

Mémoire de stage

présenté par

Jean-Emilien DALLE

pour obtenir le diplôme

d'Ingénieur Agronome

Sujet : Caractérisation de la ressource bois-énergie à La Réunion : analyse des peuplements d'Acacia Mearnsii

Soutenu publiquement le 27 octobre 2022

à AgroParisTech,
centre de Montpellier

devant le jury suivant :

Dr Philipe DREYFUS

Examineur

Dr François BROUST

Tuteur de stage

Dr Raphael MANLAY

Enseignant-référent AgroParisTech

REMERCIEMENTS

Je remercie François BROUST, mon tuteur de stage, pour le montage du projet et du stage, pour sa bonne humeur, sa confiance et ses conseils qui m'auront permis de passer un stage agréable et enrichissant.

Je remercie Raphael MANLAY pour son encadrement et je remercie Philippe DREYFUS d'avoir accepté la charge d'examineur pour ce mémoire.

Je remercie Jean PREVOST pour son implication dans le projet en particulier dans la phase de terrain, pour sa formidable énergie et pour sa générosité qui aura grandement participé au bon déroulement des mesures en forêts.

Je remercie Thibaud LEGAL pour sa participation à toutes les phases de terrain, pour son soutien et pour son amitié.

Je remercie Abel ETHEVE, Elysé BARBAZA, Léa MARIE, Maelis VIGNES, Cécile et Juliette FOURTET, Léa CHEVALIER, Martin ROUSSEAU, Raphaëlle BALVAY, Sophie GRILLOT, Rubens MANCEAU et Victor THIERRY DE REMBAU pour avoir vaillamment participé à l'inventaire en forêt et animé l'ambiance sur le terrain.

Je remercie Philippe et Pascal pour leur efficacité, leur bienveillance et leur bonne humeur qui aura rendu la période de coupe sûre et agréable.

Je remercie l'ensemble des partenaires de l'ONF, du CIRAD et d'Albioma pour leur participation au projet et l'ensemble des acteurs institutionnel et de la filière rencontrés pour les discussions riches et intéressantes.

Je remercie les collègues du CIRAD Saint-Denis pour l'accueil, le soutien et les bons moments passés.

RESUME

Dans le cadre de sa transition énergétique, la Réunion souhaite développer une filière bois-énergie. L'enjeu est de fournir aux centrales électriques un combustible local et renouvelable en valorisant les forêts de production du département. La principale ressource identifiée est *Acacia Mearnsii*, une espèce exotique envahissante qui s'est propagée aux dépens d'espèces indigènes. L'intérêt de mettre en place une gestion forestière pour ces peuplements est double : maîtriser des peuplements très sensibles au vent et tirer parti d'une espèce à croissance rapide et à densité élevée pour une valorisation énergétique. Le gisement à l'hectare est mal connu en raison de la diversité de structures, d'âge et de densité spécifique des peuplements ; d'un manque de données de terrain fiables ; et d'équations allométriques dédiées. Cette étude a permis d'établir les premières connaissances permettant l'évaluation du volume sur pied pour cette essence. Les coupes et cubages ont permis de modéliser la relation longueur diamètre et d'établir des tarifs de cubages. L'inventaire statistique d'une zone du massif a permis d'estimer le volume sur pied de cette zone et le gisement global dans le domaine public des Hauts sous le Vent à environ 50 000 m³.

ABSTRACT

As part of its energy transition, the Reunion Island wishes to develop a wood-energy sector. The challenge is to provide power plants with a local and renewable fuel by developing the department's production forests. The main resource identified is *Acacia Mearnsii*, an invasive exotic species that has spread at the expense of native species. There are two interests in implementing forest management for these stands: to control stands that are very sensitive to wind and to take advantage of a fast-growing, high-density species for energy conversion. The biomass per hectare is poorly known due to the diversity of structure, age and specific density of the stands; a lack of reliable field data; and dedicated allometric equations. This study provided the first knowledge to evaluate the aboveground biomass of this species. The loggings and cubings allowed to model the length-diameter relationship and to establish cubing rates. The statistical inventory of an area of the area allowed to estimate the standing volume of this area and the global biomass in the public forest of the Hauts sous le Vent at about 50 000 sq m.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	1
RESUME	2
ABSTRACT	2
TABLE DES MATIERES	3
1. INTRODUCTION	7
1.1. Contexte et enjeux	7
1.1.1. Changement climatique et transition énergétique	7
1.1.2. Les forêts : La Réunion et les Hauts Sous le Vent	8
1.1.3. Filière bois énergie et Acacia mearnsii	9
1.2. Acacia mearnsii : revue des connaissances et données	10
1.2.1. à la réunion et dans la zone d'étude	10
1.2.2. Revue des travaux menés à la réunion	11
1.2.3. Acacia mearnsii dans la littérature	12
1.3. Problématique et objectifs du stage	13
2. MATERIEL ET METHODES	14
2.1. Site d'étude	14
2.1.1. Informations spatiales de végétation	14
2.1.2. Informations spatiales pédoclimatiques	15
2.2. Acquisition des données	15
2.2.1. Définition des placettes	16
2.2.1.1 Placettes inventoriées et cubées	16
2.2.1.2 Inventaire statistique	17
2.2.2. Méthode d'inventaire	18
2.2.3. Coupe et cubage	20
2.2.4. Prélèvement d'échantillons	21
2.3. Saisie des données	21
2.4. Traitement des données	22
2.5. Analyse des données	24
2.5.1. Longueur	24
2.5.2. Volume	24
2.5.2.1 Volume individuel	24

2.5.2.2	Volume peuplement	25
2.5.3.	Inventaire statistique	25
2.5.4.	Extrapolation de l'inventaire	25
2.5.5.	Accroissement.....	26
3.	RESULTATS.....	27
3.1.	Résultats issus des placettes cubées	27
3.1.1.	Volume en fonction du diamètre des billons.....	27
3.1.2.	Relation longueur diamètre	27
3.1.2.1	Equation allométrique.....	27
3.1.2.2	Variabilité géographique et par type de peuplement.....	28
3.1.2.3	Autres variables explicatives	29
3.1.3.	Analyse des volumes à l'échelle des individus.....	30
3.1.3.1	Observation des données.....	30
3.1.3.2	Choix et ajustement des modèles	31
3.1.3.3	Validation du modèle	31
3.1.4.	Volume à l'échelle du peuplement	32
3.2.	Résultats de l'inventaire	32
3.2.1.	Zone inventoriée.....	32
3.2.2.	Extrapolation de l'inventaire	33
3.2.2.1	Sélection des zones d'extrapolation.....	33
3.2.2.2	Volume à l'échelle du massif	34
3.2.3.	Estimation de l'accroissement.....	35
4.	DISCUSSION	35
4.1.	Variabilité de la relation longueur diamètre sur le massif	35
4.2.	Comparaison des tarifs de cubage avec la littérature	36
4.3.	Résultat de l'inventaire	37
4.4.	Extrapolation au massif	37
4.5.	Accroissement	37
5.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	39
6.	REFERENCES.....	40
7.	LISTE DES ABREVIATIONS.....	43
8.	TABLE DES TABLEAUX	45
9.	TABLE DES FIGURES.....	47

10. ANNEXES.....	49
TABLE DES ANNEXES	49
Annexe 1 : Liste des espèces inventoriées	49
Annexe 2.1 : Carte illustrant l'âge des peuplement théoriques d'acacia mearnsii	51
Annexe 2.2 : Carte illustrant la donnée spatiale classif_télédec	52
Annexe 3 : Fiches de saisies papier	53
Annexe 4 : Explication du calcul des variables	55
Annexe 5 : Test de l'influence classif_teledec et age_peuplements sur le volume peuplement	56
Annexe 6 : Résultat de l'inventaire selon les différentes classification	57
Annexe 7.1 : Relation longueur diamètre, test du modèle logarithmique	59
Annexe 7.2 : Relation longueur diamètre, test du modèle quadratique	60
Annexe 8 : Résultats des tests statistiques des tarifs de cubages	62
Annexe 9 : Sélection des zones d'extrapolation de l'inventaire et surfaces à l'échelle du massif	66
Annexe 10 : Volume moyen par zone d'extrapolation	68
Annexe 11 : Détail des zones inventoriées	69

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE ET ENJEUX

1.1.1. CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TRANSITION ENERGETIQUE

Face à l'urgence climatique, les lois relatives à la transition énergétique, en particulier les lois Energie-Climat et la loi Climat et Résilience, mettent en place les outils pour répondre aux objectifs de réduction de gaz à effet de serre pris dans le cadre de l'accords de Paris (COP21) et du Pacte vert pour l'Europe. Avec un système énergétique fortement carboné et dépendant de ressources fossiles importées selon la programmation pluriannuelle d'énergie (PPE)(Région Réunion, 2016) et le bilan énergétique 2020 (Gilboire et Turpin, 2021) , l'île de la Réunion est particulièrement concernée par les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

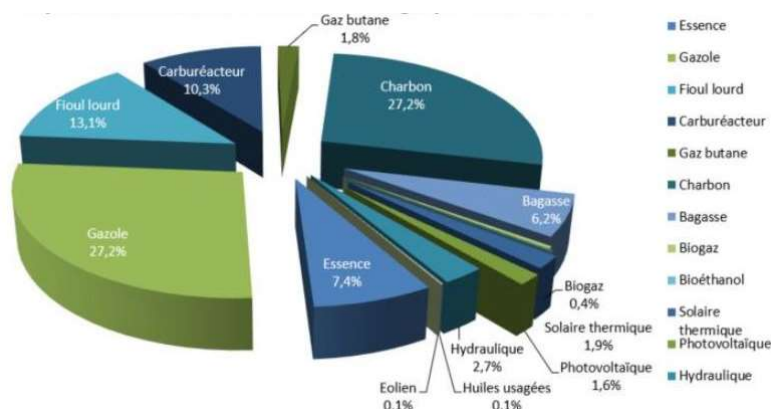


Figure 1 : Répartition des consommations d'énergie primaire à la Réunion en 2020 (%)

D'après la Figure 1, la part des énergies fossiles dans le mix énergétique (énergie primaire) est de 87%. La production d'électricité représenté 45% de l'énergie primaire.

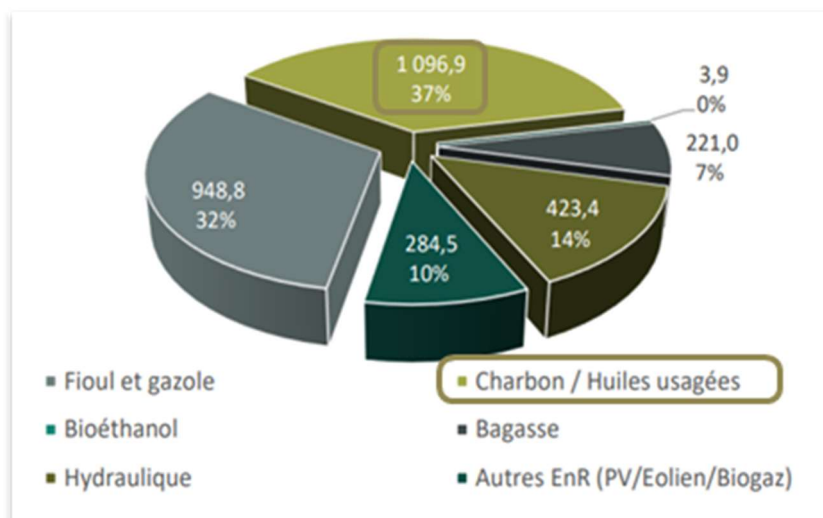


Figure 2 : Production électrique totale par type d'énergie en 2020 à la Réunion (GWh).

Le mix électrique est fortement carboné avec en particulier 37% de l'électricité produite à partir de charbon. Il s'agit d'un enjeu majeur de la transition énergétique à la Réunion. La conversion des deux centrales à charbon de l'île, exploitées par Albioma, vers l'utilisation de biomasse est en cours avec pour objectif un fonctionnement 100% biomasse fin 2023 et une réduction de 84% des émissions de GES (Albioma, 2022). La filière biomasse est aujourd'hui fortement structurée par la bagasse issue de la transformation de la canne à sucre puisqu'elle représente presque 100 % du gisement biomasse valorisé tout en ne contribuant qu'à la production d'environ 10% de l'électricité de l'île.

Le Schéma Régional Biomasses (SRB) fait un état des lieux des gisements en biomasses mobilisables et fixe les objectifs. La transition des centrales thermiques vers des biomasses durables se fera d'abord par l'importation de pellets de bois, mais la mobilisation de biomasses locales représente un enjeu territorial important pour limiter le recours aux pellets importés, dans le respect de la hiérarchisation des usages. Le gisement total annuel en biomasses ligneuses valorisables est estimé à environ 100.000 tonnes. Il est constitué d'environ 80% de bois déchet (déchets verts, élagage, palettes) et 20% de biomasses forestières. Le potentiel mobilisable en biomasses forestières se compose d'environ 10.000 tonnes/an de coproduits liés à l'exploitation forestière et de 5 à 10.000 tonnes/an de coproduits issus de la lutte contre les espèces exotiques envahissantes (EEE). Ce potentiel a été estimé dans une étude de l'ONF (Prevost et Gardette, 2018) qui complète les données du SRB (Région Réunion et Horizon Réunion, 2017) issues d'études antérieures faites par le CIRAD (Audouin, 2016). Ces études identifient l'essence *Acacia mearnsii* comme principale ressource potentielle, dont le gisement et l'exploitabilité doivent cependant être mieux évalués.

Ces objectifs ont été repris dans le Programme Régional de la Forêt et du Bois (PRFB) (Région Réunion *et al.*, 2020) qui établit les orientations de la politique forestière et du développement de la filière bois à la Réunion. La partie suivante propose un bref panorama de la forêt réunionnaise et des enjeux associés.

1.1.2. LES FORETS : LA REUNION ET LES HAUTS SOUS LE VENT

La Forêt réunionnaise joue un rôle important dans le climat, le cycle de l'eau et le contrôle de l'érosion, d'autant que les espaces forestiers et boisés couvrent plus de 130 000 ha, soit plus de la moitié du territoire réunionnais. La forêt publique est prédominante avec les $\frac{3}{4}$ de la surface totale (PRFB). La gestion des 100 000 ha du domaine forestier public est assurée par l'ONF. La forêt privée est assez mal connue en absence de CRPF et d'un inventaire forestier national.

