger, F. (2010, September). Tree top detection using local maxima filtering: a parameter sensitivity analysis. In *10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems (Silvilaser 2010)* (pp. 9-p).
- Ponge, J. F., André, J., Bernier, N., & Gallet, C. (1994). La régénération naturelle, connaissances actuelles: le cas de l'épicéa en forêt de Macot (Savoie). *Revue forestière française*, 46(1), 25-45.
- Poupardin Denis, Larrère Raphaël. La gestion forestière : rationnelle ou raisonnable ?. In: *Cahiers d'Economie et sociologie rurales*, N°15-16, 2e et 3e trimestres 1990. Économie de la forêt et offre de bois. pp. 39-73.
- Rajaonson, A., Jules, S. G., Ravelonjanahary, S., & Ratsimbazafy, J. (2014). Effet du microclimat et de la disponibilité alimentaire sur la répartition de Eulemur rufifrons dans la forêt humide du Parc National Andringitra. *Lemur News*, 18.
- Schwitter, R., & Bucher, H. (2009). La forêt protège-t-elle contre les crues ou les arbres causent-ils eux-mêmes des inondations ? *La forêt*, 10, 09.
- Shang, X (2014). Etude de la canopée forestière : De la mesure lidar aéroportée à l'observation spatiale. Sciences de la Terre. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2014. Français.
- Terreaux, J & Chavet, M (2009). Prévention et atténuation de l'impact des tempêtes sur les forêts: une analyse financière comparée de quelques options de gestion appliquées au douglas. *Briot, Y., G. Landmann, I. Bonhème coord., La forêt face aux tempêtes, Quae Editions 2009*, p. 305-318.
- Tillier, S. (2011). *Gérer durablement la forêt méditerranéenne: exemple du parc naturel régional des Alpilles* (Doctoral dissertation, Université du Maine).
- Tompalski, P., Coops, N. C., White, J. C., Goodbody, T. R., Hennigar, C. R., Wulder, M. A., ... & Woods, M. E. (2021). Estimating changes in forest attributes and enhancing growth projections: a review of existing approaches and future directions using airborne 3D point cloud data. *Current Forestry Reports*, 7, 1-24.
- Trombulak, S. C., & Frissell, C. A. (2000). Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation biology*, 14(1), 18-30.
- Turckheim, B., & Bruciamacchie, M. (2005). *La futaie irrégulière: théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature* (Vol. 286). Saint-Remy-de-Provence: Edisud.
- Vepakomma, U. (2008). Caractérisation spatio-temporelle de la dynamique des trouées et de la réponse de la forêt boréale à l'aide de données lidar multi-temporelles.

Vincent, G., Weissenbacher, E., Sabatier, D., Christophe Proisy, L. B., & Couteron, P. (2008). Détection des variations de structure de peuplements en forêt dense tropicale humide par Lidar aéroporté. *Revue Francaise de Photogrammetrie et de Teledetection*, (191), 42.

Vuitton, R. (2000). *Évaluation de quatre méthodes de photogrammétrie numérique pour la cartographie géologique en région montagnaise*. Institut National de la Recherche Scientifique (Canada).

Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3), 68-82.

Yoshioka, K. (2022). A Tutorial and Review of Automobile Direct ToF LiDAR SoCs: Evolution of Next-Generation LiDARs. *IEICE Transactions on Electronics*, 105(10), 534-543.

## **Rapports**

IGN (2020). État et évolution des forêts françaises métropolitaines. *Indicateurs de gestion durable*.

ONERC (2015). Rapport d'activité de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique.

ONF (2021). Rapport d'activité.

Fransylva (2021). Rapport d'activité des forestiers privés de France

Les Peuplements Forestiers (2008), Direction Départementale des Territoires de Poitou-Charentes.

Rapport CNPF (2023). Centre National de la Propriété Forestière.

Rapport FAO (2015). Evolution des ressources forestières en 2015.

Raport GIEC (2021) - Les bases scientifiques physiques. Résumé à l'intention des décideurs.

Raport GIEC (2022) - Les bases scientifiques physiques. Résumé à l'intention des décideurs.

Rapport PROTEST (2021). PROspective Territoriale Spatialisée.

## **Webographie**

NEOSYLVA (2022), *Les difficultés de gestion en petite forêt privée*. Url - <https://www.neosylva.fr/les-difficultes-de-gestion-en-petite-foret-privee/>

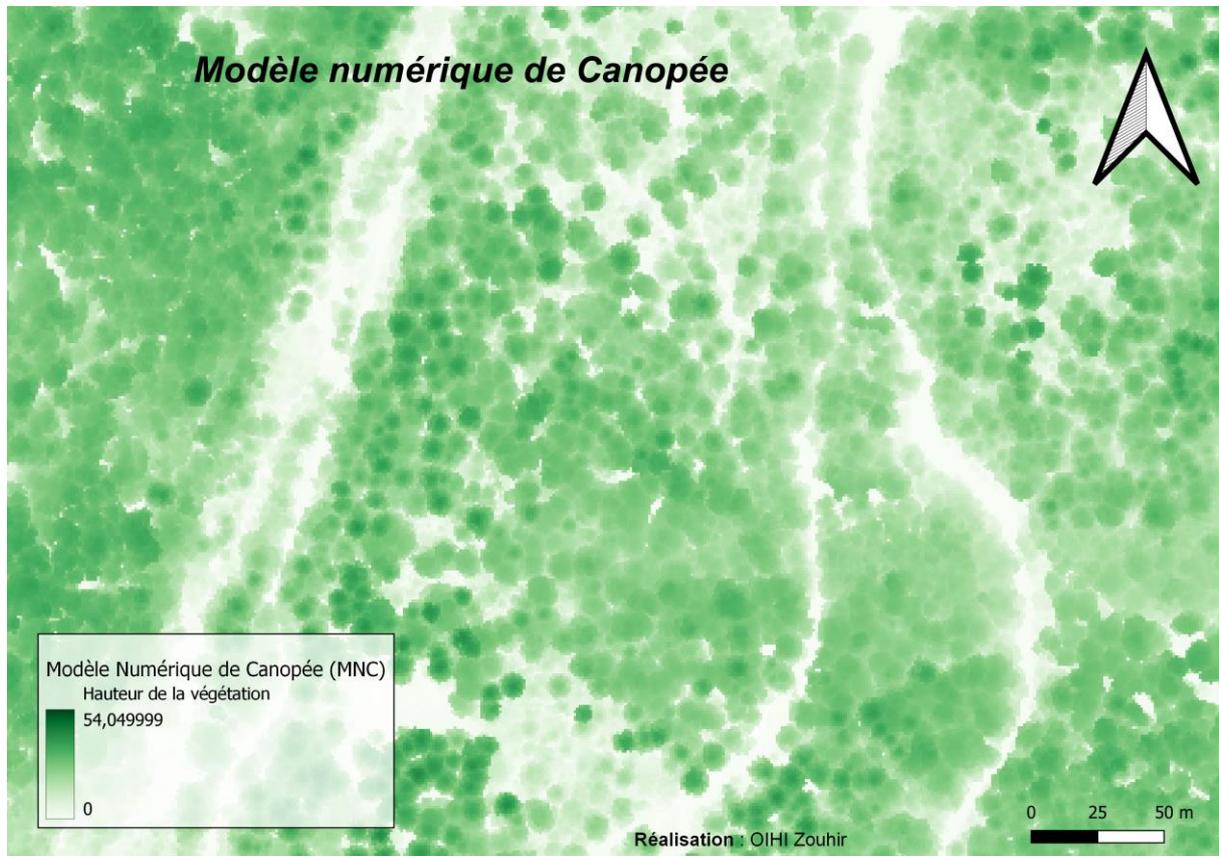
ONT, *Quelles différences entre futaie régulière et irrégulière*. Url - <https://www.onf.fr/onf/+/1167::la-futaie-reguliere-et-irreguliere.html>

OIT, *Le secteur forestier emploie 33 millions de personnes dans le monde*. Url - <https://ilostat ilo.org/fr/forest-sector-employs-33-million-around-the-world-according-to-new-global-estimates/>