La Réunion héberge 848 espèces indigènes de végétaux vasculaires et présente pour ces espèces une diversité spécifique assez importante pour une île océanique isolée (0.3 espèce au km²) avec un niveau d'endémisme exceptionnel de 26.3% et un taux d'endémisme régional de 45.3% (PRFB). Toutefois, cette richesse floristique est fragile avec un tiers des espèces endémiques considérées en situation précaire par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). La disparition (défrichement, urbanisation, etc.) ou la dégradation (incendies, invasions de plantes exotiques, etc.) de leurs milieux naturels constitue la première cause de régression des espèces végétales réunionnaises. Leur sauvegarde ne peut donc se concevoir sans conservation ou restauration des habitats. La lutte contre les EEE comme *acacia mearnsii* est un enjeu important pour la conservation des espèces endémiques.

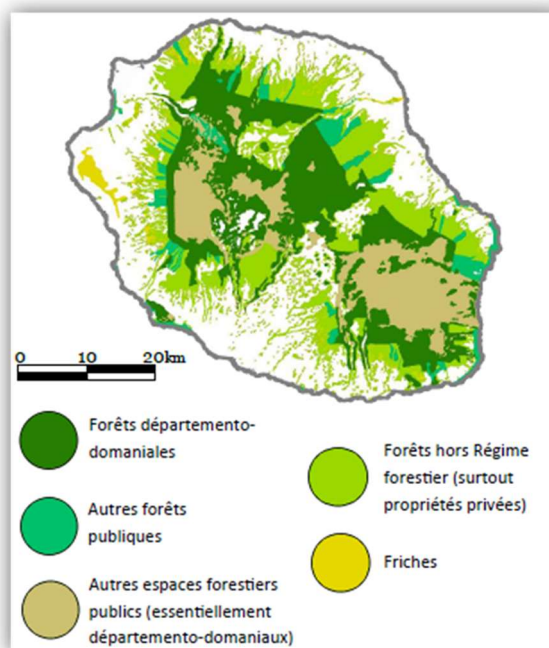


Figure 3 : Cartographie du statut foncier des étendues forestières (source ONF, PRFB)

La forêt des Hauts sous le Vent (HSV) est domaniale, départementale et départemento-domaniale ; elle s'étend sur plus de 6000ha, de 1600 à 2900m. Ce massif forestier présente une grande diversité de peuplements forestiers (exotiques / indigènes) et un continuum d'états de dégradation des espaces naturels en termes de qualité de sols, d'invasions biologiques et de présence d'espèces exotiques envahissantes. Avant invasion, la végétation est partagée entre des forêts plantées de *Cryptoméria Japonica* et des forêts naturelles de bois de couleur dans la partie aval (Ouest) puis des forêts de Tamarin et enfin une strate éricoïde principalement composée de fleur jaune et de branle vert dans la partie amont (Est). La zone est soumise à une invasion forte par des espèces exotiques : *acacia mearnsii*, bringelier marron, passiflore banane (*Passiflora mollissima*), longose (*Hedychium gardnerianum*) et dans la strate éricoïde principalement l'ajonc d'Europe (*Ulex europaeus*). La liste des espèces inventoriées sur la zone d'étude est en annexe 1. Il s'agit d'une zone complexe identifiée à la fois par la proximité de la zone de lutte contre la progression de l'acacia en milieu naturel classé en cœur de Parc National et pour l'étendue de peuplements quasi monospécifiques d'*acacia mearnsii* qui pose un problème de gestion forestière conséquent (Région Réunion et Horizon Réunion, 2017).

1.1.3. FILIERE BOIS ENERGIE ET ACACIA MEARNsii

Ainsi, la création d'une filière bois énergie est à la croisée d'enjeux aussi bien climatiques et énergétiques, qu'en termes de gestion des ressources forestières du département. Afin de répondre à ces enjeux multiples, une convention tripartite a été signée entre le CIRAD, l'ONF et Albioma (industriel de l'énergie, gestionnaire des centrales thermiques bagasse/charbon en cours de conversion à la biomasse). Ce partenariat porte sur 3 thématiques : la caractérisation de la ressource bois énergie disponible, l'expérimentation et la modélisation d'itinéraires techniques sylvicoles et logistiques, et enfin la modélisation et l'évaluation multicritères se scénarios de valorisation et d'organisation (économique, environnementale).

Sur l'ensemble des ressources forestières identifiées, une attention particulière est portée à l'essence *Acacia mearnsii*, qui malgré son potentiel pour des usages bois énergie, est encore mal connue et caractérisée, du fait de son statut d'espèce exotique envahissante et de la diversité de peuplements sur le territoire. Un enjeu fort pour la construction de la filière bois énergie consiste donc à mieux caractériser spatialement la ressource et à évaluer son exploitabilité, notamment dans le massif des Hauts Sous le Vent, qui concentre une grande partie du gisement d'*Acacia mearnsii*.

1.2. ACACIA MEARNsii : REVUE DES CONNAISSANCES ET DONNEES

1.2.1. A LA REUNION ET DANS LA ZONE D'ETUDE

Acacia mearnsii est une espèce originaire d'Australie. Il a servi à la Réunion comme bois de chauffe pour la distillation du géranium rosat, d'où sa large diffusion dans les Hauts de l'île. C'est une essence dédiée à l'usage énergétique, elle est utilisée pour la fabrication de charbon de bois. *Acacia mearnsii* est classé à la Réunion comme espèce exotique envahissante (PRFB). C'est une plante opportuniste qui s'installe de manière dominante à la faveur des incendies ou des défrichements, qu'il est pratiquement impossible d'éliminer, faisant concurrence au tamarin ou aux bois de couleur. Son implantation volontaire est proscrite et incompatible avec les aides des mesures agro-environnementales (MAE). Sa sylviculture est assimilée à celle d'un taillis, même si après la coupe ce sont les graines présentes dans le sol qui donnent le nouveau peuplement et non des rejets de souches (Prevost et Gardette, 2018).



Figure 4 : Inflorescence (à droite) et peuplement (à gauche) d'*acacia mearnsii* dans les Hauts sous le vent (photos personnelles)

Le faible intérêt biologique des peuplements d'acacias a été mis en évidence par Tassin (2004) qui invitait à lutter contre son extension en milieu agricole. Avec une possibilité de recolonisation et une biodiversité intrinsèque très faible, il montre qu'il est absolument

nécessaire de lutter contre l'extension de la surface en *acacia mearnsii* qui conduit à un appauvrissement de la biodiversité. Aujourd'hui, *acacia mearnsii* s'est étendu en milieu naturel forestier en profitant notamment d'incendies en 2010 et 2011 dans la forêt des hauts sous le vent avec une surface évaluée à 800ha en 2020 (Bley-Dalouman *et al.*, 2021).

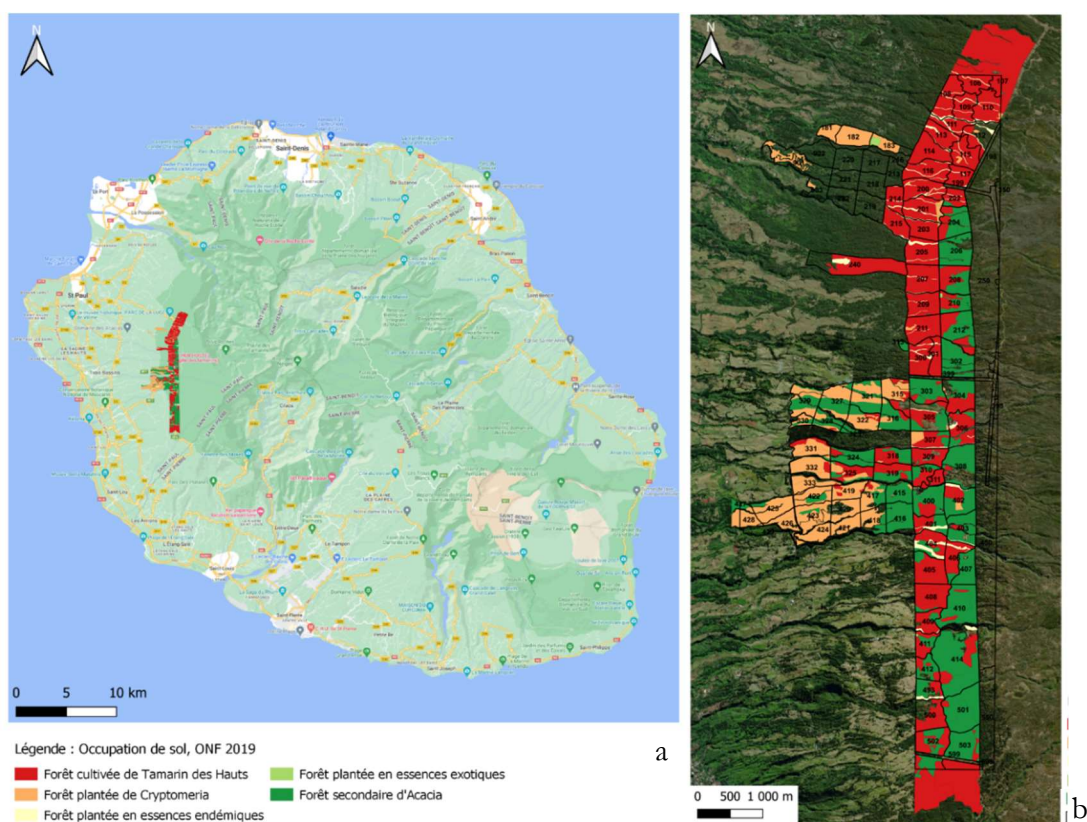


Figure 5 : Carte de la zone d'étude du projet à l'échelle de l'île de la Réunion et de la zone d'étude. Fond (a : fond Open streetmap, b : ESRI World Imagery) Légende : Végétation, ONF 2019.

1.2.2. REVUE DES TRAVAUX MENES A LA REUNION

En terme de cartographie, les premiers travaux ont été menés par le CIRAD (synthèse de Audouin, 2016). Les inventaires des peuplements d'*Acacia mearnsii* réalisés par J. Tassin en 2002 ont été complétés par Hauville (2007) à partir de photos aériennes de 2003, puis par de nouveaux inventaires réalisés par l'ONF en 2012 suite aux incendies de 2011.

Plus récemment la répartition l'acacia a été étudiée par l'ONF (Giovannini, 2017) avec une méthode par transect permettant d'affiner la cartographie de l'acacia et de faire une première caractérisation de l'exploitabilité des peuplements des Hauts de l'Ouest. Il fait état de la difficulté d'évaluation de la ressource mais propose une typologie, en trois catégories, dépendant du diamètre pour l'estimation du volume sur pied. La cartographie spatiale de l'acacia de l'ONF présentée en Figure 5 est issue de photo-interprétation, de relevés terrains et des travaux de (Giovannini, 2017).

Ensuite, (Bley-Dalouman *et al.*, 2021) a proposé une cartographie du couvert forestier par une approche de télédétection (classification supervisée) à partir d'une image satellite haute définition de 2020. Deux types de peuplement d'acacia ont été identifiés par l'autrice suite à des relevés terrain, les peuplements matures, du fait de l'enchevêtrement constaté sur le terrain, notés AcM-2 et des peuplements jeunes notés AcM-1. Dans le même temps,

(Veyssiere, 2021) a étudié l'évolution des peuplements d'acacia grâce aux indices NDVI¹ et a mis en évidence la corrélation entre les peuplements d'acacias présents et les zones incendiées en 2010 et 2011.

La localisation de la ressource faite par télédétection est désormais relativement bien établie dans le domaine public des Hauts sous le Vent même si la richesse spécifique en acacia n'est pas connue. En revanche, l'estimation de la biomasse aérienne reste encore fondée sur des hypothèses très empiriques. Une filière artisanale d'exploitation d'acacia mearnsii pour le bois de feu et le charbon existe mais elle exploite des surfaces et des volumes assez faibles, environ 500 m³/an. Elle ne donne pas d'éléments vraiment fiables quant à l'évaluation du gisement à l'hectare. Le gisement potentiel a été étudié à l'échelle des forêts publiques de la Réunion en 2014 dans le cadre du SRB puis en 2018 par l'ONF (Prevost et Gardette, 2018). Le volume disponible annuellement en acacia mearnsii est estimé à 3.200 m³/an avec une rotation de 15 ans. L'étude avance une quantité deux à trois fois plus importante en domaine privé. Toutefois, le volume à l'hectare est encore mal estimé en raison de la diversité des formations forestières (monospécifiques ou mixité, maturités et structures très variables des peuplements) et d'un manque de données fiables de terrain et d'équations allométriques dédiées.

1.2.3. ACACIA MEARNSII DANS LA LITTÉRATURE

Globalement, acacia mearnsii a fait l'objet de nombreuses études visant à caractériser le potentiel de production de tannins ou d'autres part à comprendre son fonctionnement écologique (Crous *et al.*, 2012; São José *et al.*, 2019) et sa réaction à diverses méthodes de contrôle (Mukwada et Manatsa, 2017; Muvengwi *et al.*, 2018). D'autres études s'intéressent à la productivité de plantations d'acacia mearnsii. Enfin, 3 études donnent des éléments sur la construction d'équations allométriques et des références de prévision du volume en fonction de variables dendrométriques classiques. D'abord, Dudley et Fownes (1992) s'intéressent à 8 espèces de production de bois en rotation courte à Hawaï. Ils rapportent l'absence de référentiel déjà publié pour acacia mearnsii et propose une équation de détermination de la biomasse dépendant du diamètre. Ensuite, (Dovey, 2005) propose une étude beaucoup plus complète sur acacia mearnsii en Afrique du Sud avec plusieurs âges de peuplement et trois sites distincts. Il propose des équations allométriques pour les différentes parties aériennes de l'arbre ainsi que les teneurs en différents éléments nutritifs. Enfin, (Luo *et al.*, 2020) font une revue d'un grand nombre d'équations allométriques produites et publiées pour la plupart en Chine. Pour acacia mearnsii, il s'agit d'une plantation de 3 à 4 ans dans la province du Zhejiang. Une synthèse des équations allométriques proposées dans la bibliographie et retenues est présentée ci-dessous.