WWF, *Vie des forêts*. Ulr - <https://www.wwf.fr/champs-daction/foret>

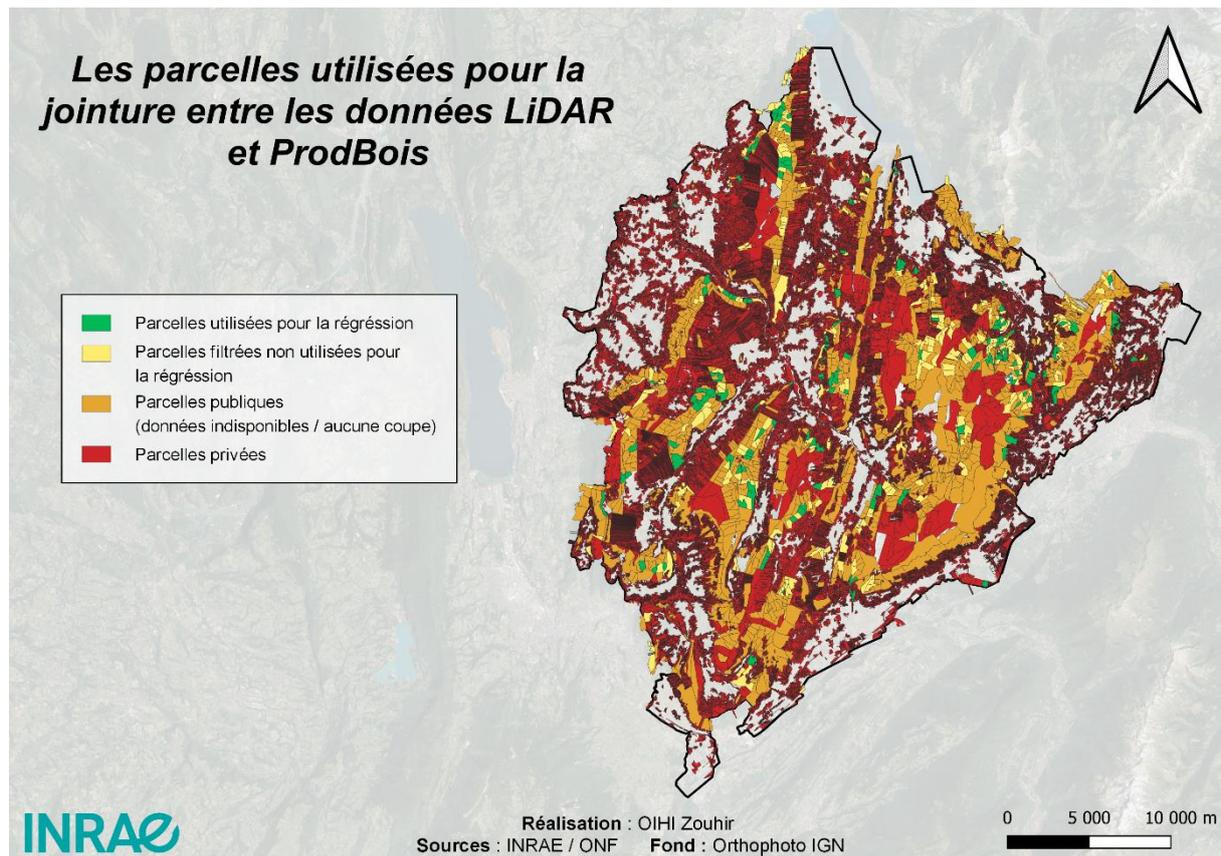
GIEC – Url - <https://www.ipcc.ch/>

## Annexes



**Carte 6** : Illustration du modèle numérique de canopée (MNC)

**Réalisation** : OIHI Zouhir



**Carte 7 :** Parcelles utilisées pour l'étude de corrélation entre variables LiDAR et ProdBois

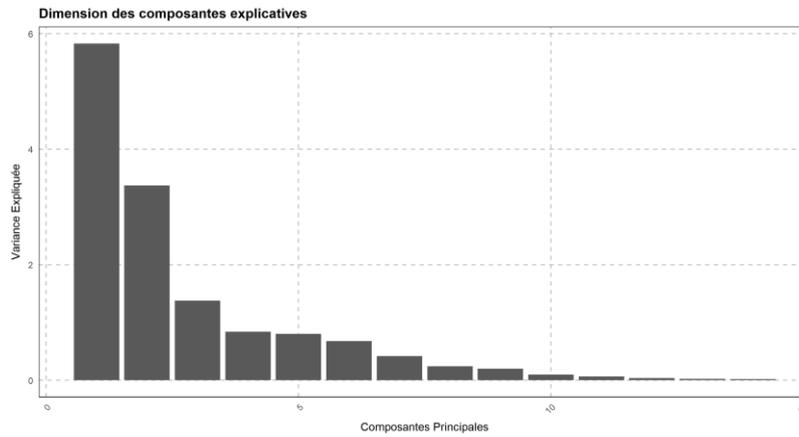
Variable	p.value_Coupe	p.value_Année	p.value_Essence
Arbres_Tra	0.0901409	0.8002833	0.0000014
Coef_coupe	0.1632627	0.5283868	0.5383492
h_dom_C	0.0026445	0.0021090	0.6426196
Ind_coupe1	0.9343665	0.0819819	0.3010083
Ind_dist_c	0.2961602	0.0113447	0.2113354
nb_ar_C	0.4765808	0.0287081	0.4147549
Nb_tiges	0.0002348	0.5104379	0.2418893
P_Pente	0.1173953	0.0171737	0.8551856
pct_bois	0.3224166	0.7691343	0.6909939
pertu_5m	0.9980247	0.0182384	0.5062003
Rte_distan	0.8750087	0.7666793	0.0019356
sur_tot_c	0.6878254	0.0109839	0.4555190
Surface	0.1460566	0.4392866	0.5830795
vCV	0.6843070	0.0052623	0.5733164
Vol_LdR_ha	0.5150083	0.0088536	0.7163653
Vol_Pb_ha	0.0000000	0.0855547	0.1205741

**Tableau 7** – p.value de la première ANOVA

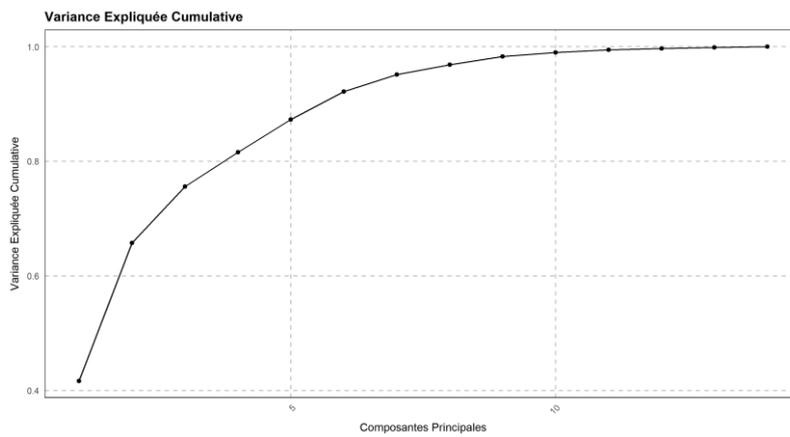
<b>Données</b>	<b>Variable</b>	<b>Description</b>
<b>LiDAR</b>	<i>pertu_5m</i>	Proportion de surface coupée dans la parcelle
	<i>Nb_ar_C</i>	Nombre de tiges coupées
	<i>Nb_ar_V0</i>	Nombre de tiges en 2016 / 2018
	<i>Vol_tot_c</i>	Somme des volumes coupés détectés
	<i>Vol_LdR_ha</i>	Somme des volumes coupés détectés par hectare (normalisation)
	<i>Q9_vol_c</i>	Neuvième quantile du volume détecté coupé (hauteur élevée mais pas maximale)
	<i>Sur_tot_c</i>	Somme des surfaces coupées détectées
	<i>Sur_moy_c</i>	Moyenne des surfaces coupées détectées
	<i>Sur_moy_V0</i>	Moyenne des surfaces détectées en 2016 / 2018
	<i>Sur_moy_VI</i>	Moyenne des surfaces détectées en 2021
	<i>H_dom_c</i>	Hauteur moyenne des dix arbres coupés les plus hauts sur la parcelle
	<i>H_dom_V0</i>	Hauteur moyenne des dix arbres les plus hauts présents en 2016 / 2018 sur la parcelle
	<i>vCV</i>	Coefficient de variation du volume des arbres détectés
	<i>Ind_coupe</i>	Indicateur de de proportion de coupe dans la parcelle par rapport aux arbres non coupés
	<i>Coef_coupe</i>	Coefficient du volume coupé par rapport à sa surface
	<i>Ind_Distance</i>	Distance moyenne entre les arbres dans la parcelle
	<i>Ind_Distance_c</i>	Distance moyenne entre les arbres coupés dans la parcelle
	<i>Coef_ZC</i>	Surface moyenne coupée dans la parcelle
	<i>P_distan</i>	Distance moyenne entre les perturbations de la parcelle
	<b>ProdBois</b>	<i>ccod_frt</i>
<i>UG</i>		Numéro de la parcelle
<i>Vol_tot</i>		Volume total commercial inscrit (houppier + tige)
<i>Vol_Pb_ha</i>		Volume total commercial normalisé à l'hectare
<i>Coupe_Pb</i>		Type de coupe effectué et majoritaire sur la parcelle
<i>Peuple_Pb</i>		Type de peuplement et essence majoritaire sur la parcelle
<i>Exercice</i>		Année de la dernière coupe inscrite
<i>Date_arret</i>		Date d'inscription (martelage)
<i>Date_cloture</i>		Date de fermeture et de coupe effectuée (sauf retards)
<i>G_Tot</i>		Surface terrière totale coupée
<i>Nb_tiges</i>		Nombre de tiges coupées
<i>Id_Commune</i>		Identifiant de la commune
<i>Pente</i>		Pente moyenne sur la parcelle
<b>Autre</b>		<i>P_Pente</i>
	<i>Alti</i>	Altitude moyenne
	<i>Essence</i>	Essence majoritaire dans la parcelle (BD_Forêt)
	<i>ZNIEFF</i>	Parcelle en zone de protection ZNIEFF1
	<i>Dist_rte</i>	Distance moyenne à la route accessible (contourne les zones non accessibles)
	<i>Accès</i>	Moyen d'accès aux forêts de la parcelle
	<i>Boisement</i>	Surface boisée