¹ Indice de végétation par différence normalisée

Etude	Compartiment Biomasse (kg)	Variable prédictives	Forme d'équation	Coeff. a	Coeff. b	Coeff. c	R ²	R	Plage diamètre (cm)	Plage de Hauteur (m)
(Luo et al., 2020)	Ecorce du tronc	D, H	$\lg(W)=a+b*\lg(D^2*H)$	-1,9485	0,8112	/	/	0,9967	4,4/8,8	5,8/9,7
(Luo et al., 2020)	Total tronc	D, H	$\lg(W)=a+b*\lg(D^2*H)$	-1,3664	0,8952	/	/	0,9974	4,4/8,8	5,8/9,7
(Luo et al., 2020)	Total branches	D, H	$\lg(W)=a+b*\lg(D^2*H)$	-1,8389	0,8572	/	/	0,9026	4,4/8,8	5,8/9,7
(Luo et al., 2020)	Total feuilles	D	$\lg(W)=a+b*\lg(D)$	-0,8350205817	1,3444	/	/	0,8048	4,4/8,8	/
(Luo et al., 2020)	Total aérien	D	$\lg(W)=a+b*\lg(D)$	-0,7445680745	2,268	/	/	0,9935	4,4/8,8	/
(Dudley et Fownes, 1992)	Total aérien	D	$\ln(B) = c + b \ln(D)$ $B = a*(D)^b$	0,0639	2,729	-2,863	0,97	/	1,5/8,6	/
(Dovey, 2005)	Total aérien	D	$B = a*(D)^b$	0,1126	2,5691		0,94	/	/	5/23,3

Tableau 1 : Synthèses des équations de calcul de biomasse décrites dans la bibliographie. La biomasse notée B ou W est exprimée en kgMS, le diamètre D en cm et la hauteur H en m.

On constate que la forme des équations adoptées est très classique avec une régression linéaire entre des données log transformées. Le diamètre est la seule variable explicative de la biomasse utilisée. En effet, (Dovey, 2005) et (Dudley et Fownes, 1992) ont montré que la hauteur n'est pas significative dans la détermination de la biomasse aérienne pour cette espèce et dans les conditions de leurs études.

1.3. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DU STAGE

A l'appui de l'analyse contextuelle et bibliographique il ressort que les peuplements d'*Acacia mearnsii* sont désormais assez bien localisés spatialement, notamment sur le domaine public des Hauts Sous le Vent, mais qu'en revanche le gisement en bois énergie est encore très difficile à prédire aussi bien à l'échelle de la parcelle que du massif, en raison (i) de la diversité des formations forestières constatées sur la zone d'étude (monospécifiques ou mixité, maturités et structures très variables des peuplements) ; (ii) d'un manque d'équations allométriques spécifiques à *Acacia mearnsii* et transposables au contexte de La Réunion.

Face à ce constat, le CIRAD porte un projet de recherche finalisée en partenariat avec l'ONF et financé par l'ADEME Réunion, dont l'objectif global est de contribuer à une meilleure évaluation qualitative et quantitative du gisement bois énergie associé à *Acacia mearnsii*. Ce projet de deux ans comprend trois phases qui visent respectivement à (i) acquérir de nouvelles données qualitatives (inventaires) et quantitatives (volume de bois) par des relevés terrain ; (ii) explorer le potentiel du LiDAR² / drone en vue d'une première ébauche de modèles prédictifs permettant d'évaluer la variabilité du volume de bois à l'échelle du massif ; (iii) évaluer la qualité et la variabilité des propriétés du bois comme biocombustible.

Ce stage de fin d'étude s'inscrit dans la première partie du projet, centrée sur l'acquisition et la valorisation des données terrain. La problématique scientifique consistera d'une part à étudier les relations entre variables dendrométriques à l'échelle de peuplements homogènes pour une espèce encore peu documentée, et d'autre part à explorer les facteurs de variabilité de ces relations à l'échelle d'un massif forestier. Suite aux premières constatations sur le

² (Light Detection and Ranging), c'est une méthode de télédétection et de télémétrie qui émet des impulsions de lumière infrarouge puis en mesure le temps de retour après avoir été réfléchies sur des objets à proximité.

terrain, nous faisons l'hypothèse d'une typologie de peuplements organisée selon l'âge et le degré d'enchevêtrement.

D'autre part, le stage avait également des objectifs plus opérationnels, notamment en termes de cadrage méthodologique et de coordination de la campagne terrain avec les autres équipes impliquées dans le projet (couverture drone, inventaires, coupes, cubage).

Aussi, les objectifs spécifiques fixés pour le stage consisteront à

- Ajuster une méthode d'inventaire aux caractéristiques des peuplements ;
- Acquérir des données d'inventaire sur différents peuplements d'acacia représentatifs du massif et créer une base de données mutualisée pour les besoins du stage, mais aussi des autres besoins du projet ;
- Valoriser les données collectées en proposant des équations allométriques à l'échelle de peuplements homogènes, et faire une première estimation du volume sur pied à l'échelle de la zone inventoriée et du massif.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. SITE D'ETUDE

La zone d'étude du projet se situe dans l'Ouest de l'île de la Réunion qui appartient à l'archipel des Mascareignes, à l'Ouest de l'Océan Indien et à l'Est de l'île de Madagascar. Elle se situe dans les Hauts de Saint Paul et de Saint-Leu, autour de 1500m d'altitude et se caractérise par une pluviosité d'environ 1200mm/an et une très forte nébulosité.

2.1.1. INFORMATIONS SPATIALES DE VEGETATION

Pour l'essence *acacia mearnsii*, aucune donnée d'inventaire ou d'exploitation n'est disponible. En revanche, un premier travail a consisté à réaliser une synthèse des éléments cartographiques afin d'orienter le protocole, la sélection des placettes de cubage et la zone de couverture LIDAR.

Nous avons utilisé les données spatiales de végétation à l'échelle de la réunion fournis par l'ONF notées `veg_onf`. La présence d'acacia est marquée par deux types : « Forêt secondaire d'acacia mearnsii » et « forêt de tamarin des hauts en mélange avec acacia mearnsii ». Il n'y a pas d'indications sur l'âge, le diamètre moyen ou le degré d'enchevêtrement des peuplements d'acacia.

Nous avons utilisé la classification à partir d'une image haute résolution issue de (Bley-Dalouman *et al.*, 2021), notée `classif_teledec` et illustrée en annexe 2.2. L'approche est différente car l'échelle est de l'ordre de la dizaine à la centaine de mètres carré. *Acacia mearnsii* est classé en deux types suivant l'âge et l'enchevêtrement, AcM-1 regroupe l'acacia jeune et AcM-2 l'acacia plus vieux et couché. Cette donnée spatiale est intéressante car elle permet en théorie de connaître la taille réelle du peuplement à une échelle fine grâce à la détection des trouées. En pratique, et avec une connaissance de la réalité du terrain très partielle, on estime que ces résultats sont assez fiables à l'échelle de la parcelle et donnent

une bonne indication de la répartition globale de l'acacia dans le massif mais moins à l'échelle de l'objet de classification en raison de confusions assez nombreuses entre types de végétation. Le croisement de ces deux données a permis de déterminer des zones de présence probable.

A partir d'une succession temporelle d'images satellites visualisées via google earth, nous avons pu créer une information spatiale sur l'âge théorique des peuplements d'acacia par datation des incendies et des coupes, généralement réalisées par des équipes de bûcherons-charbonniers, qui ont pu être détectées (Annexe 2.1). Sur une grande partie des zones d'acacia probable, nous avons obtenu un âge théorique de peuplement. C'est une information limitée par deux aspects. D'une part, suite à un incendie, nous ne sommes ni capables de visualiser si les espèces en place survivent et dans quelle mesure, ni quelle est la dynamique d'invasion, en matière de vitesse de germination, et d'espèce (acacia, fougère aigle, autre). D'autre part, les coupes sont considérées comme des coupes rases alors que, en pratique, il est possible que quelques arbres ne soient pas exploités, en particulier dans les jeunes tiges. L'âge théorique peut donc différer légèrement de l'âge réel et cet âge n'est valable que si un peuplement d'acacia est effectivement présent.

A partir de ces informations spatiales et de repérages terrain, nous avons pu déterminer les zones d'intérêt pour les expérimentations.

2.1.2. INFORMATIONS SPATIALES PEDOCLIMATIQUES

Les variables pédoclimatiques de la placette sont obtenues à partir des données spatiales ci-dessous.

- Cartes de pédologie (Raunet, 1991)
- Carte de précipitations médianes annuelles entre 1986 et 2006. CIRAD
- Carte de température moyenne. CIRAD

2.2. ACQUISITION DES DONNEES

Grâce aux données spatiales, nous avons sélectionné un ensemble de zones qui présente à la fois une diversité en termes d'âge et d'état d'enchevêtrement des peuplements, mais aussi en termes de mélange d'essences. Le schéma en Figure 6 présente la logique de sélection des zones puis des placettes.

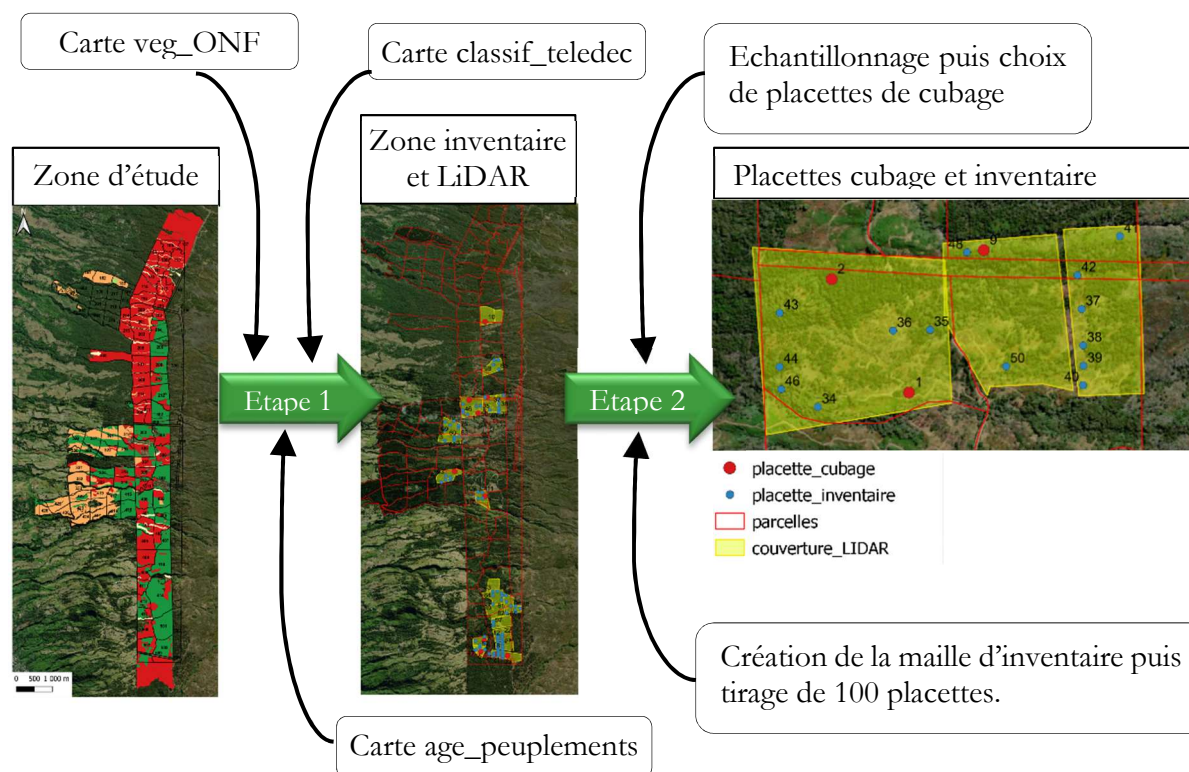


Figure 6 : Schéma conceptuel de sélection de la zone inventoriée et couverte par LiDAR.

Nous avons fixé l'ordre de priorité des zones à couvrir par l'équipe drone/LiDAR afin d'optimiser l'acquisition de connaissances sur les différents types de peuplements d'acacia présents dans le massif. Une surface de 200ha a finalement été couverte à l'issue de la campagne de vols de 10 jours. A partir de cette surface, nous avons sélectionné les placettes de cubages et réalisé un inventaire statistique.

2.2.1. DEFINITION DES PLACETTES

2.2.1.1 Placettes inventoriées et cubées

Nous avons choisi de réaliser un échantillonnage par placette d'abord pour une question de mise en œuvre lié à la structure très dense et difficile d'accès des peuplements d'acacia, et afin de mesurer un volume peuplement ($V_{\text{peup mesuré}}$) permettant de vérifier les tarifs individuels. Dix placettes ont été choisies à partir des données cartographiques présentées en 2.1.1 dans le but de couvrir la diversité des peuplements d'acacia *mearnsii* et des zones géographiques du massif. Nous avons choisi deux placettes dans des peuplements dits « jeunes et droits » (3 et 6 ans) avec un diamètre moyen inférieur à 5 cm ; 5 placettes dans des peuplements dits « matures droits » d'une dizaine d'années et de diamètre moyen entre 6 et 7 cm ; 2 placettes en peuplement dits « matures couchés », d'âge assez proche mais avec une proportion importante d'arbres penchés suite au cyclone Batsirai (février 2022) et enfin 1 placette en peuplement très enchevêtré d'environ 20 ans. Le type mature droit est sur représenté car les données du volume individuel réel seront plus facilement exploitables par la méthode LiDAR pour des arbres assez droits et car il s'agit du type de peuplement idéal pour l'exploitation. Nous avons ventilé le plus régulièrement possible les placettes dans les différentes zones.

Id placette	Type peuplement	Zone
1	Jeune droit	1

2	Mature droit	1
3	Jeune droit	2
4	Mature couche	2
5	Mature droit	2
6	Mature droit	2
7	Mature droit	3
8	Mature droit	3
9	Mature couche	1
10	Mature enchevêtré	4

Tableau 2 : Caractéristiques des placettes cubées.

Les placettes choisies sont situées dans des peuplements homogènes en termes de densité, d'âge et d'inclinaison des arbres. La taille des placettes est de 10m de rayon sauf pour les placettes 1 et 3 choisies présentant une grande densité de tige, pour lesquels nous avons réduit le rayon à 5 mètres.

La placette 10 n'a pas pu être inventoriée du fait de la structure très enchevêtrée et impénétrable du peuplement.

2.2.1.2 Inventaire statistique

L'objectif est de 100 placettes et la surface d'inventaire de 200ha. Nous n'avons pas stratifié l'inventaire par manque de données sur la composition réelle des zones et du fait de la forte variabilité à une échelle spatiale réduite que l'on a constaté en forêt.