	<i>Ar_trac</i>	Parcelle accessible par tracteur

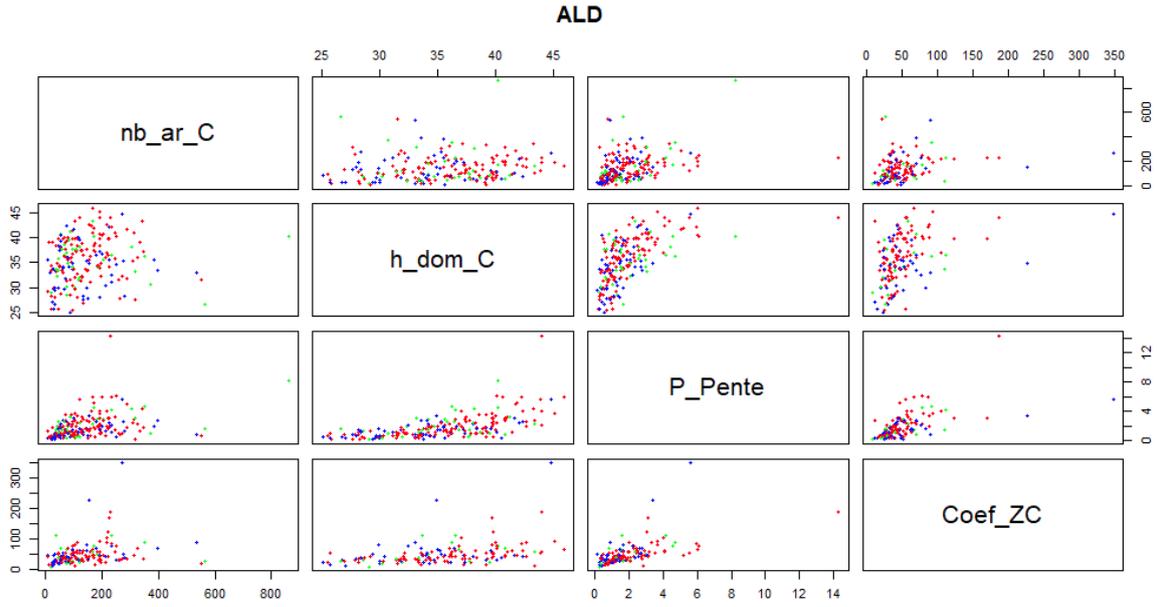
**Tableau 8** - Variables utilisées pour l'analyse des données