Aucun coefficient de variation n'est disponible dans la littérature pour cette espèce, en particulier dans ce contexte, pour estimer le nombre de placettes à réaliser en fonction de l'erreur d'échantillonnage maximale souhaitée. Nous avons choisi une maille de 2 placettes/ha puis nous avons fait une sélection aléatoire de 100 placettes. Cette méthode laisse la possibilité de compléter l'inventaire en cas d'erreur trop importante tout en respectant la même maille. Pour la taille des placettes, la densité de tige aurait permis de faire des placettes plus petites mais nous avons convenu de conserver un rayon de 10 m pour faciliter la valorisation des données LiDAR.

Dans l'objectif d'estimer plus précisément un volume sur une surface plus faible et pour vérifier si la maille de 2 placettes/ha est suffisante pour des inventaires futurs, nous avons inventorié l'ensemble des placettes de la maille sur une surface de 10 ha, considérée comme représentative des peuplements d'*acacia mearnsii*, soit 20 placettes.

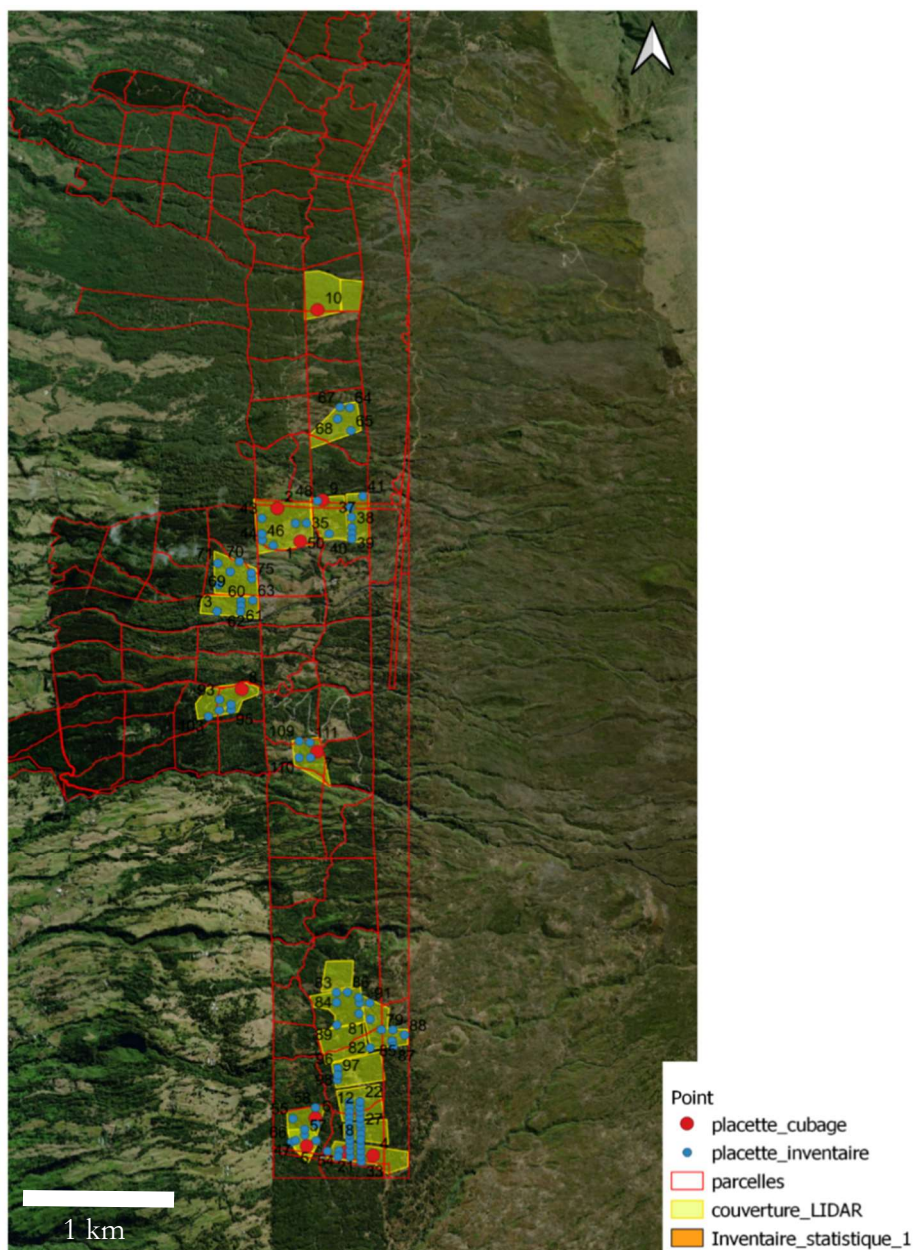


Figure 7 : Illustration de la zone d'étude et des placettes réalisées. Fond ESRI World Imagery

Pour l'inventaire statistique, nous avons travaillé en équipe de trois personnes pendant deux semaines. Les personnes volontaires du CIRAD et de l'ONF ont été mobilisées en fonction de leur volonté et de leur disponibilité. Le sondage et l'organisation du calendrier a été réaliser sur cally.com.

2.2.2. METHODE D'INVENTAIRE

Deux phases d'inventaires ont été menées, l'inventaire préalable sur les placettes cubées et l'inventaire statistique.

Les variables relatives à l'arbre et les paramètres relatifs à la placette sont présentés en Tableau 3 et Tableau 4.

Paramètres de la placette	Placettes cubées	Inventaire statistique
---------------------------	------------------	------------------------

Position GPS	✓	✓
Hauteur moyenne	✓	✗
Index d'arbres dominants	Sélection des 2 arbres les plus gros.	Sélection de trois arbres dominants
Index arbres échantillonnés pour cubage individuel	✓	✗

Tableau 3 : Paramètres mesurés lors de l'inventaire préalable de cubage et l'inventaire statistique

Variable	Placettes cubées	Inventaire statistique
Position relative	✓	Seulement pour 3 arbres dominants
Diamètre	✓	✓
Essence	✓	✓
Longueur	✓	Seulement pour 3 arbres dominants
Classe d'inclinaison	✓	✓

Tableau 4 : Variables mesurées lors de l'inventaire préalable au cubage et lors de l'inventaire statistique

Les paramètres de la placette sont obtenus de la façon suivante :

- Position GPS mesurée avec une précision centimétrique grâce à un GPS RTK. C'est capital pour la valorisation LIDAR des données dans la suite du projet.
- Hauteur moyenne du peuplement estimée sur le terrain.
- Choix de 2 arbres dominants d'un point de vue du diamètre.
- Choix d'un arbre par classe de diamètre pour les placettes cubées. La stratégie d'échantillonnage des arbres qui ont été cubés séparément a été établie en considérant que l'on ne connaissait pas par avance la forme des équations allométriques ni le diagramme des classes présentent sur le massif. Ainsi, le plan d'échantillonnage prévoit de mesurer 1 arbre pour chaque classe de diamètre (5cm) représenté sur chaque placette. Les arbres de diamètre important sont donc sur-représentés pour compenser l'augmentation de la variabilité généralement constatée avec l'augmentation de diamètre. 36 arbres ont été mesurés.

Les variables mesurées par arbres sont obtenues ainsi :

- Position relative par rapport au centre de la placette obtenue par combinaison de la distance mesurée par dendromètre à ultrasons VERTEX et de l'azimut mesuré à la boussole SUNTO.

- Diamètre mesuré à 1,3m du pied de l'arbre quel que soit l'inclinaison à l'aide d'un compas forestier. Le diamètre de précomptage est de 2cm et la précision est centimétrique.
- Longueur mesurée au VERTEX ou estimée à vue. La précision des deux méthodes est estimée à 1m du fait des inclinaisons parfois importantes des arbres.
- Essence, notée selon la nomenclature EPPO, la liste d'espèce inventoriée est présente en annexe 1.
- Classe d'inclinaison définie comme ceci : 1 : 90-75°, 2 : 75-45°, 3 : 45-20°, 4 : 20-0°, 5 : cassé



Figure 8 : Illustration de l'inventaire préalable sur la placette 6 (Photo personnelle)

Le cheminement a été dirigé par GPS sur tablette Pc ou Android et smartphone via l'application Qfield ou Qgis.

2.2.3. COUPE ET CUBAGE

Pour la coupe, une équipe de deux bucherons de l'agence travaux de l'ONF a été mobilisée. Il s'agissait d'une coupe systématique de tous les arbres pour les raisons évoquées précédemment. En simultané de la coupe, nous avons réalisé une mesure de la longueur réelle d'un maximum d'arbres de diamètre supérieur à 5cm afin de vérifier la méthode de l'inventaire. Cette mesure a été réalisée à l'aide d'un décamètre de bucheron.

Les arbres ont été tronçonnés en billons d'environ 2 m et les branches de moins de 2 cm écartées avec l'hypothèse que celles-ci représentent une proportion très faible de la biomasse aérienne.

Nous avons mesuré dans un second temps la longueur et le diamètre médian de chaque billon de façon à estimer le volume par classe de diamètre (1 cm). Les arbres sélectionnés lors de l'inventaire ont été cubés séparément lors de la coupe.



Figure 9 : Coupe le placette 10 (photo personnelle).

La placette 10 illustrée en Figure 9 a été cubée selon le même protocole mais l'échantillonnage et le cubage séparé de certains arbres n'étaient pas envisageables. La coupe et le cubage ont été faits en comptabilisant tout le bois présent dans la surface de la placette.

2.2.4. PRELEVEMENT D'ÉCHANTILLONS

Le prélèvement d'échantillons nécessaire aux mesures de densité et de PCI a été réalisé à l'aide d'une tronçonneuse.



Figure 10 : Prélèvement d'échantillons de bois (photographie personnelle)

2.3. SAISIE DES DONNEES

Les données des placettes cubées ont été saisies sur fiche papier (annexe 3). Ensuite, les données ont été saisies et compilées sous la forme de deux tableaux de données, le premier avec une ligne par placette et le second avec une ligne par arbre.

Les données de l'inventaire ont été saisies de manière informatique. Deux méthodes ont été testées, un classeur Excel avec un méthode de saisie automatisé grâce à des boutons créés par VBA et un formulaire de saisie KoBocollect. Le formulaire de saisie KoBocollect a finalement été privilégié pour sa facilité d'utilisation et son faible risque d'erreur de saisie. La saisie et l'enregistrement se fait hors connexion puis il y a une centralisation des données quel que soit l'appareil de saisie. Le format de tableau est le même que pour les placettes cubées de sorte à pouvoir ajouter les données lorsque les variables ont été mesurées.

2.4. TRAITEMENT DES DONNEES

La base de données comprend donc un tableau par arbre et un par placette. Le tableau par arbre compte 18 variables pour 6328 individus. Les variables sont présentées ci-dessous.

ID VARIABLE	VARIABLE	EXPLICATION ET UNITE
1	id_placette	Identifiant de la placette
2	Index	Identifiant de l'arbre
3	Essence	Code EPPO de l'espèce
4	diametre_mesure	Classe de diamètre mesurée, (cm)
5	diametre_reel	Diamètre moyen de la classe de diamètre, correspond au diamètre réel (cm)
6	classe_inclinaison	Classe d'inclinaison définie en fonction de l'angle de l'arbre par rapport à l'horizontale 1 : 90-75°, 2 : 75-45°, 3 : 45-20°, 4 : 20-0°, 5 : cassé
7	longueur_estimee	Longueur estimé visuellement ou au VERTEX(en m)
8	longueur_mesuree	Longueur mesurée une fois l'arbre abattu (en m)
9	Longueur	Longueur mesurée, ou à défaut estimée ou à défaut calculée (m)
10	etat sanitaire	Sain ou sec
11	Distance	Distance au centre de la placette (m)
12	Azimut	Azimut par rapport au centre de placette (degrés)
13	surface_terriere	Surface terrière de l'arbre (m ²)
14	volume_calcule_0	Volume calculé suivant le modèle 0 (m ³)
15	volume_calcule_1	Volume calculé suivant le modèle 1 (m ³)
16	volume_calcule_2	Volume calculé suivant le modèle 2 (m ³)
17	volume_calcule_3	Volume calculé suivant le modèle 3 (m ³)

18	volume_calcule_4	Volume calculé suivant le modèle 4 (m ³)
19	volume_calcule_lidar	Volume calculé suivant le modèle lidar (en m ³)

Tableau 5 : Liste des variables par arbres. Variables mesurées en vert (1-8 et 10-12), variables calculées en rouge (9, 13-19)

Le tableau par placette compte 28 variables pour 100 placettes.

ID VARIABLE	VARIABLE	EXPLICATION ET UNITE
1	id_placette	Identifiant de la placette
2	Type	Coupe ou inventaire
3	surface_placette	Surface de la placette en m ²
4	type_peuplement	Type de peuplement défini pour l'échantillonnage des placettes cubées.
5	hauteur_moy_terrain	Hauteur moyenne estimée sur le terrain
6	nb_tige_inf	Nombre de tiges inférieures à 2 cm de diamètre et supérieures à 30 cm de hauteur. (nb tige/placette).
7	nb_tige_sup	Nombre de tige supérieur à 2 cm de diamètre. (nb tige/placette)
8	Diamètre moyen (cm)	Diamètre moyen de tous les arbres. (cm)
9	surface_terrière_tt_arbre	Somme de la section à 1.3m du pied de tous les arbres non secs. (m ² /ha)
10	densité_tt_arbre	Nombre d'arbre non secs par hectare. (nb tige/ha)
11	longueur_moyenne (m)	Longueur moyenne de tous les arbres non sec de la placette. (en m)
12,13,14, 15	_acacia	Même variables calculées avec les acacias non sec.
16	volume_mesure	Volume total mesuré sur la placette. (m ³ /ha)
17	volume_calcule_m3	Volume calculé par le modèle 3 (m ³ /ha)
18	Volume	Volume calculé ou mesuré si disponible (m ³ /ha)
19	t_moy	Température moyenne annuelle obtenue par SIG
20	precipitation_med	Précipitations médianes annuelles obtenues par SIG
21	pedo_sols	Type de sol obtenu par SIG
22	pente_pourcentage	Pente issue de la carte MNT25m (en %)
23	altitude	Altitude issue de la carte MNT25m (en m)
24	age_peuplement	(année) cf 2.1.1.
25	classif_teledection	Classification selon (Bley-Dalouman et al., 2021)
26	onf_vegetation_legende	Classification de la végétation par l'ONF, cf 2.1.1.

27	onf_type	Classification simplifiée par l'ONF
28	precision	Précision de la localisation GPS (m)

Tableau 6 : Liste des variables placette. Variables mesurées en vert (1-6,16,18), variables calculées via le tableau arbre en rouge (7-15, 17-18) et les variables obtenues spatialement en bleu (19-27).