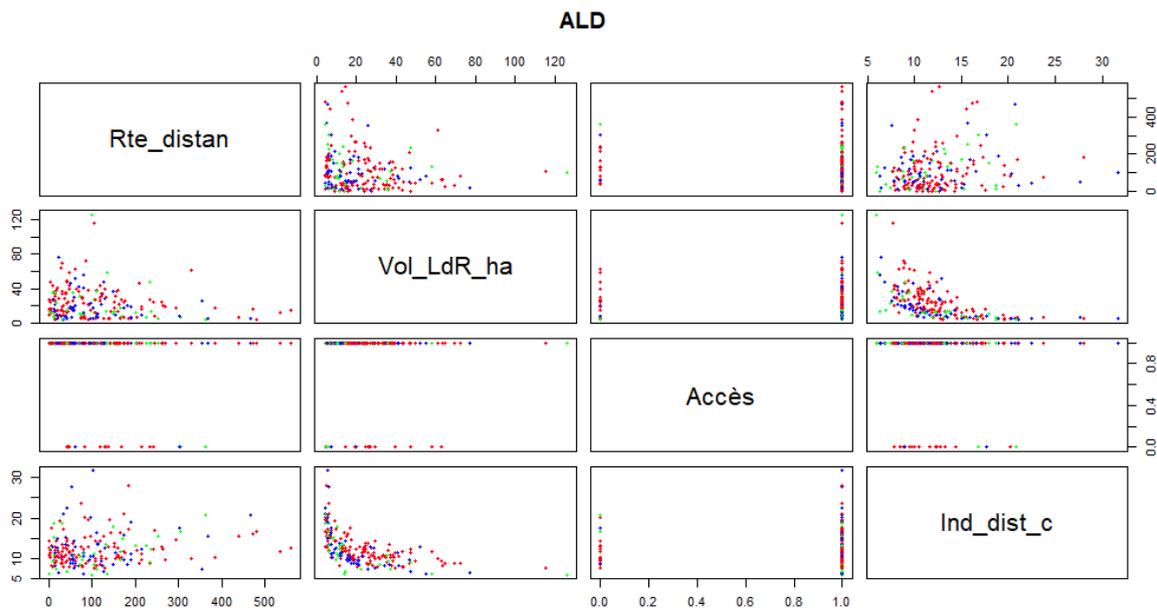
**Figure 17** – Pourcentage d'explication pour chaque dimension de l'ACP