Le détail des formules pour les variables calculées est présenté en annexe 4.

2.5. ANALYSE DES DONNEES

Le traitement des données et leur analyse statistique ont été réalisés sous Excel et R – 4.0.

2.5.1. LONGUEUR

La longueur a été mesurée pour tous les arbres des placettes cubées et trois arbres par placette inventoriée soit 1366 arbres au total. Il s'agissait d'abord de questionner la relation longueur diamètre et d'observer la variabilité de cette relation suivant les placettes, les zones et le type de peuplement. La relation longueur diamètre a d'abord été visualisée sous Excel, par placette, par zone, par type de peuplement ou par type.

Ensuite, les modèles linéaires quadratiques et logarithmiques à un facteur ont été testés. Enfin, un modèle à plusieurs facteurs a permis d'évaluer l'effet de variables pédoclimatiques sur la longueur.

2.5.2. VOLUME

2.5.2.1 Volume individuel

Le volume a été mesuré individuellement pour 36 arbres répartis dans les différentes placettes cubées. Il sera noté Vindiv dans la suite du document.

L'analyse de la littérature montre que seul la variable diamètre est utilisée pour l'estimation de Vindiv. Nous avons voulu tester des modèles intégrant soit le diamètre, soit la longueur soit les deux. Différents modèles présentés par (Picard *et al.*, 2012) ont été testés sous R puis les 5 modèles ci-dessous ont été sélectionnés pour validation. Nous avons testé les modèles puissance en transformant les données par la fonction logarithme. Le modèle que nous avons appelé mlidar n'est pas utilisé classiquement mais peut être intéressant ici car la longueur est bien plus facilement estimable par LiDAR aéroporté que le diamètre.

Modèle	Variables explicatives	Equation
m1	D	$V = a D^b$
m2	D, L	$V = a D^2 L + b$
m3	D, L	$V = a (D^2 L)^b$
m4	D, L	$V = a (D)^b (L)^c$
mlidar	L	$V = a (L)^b$

Tableau 7 : Modèles de prévision de Vindiv d'acacia mearnsii en fonction du diamètre, de la longueur ou des deux.

2.5.2.2 Volume peuplement

Afin de vérifier les modèles de calcul de Vindiv, nous avons calculé le volume théorique de tous les arbres puis nous avons fait la régression linéaire du volume mesuré sur la placette, Vpeup_mesuré, par le volume calculé, Vpeup_calculé pour les placettes 1 à 9. Nous avons pu sélectionner le modèle présentant le moins de biais dans l'estimation du volume des peuplements.

2.5.3. INVENTAIRE STATISTIQUE

Nous avons calculé Vindiv pour chaque arbre puis fait la somme par placette. La suite des analyses portera quasi-exclusivement sur le volume. Elles se font à l'échelle de la zone inventoriée de 200 ha et la zone inventoriée précisément de 10 ha.

On cherche à calculer la marge d'erreur de l'inventaire sur les caractéristiques dendrométriques mesurées ou calculées. Pour cela, on admet que les diverses estimations du volume fournies chacune par un inventaire, se répartiraient selon une distribution normale. On en déduit donc l'erreur relative d'échantillonnage :

$$e\% = t_{1-\frac{\alpha}{2}} \times \frac{CV\%}{\sqrt{N}}$$

Avec N le nombre de placette, $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ le t de Student à $N-1$ degré de liberté qui sera assimilé à 2 dans les calculs puisque $N > 30$ et $CV\% = 100 \times \frac{\sigma}{\bar{y}}$ le coefficient de variation avec σ l'écart type des observations et $\bar{y}$ leur moyenne.

On peut ensuite calculer les bornes de l'intervalle de confiance à 95% :

$$I1 = \bar{y} - (\bar{y} \times e\% \times 0.01)$$

$$I2 = \bar{y} + (\bar{y} \times e\% \times 0.01)$$

Concrètement, cela signifie que le volume moyen de la zone inventoriée est compris entre les bornes de l'intervalle avec une probabilité de 95%.

Enfin, on a pu calculer à posteriori le nombre de placette qu'il aurait fallu réaliser en fonction de l'erreur relative attendue.

$$N = \left(t_{1-\frac{\alpha}{2}} \times \frac{CV\%}{e\%} \right)^2$$

avec $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ estimé à 2 puisque N est inconnu.

Nous avons calculé ces indicateurs sur le volume pour la zone inventoriée et sur la zone inventoriée précisément.

2.5.4. EXTRAPOLATION DE L'INVENTAIRE

Pour extrapoler l'inventaire à l'ensemble du massif, il faut avoir accès à la surface occupée par chaque essence hors trouées et estimer le volume moyen d'un peuplement d'acacia représentatif du massif. Nous avons utilisé les données spatiales d'occupation de sol

présentées en partie 2.1.1. pour extrapoler les données d'inventaire aux zones du massif considérées comme de l'acacia.

Les classifications veg_onf, classif_teledec et age_peuplements ont été testées comme variables explicatives du volume mais le modèle n'est pas significatif. (Annexe 5).

En pratique, nous avons calculé le volume moyen et l'erreur relative pour chaque type de végétation des carte veg_onf, classif_teledec et age_peuplements (annexe 6) puis nous avons sélectionné les types présentant une surface inventoriée et un volume moyen d'acacia significatifs.

Zone	Surface inventoriée	Surface totale zone inventaire	Surface totale massif
ONF D (Forêt secondaire d'acacia mearnsii)	2,4	154,4	566,3
AcM-1	0,3	35,0	244,3
AcM-2	1,7	92,9	498,4
Herb	0,5	26,6	477,6
tot_classif_ACAMR	2,0	127,9	742,6
tot_classif_ACAMR et Herb	2,6	154,5	1220,2
Âge 10	2,4	135,4	569,0

Tableau 8 : Récapitulatif des surfaces inventoriées et globales pour les différentes zones d'extrapolation.

On calcule le volume global à l'échelle du massif pour les différentes zones d'extrapolation en faisant l'hypothèse que la zone inventoriée est représentative de la zone extrapolée.

2.5.5. ACCROISSEMENT

La variable age_peuplements (Tableau 6) permet de modéliser l'accroissement en volume. Nous avons d'abord testé le modèle linéaire entre le volume et l'âge des peuplements.

Nous avons aussi fait une régression linéaire entre l'âge du peuplement et le volume moyen par âge afin d'éviter le biais lié à la sur-représentation de peuplements de 10 ans avec une forte variabilité.

3. RESULTATS

Dans cette section la convention suivante pour présenter les p-valeurs a été suivie :
 * $p(H_0) < 0,05$; ** $p(H_0) < 0,01$; *** $p(H_0) < 0,001$.

3.1. RESULTATS ISSUS DES PLACETTES CUBEES

3.1.1. VOLUME EN FONCTION DU DIAMETRE DES BILLONS

En considérant qu'une grande partie des éléments minéraux est concentrée dans les feuilles et les petites tiges, il est intéressant de laisser les petites branches comme retour au sol lors de l'exploitation. Pour cela, nous nous intéressons à l'évolution du volume en fonction du diamètre des billons.

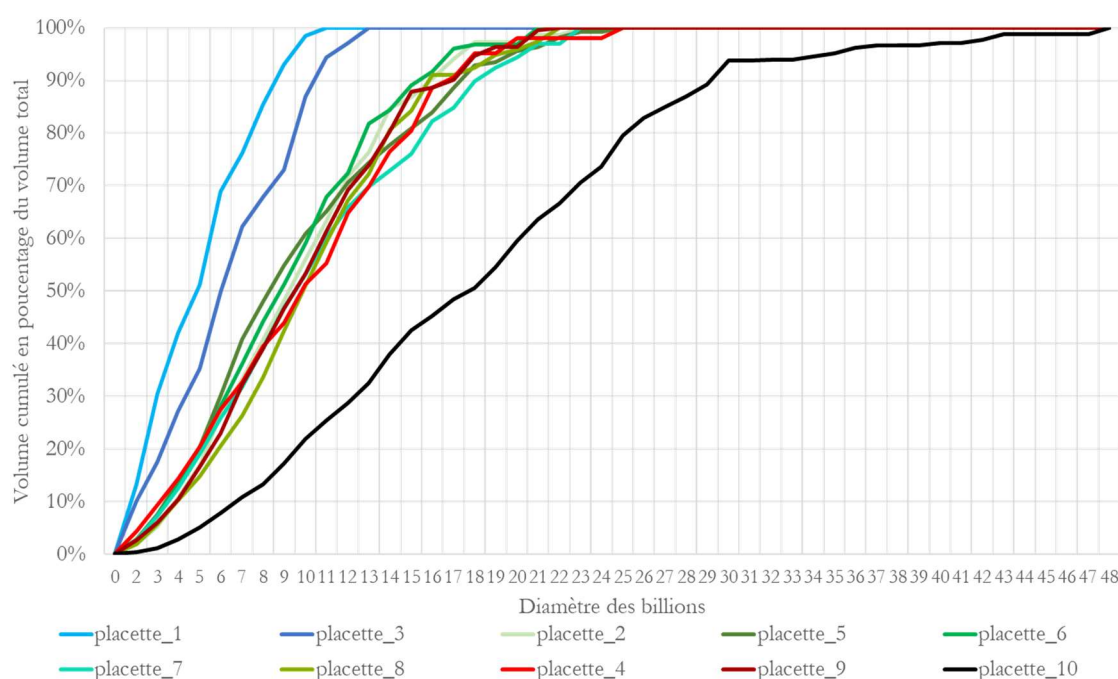


Figure 11 : Volume cumulé en fonction du diamètre des billons mesurés. Placette jeune(bleu), placette mature droit (en vert), placette mature couché (en rouge) et placette mature enchevêtrée (en noir)

D'après la Figure 11, on peut considérer que :

- En n'exportant que les bois supérieurs à 7 cm, on exporte environ 35% du volume pour un peuplement jeune, 70% pour un peuplement mature droit ou couché d'environ 10 ans et 90% pour un peuplement mature enchevêtré d'environ 20 ans.
- On peut déterminer le compromis entre volume exporté et retour au sol en fonction du type du peuplement.

3.1.2. RELATION LONGUEUR DIAMETRE

3.1.2.1 Equation allométrique

La relation longueur diamètre est analysé pour les placettes cubées.

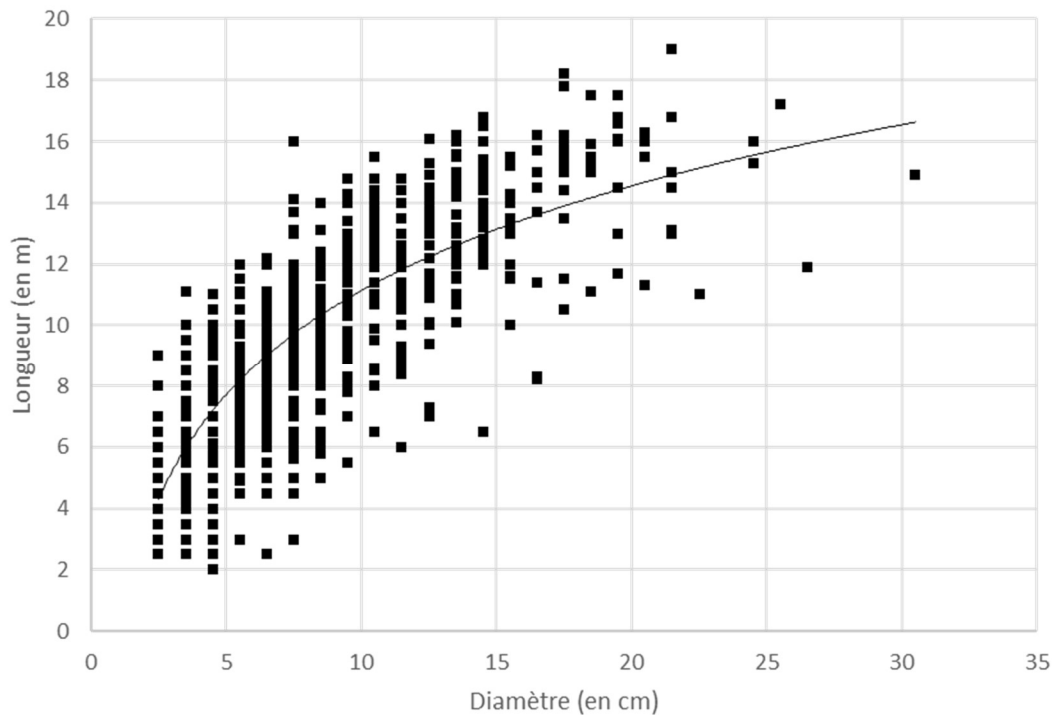


Figure 12 : Longueur exprimée en fonction du diamètre pour l'ensemble des arbres des placettes cubées. La courbe correspond au modèle logarithmique

D'après la Figure 12, on remarque que la variabilité est importante et que le modèle linéaire n'est pas le plus adapté au-delà d'un certain diamètre. Plusieurs modèles ont été testés, les modèles logarithmiques et quadratiques sont les plus pertinents, ils sont présentés en détail en annexe 7.

Pour le modèle quadratique, la longueur diminue à partir d'un diamètre de 22 cm ce qui peut s'expliquer dans le contexte de cyclone que subit la zone. En effet, les arbres les plus vieux donc avec les plus gros diamètres ont en majorité sévèrement souffert d'au moins un cyclone avec pour conséquence une réduction de la longueur par casse du houppier ou bien par modification de la direction d'accroissement apical suite à une modification d'inclinaison.

Toutefois, le modèle logarithmique a été choisi car une diminution de la croissance en longueur reste plus logique biologiquement dans un contexte où l'occurrence de cyclones n'est pas garantie ni prévisible à l'avance.