**Figure 18** – Variable expliquée cumulative



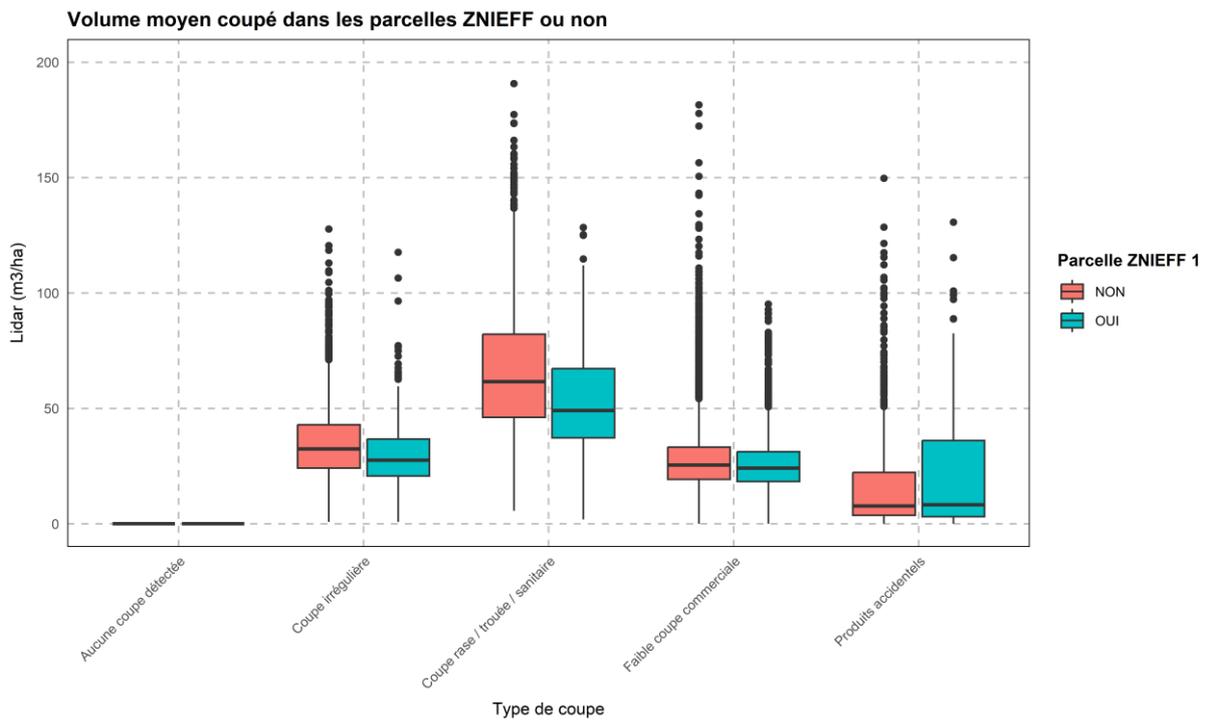
**Figure 19** – ALD des variables en fonction du type de coupe



**Figure 20** – ALD des variables en fonction du type de coupe (2)

Type de coupe	Volume moyen coupé	Volume total prédit coupé (m3)	Pourcentage de coupe (%)
Aucune coupe détectée	0.00000	0.00	0.000000
Coupe irrégulière	133.37754	400932.89	47.102085
Coupe rase / trouée / sanitaire	43.59804	59554.93	6.996586
Faible coupe commerciale	10.35811	347183.14	40.787499
Produits accidentels	39.35706	43528.91	5.113830

*Tableau 9 : Volume moyen et total par type de coupe*



**Figure 21 : Volume coupé et zone protégée (peu de différences)**

Nuage de points avec Lignes de Liaison par type de coupe et par propriétaire forestier