On retient :

$$L = a \ln(D)$$

avec $a = 4.93571$

3.1.2.2 Variabilité géographique et par type de peuplement

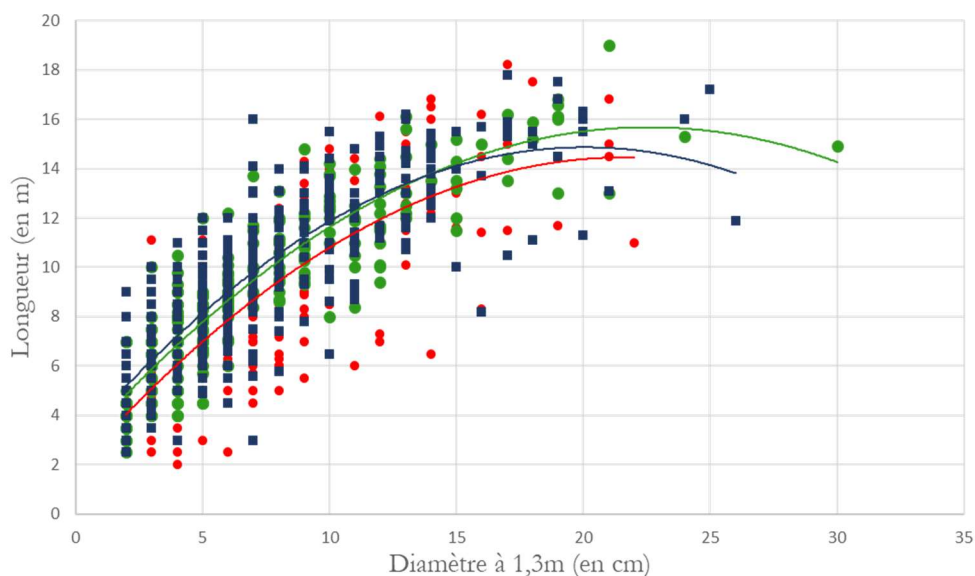


Figure 13 : Longueur en fonction du diamètre pour les trois zones. Zone 1 en rouge, zone 2 en vert, zone 3 en bleu. Les courbes correspondent aux modèles quadratiques

On constate que la variabilité de la longueur est forte y compris pour un diamètre donné. Elle est plus intra-placette qu'inter-placette et la zone ne semble pas avoir d'impact significatif sur la relation longueur diamètre.

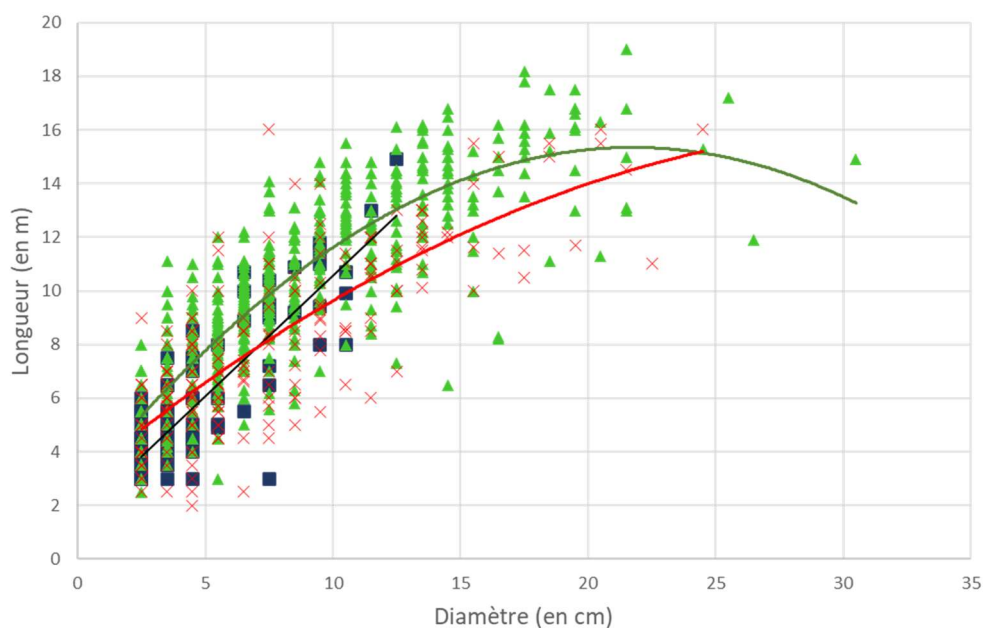


Figure 14 : Longueur en fonction du diamètre. Peuplements jeunes en bleu, peuplements matures droit en vert et peuplement mature couché en rouge. Les courbes correspondent aux modèles les plus significatifs soit linéaire pour peuplement jeune et quadratique pour peuplement mature.

D'après la Figure 14, il n'y a pas d'impact du type de peuplement sur la relation diamètre longueur si ce n'est que la plage de diamètre des peuplement jeune est compatible avec un modèle linéaire alors que pour des diamètres plus importants, la longueur n'augmente pas de manière linéaire.

3.1.2.3 Autres variables explicatives

L'ajout de variables liées au peuplement et de variables climatiques dans le modèle améliore la variabilité expliquée : $R^2 = 0.75$. Les variables sont les suivantes :

	Coefficient	Pr(> t)
Intercept	95,20	0,00201 **
log(diametre_reel)	4,95	< 2e-16 ***
surface_terriere_tt_arbre	0.030491	0.04589 *
t_moy1	-1,74	0,01487 *
altitude	0,01	0,26229
pente_pourcentage	-0,56	2,98e-13 ***
precipitation_med	-0,06	0,00381 **

Tableau 9 : Variables explicatives de la longueur avec coefficients et significativités.

D'après le Tableau 9 :

- La pente, la précipitation médiane et la température moyenne ont un effet négatif sur la longueur alors que la surface terrière a un effet positif.
- L'effet de l'altitude n'a pas été démontré.

3.1.3. ANALYSE DES VOLUMES A L'ECHELLE DES INDIVIDUS

L'objectif ici est d'analyser le volume des arbres cubés individuellement pour créer un tarif de cubage individuel.

3.1.3.1 Observation des données

Nous avons observé la variation du volume individuel en fonction de deux variables explicatives, le diamètre et la longueur.

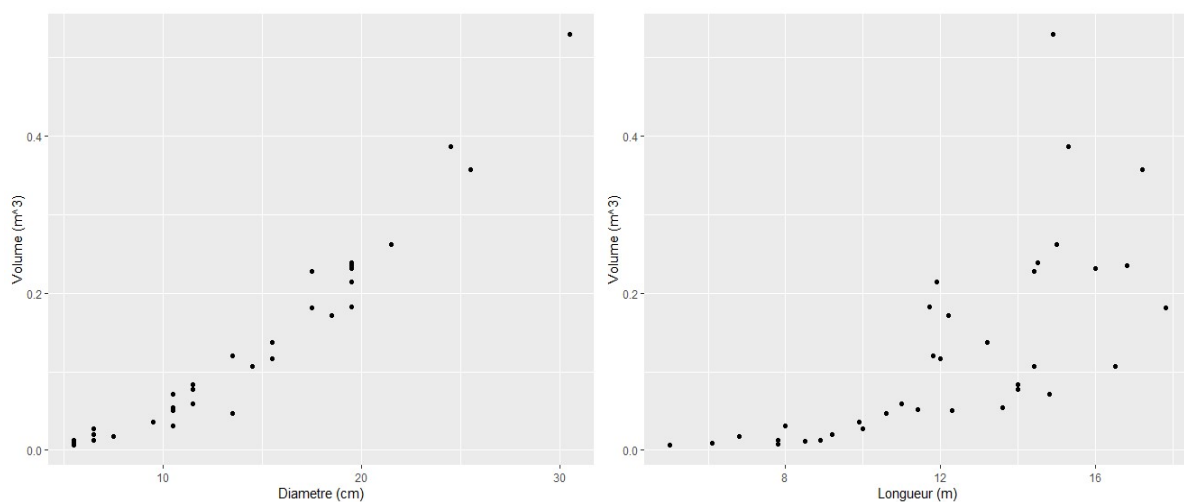


Figure 15 : Volume en fonction du diamètre (à gauche) et de la longueur (à droite)

D'après la Figure 15 :

- L'augmentation du volume en fonction du diamètre n'est pas linéaire mais la variance semble homogène.

- L'augmentation du volume en fonction de la longueur n'est pas linéaire et la variance augmente avec la longueur.

3.1.3.2 Choix et ajustement des modèles

Les modèles ci-dessous ont été sélectionnés, ils sont détaillés en Annexe 8.

Modèle	Variables explicatives	Equation	R ²	a	b	c
m1	D	$V = a D^b$	0,9597	0.00001823	2.38255	
m2	D, L	$V = a D^2 L + b$	0,9683	3.724×10^{-5}	0	
m3	D, L	$V = a (D^2 L)^b$	0,9785	5.975×10^{-5}	0.94916	
m4	D, L	$V = a (D)^b (L)^c$	0,9779	6.146×10^{-5}	1.916	0.9176
mlidar	L	$V = a (L)^b$	0,7659	8.574×10^{-6}	3.433	

Tableau 10 : Récapitulatif des modèles testés et de leur significativité.

D'après le Tableau 10 :

- Le modèle 3 est statistiquement le plus significatif mais les résultats sont globalement proches entre les modèles m3 et m4.
- Le modèle 1 sera plus adapté au gestionnaire et reste valide d'un point de vue statistique.
- Le modèle lidar est moins significatif, la longueur seule pourra être complété par des indicateurs propres au traitement des données LiDAR.

3.1.3.3 Validation du modèle

Le tarif de cubage individuel peut être validé grâce au volume mesuré à l'échelle de la placette. Pour cela, la régression linéaire entre la somme des Vindiv calculés et Vpeup mesuré a été testée. La régression doit s'approcher de x (V_{peup} mesuré) = y (V_{peup} calculé) pour valider le modèle.

m1	$y = 0,8039x + 23,686$	$R^2 = 0,9601$
m2	$y = 0,8819x + 4,5229$	$R^2 = 0,9722$
m3	$y = 0,9499x + 7,3958$	$R^2 = 0,9805$
m4	$y = 0,9449x + 7,8813$	$R^2 = 0,9802$
mlidar	$y = 1,5276x - 29,131$	$R^2 = 0,9386$

Tableau 11 : Récapitulatif des régressions linéaires entre $V_{peup_mesuré}$ et calculé

Tous les modèles dépendant du diamètre ont tendance à sur estimer le volume des placettes avec un volume faible et à sous estimer le volume des placettes avec un volume important alors que le modèle mlidar surestime le volume des peuplements avec un volume important. C'est assez logique car selon les lois de Eichorn, la densité de peuplement n'influence pas la hauteur, en revanche plus un peuplement est dense plus la croissance en diamètre est faible.

Ainsi le volume sera supérieur en peuplement dense pour un diamètre donné et en peuplement peu dense pour une longueur donnée.

On constate que le modèle m3 approche le mieux le volume des placettes cubées donc on conserve ce modèle comme tarif de cubage individuel :

$$V = a (D^2 L)^b$$

avec $a = e^{-9.72525} = 5,9755 \times 10^{-5}$ et $b = 0.94916$

3.1.4. VOLUME A L'ECHELLE DU PEUPLEMENT

Le volume des placettes cubées est intéressant comme estimateur du volume d'un peuplement d'acacia équienne et sans trouées.

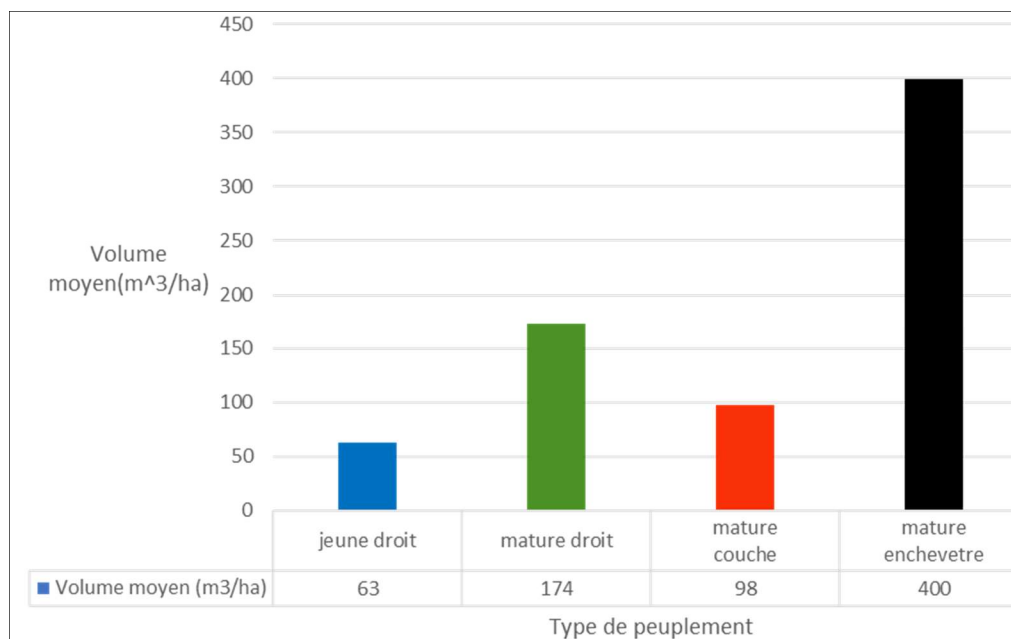


Figure 16 : Volume mesuré moyen suivant le type de peuplement.

La densité étant plus faible en peuplements matures couchés, ils présentent un volume également plus faible que les peuplements matures droits. Le volume d'un peuplement plein d'acacia de 10 ans est de 174 m³/ha.

3.2. RESULTATS DE L'INVENTAIRE

3.2.1. ZONE INVENTORIEE

Dix espèces rentrent dans le diamètre de précomptage, elles sont détaillées en annexe 1. La base de données comprenant l'ensemble des espèces, inventoriées de la même manière, devrait permettre une valorisation à la fois par la méthode Lidar qui nécessite d'être calibrée sur les essences présentes et pour des questions de fonctionnement écologique des milieux envahis par acacia mearnsii. La suite des résultats porte exclusivement sur l'acacia.

Finalement, 90 placettes, soit 3.1 ha, ont été inventoriées sur une zone d'inventaire (Zone i) de 204.7 ha soit un taux de sondage de 1.51%. Parmi-elles, 22 placettes (0.7ha) ont été réalisées dans la zone d'inventaire précis (Zone P) d'une surface totale de 10.4 ha soit un taux de sondage de 6.63%.

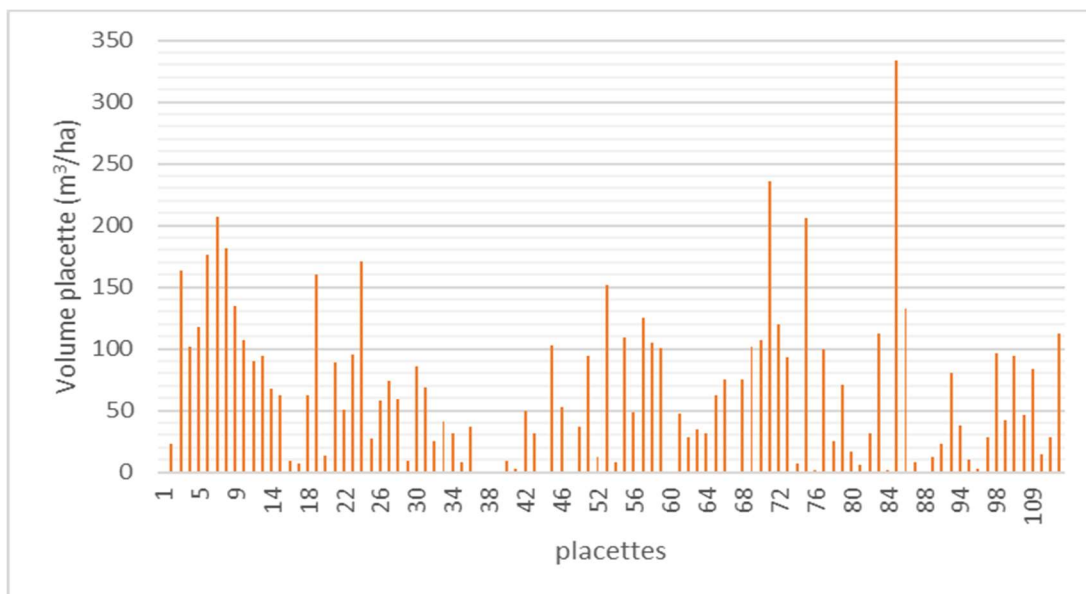


Figure 17 : Volume calculé par placette pour l'ensemble des placettes inventoriées (m³/ha)

D'après la Figure 17, la variabilité sur le volume est très importante, avec des placettes sans acacia notamment.

Les résultats en volume de l'inventaire sur les zones i et P sont rassemblés ci-dessous.

Zone	Taux de sondage	Nombre de placette	Surface inventoriée (ha)	Surface totale (ha)	Volume moyen (m³/ha)	Écartype de volume (m³/ha)
Zone i	1,51%	100	3,1	204,7	69,1	69,3
Zone P	6,63%	22	0,7	10,4	64,5	43,5
Zone	Coefficient de variation	Erreur d'échantillonnage	Intervalle de confiance I1	Intervalle de confiance I2	Nombre de placette (erreur 13 %)	
Zone i	100,35%	20,07%	55,2	83,0	1611	
Zone P	67,47%	28,77%	45,9	83,1	728	

Tableau 12 : Résultat de l'inventaire sur le volume en fonction de la zone.

L'erreur d'échantillonnage est supérieure pour la zone inventoriée précisément (zone P) alors que le taux de sondage³ est beaucoup plus important.

Le volume moyen pour la zone inventoriée est de 69.3 m³/ha avec une erreur d'échantillonnage d'environ 20%.

3.2.2. EXTRAPOLATION DE L'INVENTAIRE

3.2.2.1 Sélection des zones d'extrapolation

³ Quotient de la surface inventoriée sur la surface totale de la zone.

Pour l'extrapolation de l'inventaire au massif, nous avons utilisé les données de veg_onf et de classif_teledec. Il s'agissait d'abord de sélectionner les classifications et donc les zones d'extrapolation. Les zones suivantes ont été conservées car elles présentent un volume d'acacia et un nombre de placette suffisant.

Zone	Volume moyen (m ³ /ha)	Écart-type de volume	Nombre de placette	Coefficient de variation	Erreur d'échantillonnage	Intervalle de confiance I1	Intervalle de confiance I2	Nombre de placette (erreur 13 %)
ONF D	73,5	69,3	79	94,28%	21,21%	57,9	89,1	1422
AcM-1	31,3	30,4	11	97,02%	58,51%	13,0	49,7	1506
AcM-2	89,4	74,6	55	83,52%	22,52%	69,2	109,5	1116
Herb	66,3	72,0	18	108,62%	51,20%	32,4	100,2	1888

Tableau 13 : Résultat d'inventaire par zone d'extrapolation

Le détail de la sélection par méthode ainsi que les surface d'extrapolation obtenues à l'échelle du massif est présenté en annexe 9. La zone Herb est conservée à titre exploratoire.

3.2.2.2 Volume à l'échelle du massif

Le volume moyen est une moyenne du volume des placettes inventoriées dans chaque zone, ils sont compris entre 31 m³/ha et 89 m³/ha suivant les zones (annexe 10).

Le volume total est obtenu par multiplication du volume moyen par la surface d'extrapolation pour chaque zone.

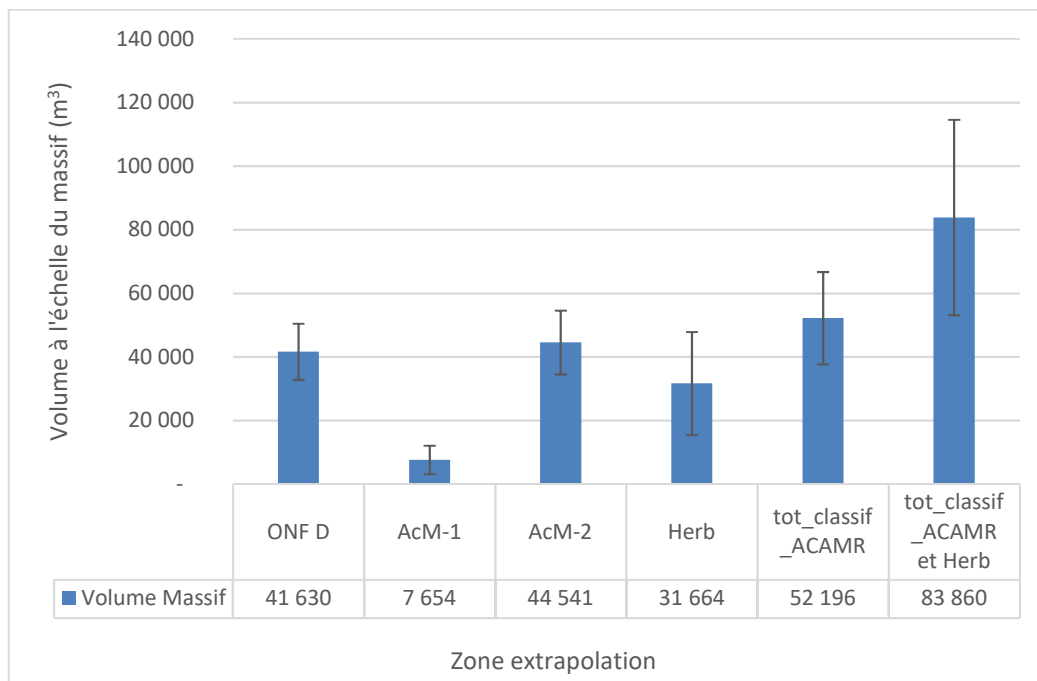


Figure 18 : Volume total estimé à l'échelle du massif par zone. Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle de confiance à 95%.

L'enjeu est de comparer les volumes totaux obtenus à partir des données veg_onf et classif_teledec. En considérant seulement les zones classées en acacia (AcM-1 et AcM-2), l'estimation du volume à l'échelle du massif donne des résultats assez proches pour les deux

jeux de données avec un volume total estimé entre 41 000 et 52 000 m³ d'*acacia mearnsii* à l'échelle du massif. En considérant également la zone Herb qui représente 37% du volume total, on obtient un volume beaucoup plus important avec la source `classif_teledec` (+101%). Cela représente une incertitude forte sur cette méthode.

On retient un volume total d'environ 50 000 m³ sur le massif avec une grande majorité de peuplement d'environ 10 ans. L'accessibilité des peuplements et la durée de rotation n'est pas étudiée.

3.2.3. ESTIMATION DE L'ACCROISSEMENT

L'accroissement en volume a été estimé grâce à `Vpeup_calculé` et à la variable `age_peuplements`.

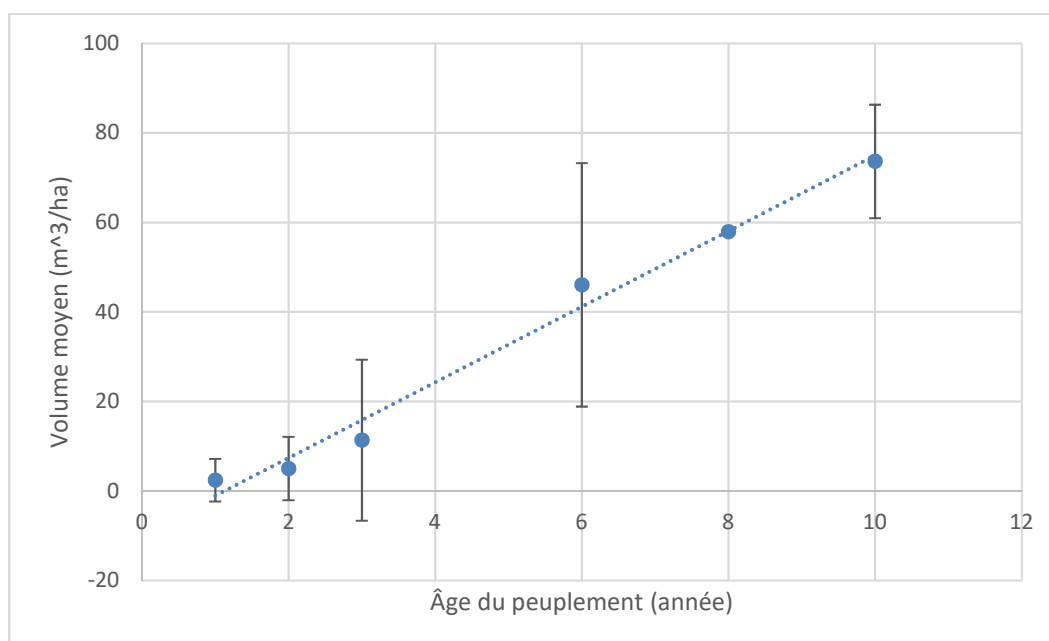


Figure 19 : Volume moyen en fonction de l'âge des peuplements. La droite correspond au modèle linéaire et les barres d'erreur à l'intervalle de confiance sur le volume à 95%.

Ainsi, on obtient le modèle d'accroissement suivant : $Volume = 9.03 \times année - 11.18$ avec $R^2 = 0.9871$ soit un accroissement linéaire d'environ $9m^3 ha^{-1} an^{-1}$ à partir d'environ 15 mois.

4. DISCUSSION

4.1. VARIABILITE DE LA RELATION LONGUEUR DIAMETRE SUR LE MASSIF

On constate qu'une partie des arbres sort de la régression établie à partir des placettes cubées (Figure 20). Il s'agit d'arbres de diamètre important avec une longueur comparativement faible, sur des placettes avec une surface terrière faible ce qui est cohérent avec les résultats du 3.1.2.3.. Cela montre aussi qu'au-delà de 20 cm de diamètre, la variabilité sur la longueur est très importante.

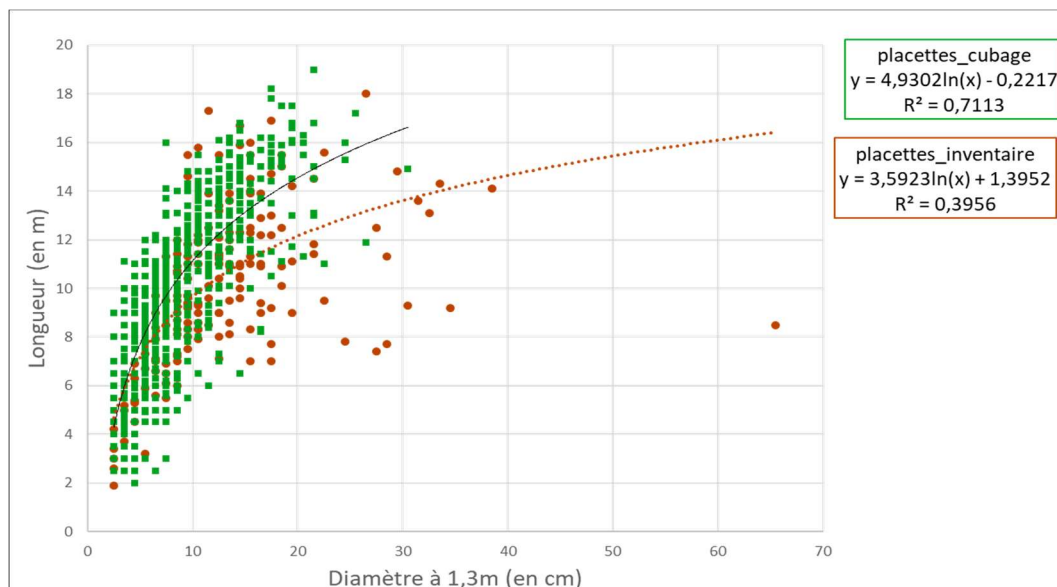


Figure 20 : Relation longueur diamètre pour les placettes cubées (en vert) et les placettes d'inventaires (en orange). Les courbes correspondent aux modèles logarithmiques renseignés.

C'est une limite de l'étude puisque la prévision de la longueur et donc du volume d'arbres de gros diamètre n'est pas précise. Toutefois, avec un objectif de rotation de 10 ou 15 ans, les arbres de plus de 20 cm seront peu représentés.

4.2. COMPARAISON DES TARIFS DE CUBAGE AVEC LA LITTÉRATURE

Les échantillons de bois prélevés sont encore en cours de séchage avant pesé et mesure de densité, on utilise donc la valeur standard de 585 kgMS/m³ (Dovey, 2005) pour convertir le volume et biomasse et comparer les tarifs obtenus avec les tarifs de la littérature.