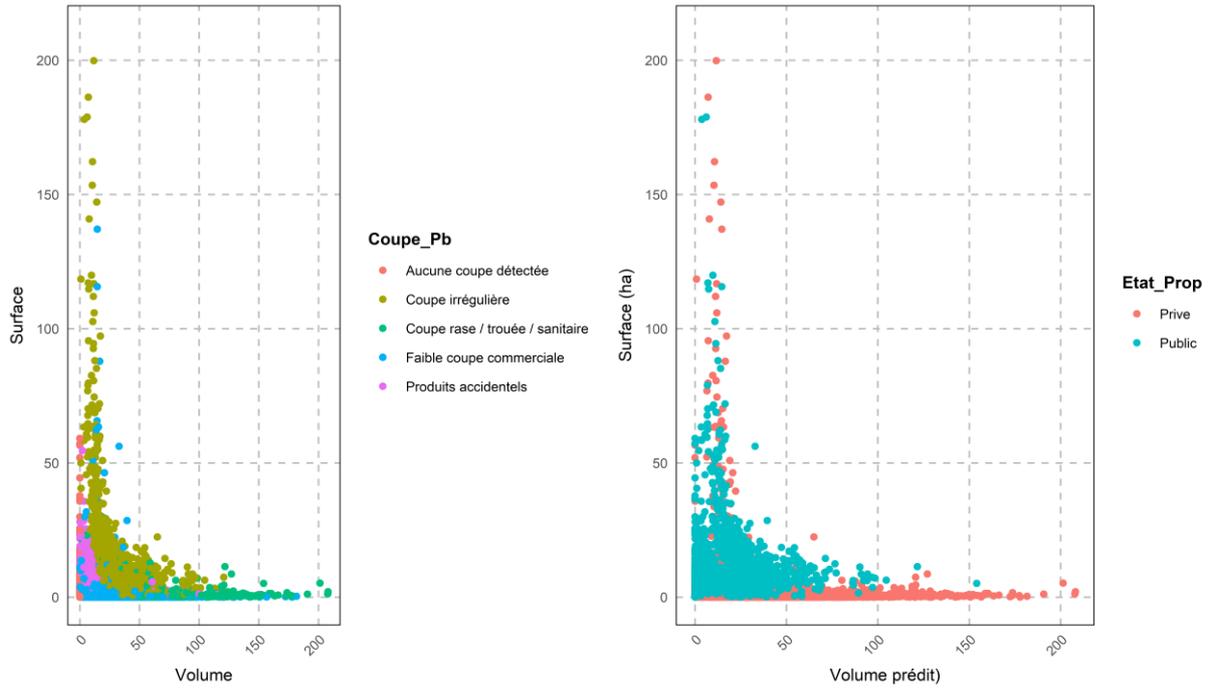


Figure 26 : Volume prédit en fonction de la surface de la parcelle

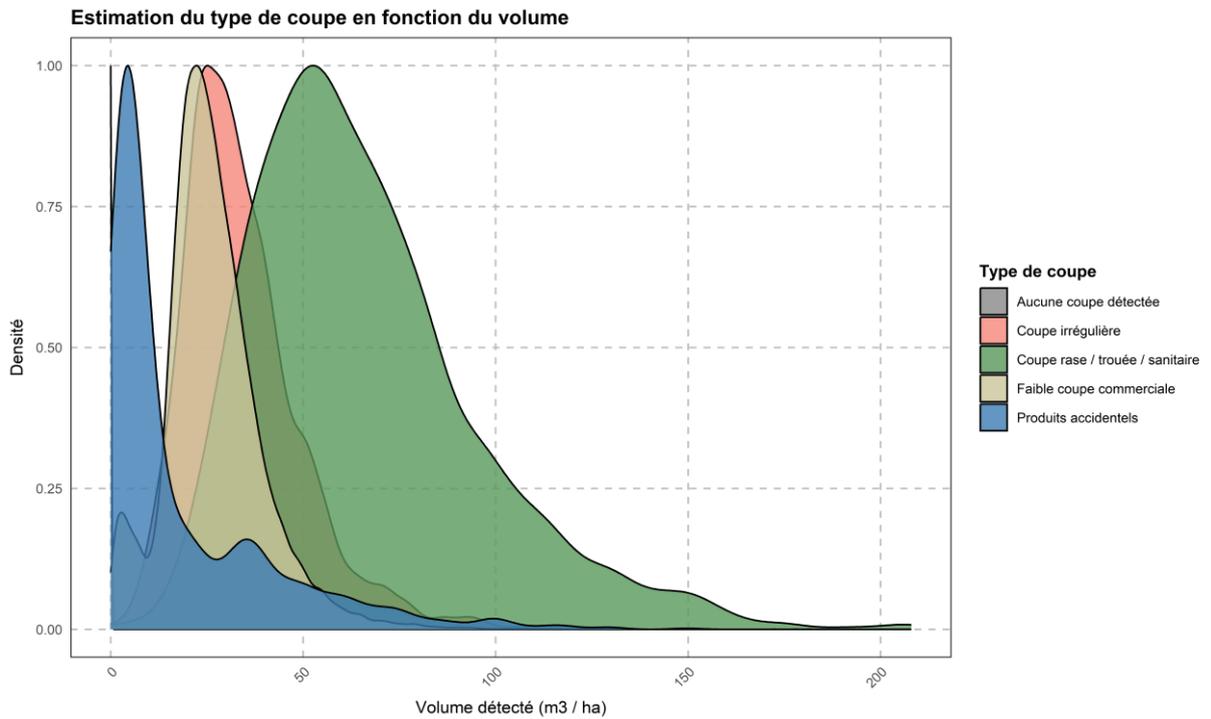


Figure 27 : Estimation du volume en fonction de la densité de chaque type de coupe