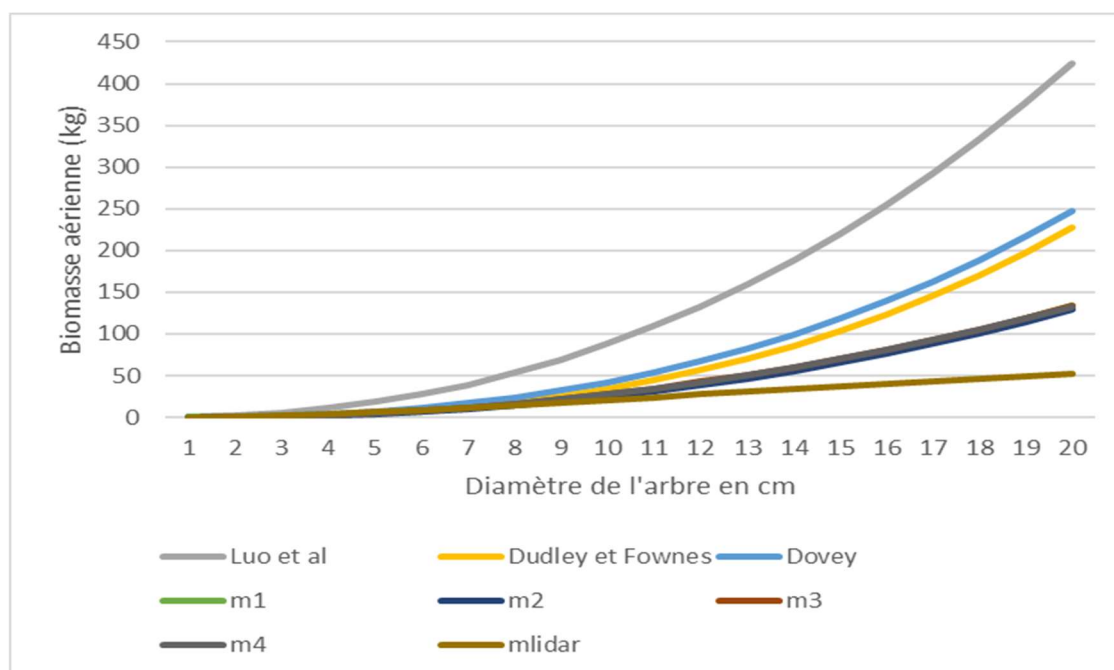


Figure 21 : Comparaison des tarifs de cubages obtenues avec les tarifs existants pour l'acacia.

On compare les tarifs sur la plage de diamètre sur laquelle ils ont été construits; en dessous de 9 m de hauteur soit 7 cm de diamètre pour (Luo *et al.*, 2020); en dessous de 8.6 cm de diamètre pour (Dudley et Fownes, 1992) et entre 5 et 23 m de hauteur pour (Dovey, 2005).

Les tarifs dépendants du diamètre donnent des résultats très proches, alors que le tarif Lidar donne une biomasse plus faible dans les grands diamètres. Tous les tarifs de la bibliographie donnent une biomasse aérienne plus élevée avec une différence qui augmente proportionnellement diamètre. Cela s'explique car la biomasse des branches de diamètre inférieur à 2 cm et des feuilles a été négligée ce qui crée un biais, surtout pour les arbres jeunes. Cela n'explique pas la différence constatée dans les gros diamètres. En revanche, les paramètres de peuplement et pédoclimatiques sont différents dans les études citées, il s'agit de plantations en rotation courte, supposés dans une station de plus grande fertilité et avec une densité de tige plus élevée ce qui modifie la relation hauteur. Ainsi, pour un même diamètre, la longueur est plus élevée dans les études citées et donc le volume aussi. C'est parfaitement illustré par la plage de hauteur de (Dovey, 2005) qui va jusqu'à 23m, hauteur que l'on ne retrouve pas dans notre étude. Pour cette raison, un tarif de cubage faisant intervenir la hauteur est plus adaptable à différents paramètres de station.

Pour déployer un tarif de cubage à l'échelle de l'île, il faudrait probablement faire un cubage dans des zones différentes notamment en termes d'altitude et de fertilité pour calibrer un tarif dépendant de ces paramètres.

4.3. RESULTAT DE L'INVENTAIRE

Sur la surface inventoriée, le volume moyen est de 69m³/ha ce qui est plus faible que l'estimations de 140 m³/ha utilisées dans (Région Réunion *et al.*, 2020) et (Prevost et Gardette, 2018). En revanche, pour un peuplement plein d'acacia, le volume mesuré est de 174 m³/ha. L'estimation utilisée peut donc être considérée comme conservative en l'absence de troué. Il y a un enjeu fort sur l'obtention du volume par une méthode permettant de quantifier les trouées. Cela permettra de corriger les estimations de gisement.

4.4. EXTRAPOLATION AU MASSIF

Pour une valorisation énergétique, le bois est commercialisé sur une base de PCI⁴ et non en volume. On considère un PCI_{bois sec} = 5100 kWh/tMS soit un PCI_{H 30%} = 3400 kWh/t pour du bois ressuyé. Ainsi, un volume de 50 000m³ représente 38 000 tonnes de bois ressuyé soit une énergie primaire de 129.2 GWh (base PCI). Cela représente 3.6% de l'énergie primaire du charbon utilisé en 2020 pour la production d'électricité. Il est en revanche difficile de comparer aux prévisions de l'ONF car la durée de rotation, l'accessibilité des surfaces et le gisement dans les autres massifs rentre en jeu.

4.5. ACCROISSEMENT

L'accroissement a été évalué à environ 13 tMS/ha/an soit environ 22 m³/ha/an par (Tassin, 2004). En revanche, les estimations de l'ONF (Prevost et Gardette, 2018) utilisent un accroissement de 9.5 m³/ha/an sur 15 ans plus cohérent avec la valeur de 9 m³/ha/an obtenue dans cette étude. Il faut rappeler que c'est une moyenne sur la zone inventoriée, pour un peuplement plein d'acacia, l'accroissement serait plus proche de 17 m³/ha/an sur 10 ans.

⁴ Pouvoir Calorifique Inférieur : Correspond à la quantité d'énergie dégager par la combustion.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis d'établir les premières connaissances permettant l'évaluation du volume sur pied pour l'essence *acacia mearnsii*. En particulier, les coupes et cubages ont permis de modéliser la relation longueur diamètre et d'établir des tarifs de cubage adaptés à différentes méthodes d'estimation de volume. L'inventaire statistique d'une zone du massif a permis d'estimer le volume sur pied de cette zone et le gisement global dans le domaine public des Hauts sous le Vent à environ 50 000 m³. La base de données construite en adéquation avec l'acquisition des données LiDAR devra permettre une estimation plus précise du volume.

Au-delà de l'évaluation du gisement sur pied, de l'accessibilité étudiée par Hélène BLEY-DALOUMAN dans sa thèse et des itinéraires techniques d'exploitation, de transformation et de transport expérimentés dans le cadre d'un partenariat ONF-Albioma, plusieurs questions restent à éclaircir pour confirmer l'intérêt de la valorisation énergétique d'*acacia mearnsii* à la réunion.

Nous avons constaté sur le terrain que la régénération n'est pas automatique après une coupe. Dans l'objectif d'assurer la régénération de l'essence ou au contraire son élimination au profit d'espèces indigènes, il sera nécessaire de mieux maîtriser les conditions de régénération, en particulier de germination et les pratiques susceptible d'avoir une influence.

Il faudra aussi vérifier l'impact de l'exploitation d'*acacia mearnsii* sur sa dissémination soit physiquement par transport et dispersion de structures viables ; graines, plants ; soit indirectement par incitation économique à développer la surface d'*acacia* dans un objectif d'exploitation.

Dans un contexte où le prix et la disponibilité des ressources énergétiques est plus instable, il sera nécessaire de mieux évaluer les besoins actuels et futurs de la filière charbon de bois local. Globalement, l'ensemble des acteurs d'une filière bois énergie devrait être réunis et consultés pour son bon développement.

Enfin l'évaluation de l'intérêt de la valorisation énergétique de l'*acacia* pourra être faite par analyse comparée des bilans carbone de la biomasse locale et de la biomasse importée.

L'évaluation du gisement en *acacia* devra être complété par des évaluations de gisement pour d'autres espèces valorisables en bois énergie.

6. REFERENCES

- Albioma. 2022. *Albioma Réunion*. Disponible sur : <https://www.albioma.com/implantation/la-reunion> (Consulté le 13 avril 2022).
- Audouin S. 2016. *Analyse des filières de gazéification pour le CFPPA de Piton St-Leu et à l'échelle régionale, île de la Réunion*. Disponible sur : <https://agritrop.cirad.fr/581450/> (Consulté le 28 mars 2022).
- Bley-Dalouman H., Broust F., et Tran A. 2021. Use of very high spatial resolution imagery for mapping wood energy potential from tropical managed forest stands, Reunion island. Dans : *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-2021*. ISPRS, Disponible sur : <https://agritrop.cirad.fr/598719/> (Consulté le 28 mars 2022).
- Crous C.J., Jacobs S.M., et Esler K.J. 2012. Drought-tolerance of an invasive alien tree, *Acacia mearnsii* and two native competitors in fynbos riparian ecotones. *Biological Invasions*, 14(3), p. 619-631. DOI : 10.1007/s10530-011-0103-y
- Dovey S.B. 2005. ABOVE-GROUND ALLOMETRY., BIOMASS AND NUTRIENT CONTENT OF ACACIA MEARNsii ACROSS FOUR AGES AND THREE SITES IN THE KWAZULU-NATAL MIDLANDS. , p. 119.
- Dudley N.S. et Fownes J.H. 1992. PRELIMINARY BIOMASS EQUATIONS FOR EIGHT SPECIES OF FAST-GROWING TROPICAL TREES. *Journal of Tropical Forest Science*, 5(1), p. 68-73.
- Gilboire G. et Turpin F. 2021. *Bilan énergétique de la réunion 2020*.
- Giovannini K. 2017. *Evaluation de la ressource en acacia mearnsii et de son exploitabilité dans les hauts de l'Ouest de l'île de la Réunion*. Île de la Réunion : ONF, 73 p.
- Luo Y., Wang X., Ouyang Z., Lu F., Feng L., et Tao J. 2020. A review of biomass equations for China's tree species. *Earth System Science Data*, 12(1), p. 21-40. DOI : 10.5194/essd-12-21-2020
- Mukwada G. et Manatsa D. 2017. *Acacia mearnsii* management in a South African National Parks : SWOT analysis using hot topics in biological invasion as a guide. *Journal of mountain science*, 14(1), p. 205-218. DOI : 10.1007/s11629-015-3808-z
- Muvengwi J., Mbiba M., Jimu L., Mureva A., et Dodzo B. 2018. An assessment of the effectiveness of cut and ring barking as a method for control of invasive *Acacia mearnsii* in Nyanga National Park, Zimbabwe. *Forest Ecology and Management*, 427, p. 1-6. DOI : 10.1016/j.foreco.2018.05.034
- Picard N., Saint-André L., et Henry M. 2012. *Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres : de la mesure de terrain à la prédiction*.
- Prevost J. et Gardette Y.-M. 2018. *Evaluation de la ressource mobilisable en bois énergie*. Île de la Réunion : ONF,

- Raunet M. 1991. LE MILIEU PHYSIQUE ET LES SOLS DE L'ÎLE DE LA REUNION. , p. 515.
- Région Réunion. 2016. *Programation pluriannuelle de l'énergie réunion 2016-2018/2019-2023*.
- Région Réunion, DAAF, et Département de la Réunion., éd. 2020. *Programme régional de la forêt et du bois 2020-2030*.
- Région Réunion et Horizon Réunion. 2017. *Schéma régional biomasse Réunion 2017*.
- São José J.F.B., Volpiano C.G., Vargas L.K., Hernandes M.A.S., Lisboa B.B., Schlindwein G., Beneduzi A., Longoni L.S., et Sampaio J.A.T. 2019. Influence of hot water on breaking dormancy, incubation temperature and rhizobial inoculation on germination of *Acacia mearnsii* seeds. *Australian Forestry*, 82(3), p. 157-161. DOI : 10.1080/00049158.2019.1636350
- Tassin J. 2004. Le Diagnostic d'invasion d'une essence forestière en milieu rural: *Acacia mearnsii* à la Réunion. = Diagnosis of woody inursion in rural areas: The case of *Acacia mearnsii* in Reunion Island. Disponible sur : <https://doi.org/10.4267/2042/5082> (Consulté le 13 avril 2022).
- Veyssiere Z. 2021. *Analyse de données de cartographie et de gestion forestière des peuplements d'Acacia Mearnsii à la Réunion*. Île de la Réunion : CIRAD, 44 p.

7. LISTE DES ABREVIATIONS

PPE : Programmation pluriannuelle de l'énergie

GES : Gaz(s) à Effet de Serre.

ONF : Office National des Forêts.

EEE : Espèce(s) Exotiques Envahissante(s).

SRB : Schéma Régional Biomasse.

PRFB : Programmation Régionale de la Forêt et du Bois.

CRPF : Centre régional de la Propriété Forestière.

UICN : Union International pour la Conservation de la Nature

MAE : Mesures Agro-Environnementales

NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée en Français

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie

LiDAR : Light detection and ranging

8. TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèses des équations de calcul de biomasse décrites dans la bibliographie. La biomasse notée B ou W est exprimée en kgMS, le diamètre D en cm et la hauteur H en m.	13
Tableau 2 : Caractéristiques des placettes cubées.	17
Tableau 3 : Paramètres mesurés lors de l'inventaire préalable de cubage et l'inventaire statistique	19
Tableau 4 : Variables mesurées lors de l'inventaire préalable au cubage et lors de l'inventaire statistique.....	19
Tableau 5 : Liste des variables par arbres. Variables mesurées en vert (1-8 et 10-12), variables calculées en rouge (9, 13-19)	23
Tableau 6 : Liste des variables placette. Variables mesurées en vert (1-6,16,18), variables calculées via le tableau arbre en rouge (7-15, 17-18) et les variables obtenues spatialement en bleu (19-27).	24
Tableau 7 : Modèles de prévision de Vindiv d'acacia mearnsii en fonction du diamètre, de la longueur ou des deux.	24
Tableau 8 : Récapitulatif des surfaces inventoriés et globales pour les différentes zones d'extrapolation.....	26
Tableau 9 : Variables explicatives de la longueur avec coefficients et significativités.	30
Tableau 10 : Récapitulatif des modèles testés et de leur significativité.	31
Tableau 11 : Récapitulatif des régressions linéaires entre Vpeup_mesuré et calculé.....	31
Tableau 12 : Résultat de l'inventaire sur le volume en fonction de la zone.	33
Tableau 13 : Résultat d'inventaire par zone d'extrapolation	34
Tableau 14 : Liste des espèces inventoriées et code EPPO	50
Tableau 15 : Variable calculé du tableau par arbre	55
Tableau 16 : Variables calculées du tableau par placette.	55
Tableau 17 : Résultats d'inventaire sur le volume en fonction de la classification de végétation de l'ONF.	57
Tableau 18 : Nomenclature de la classification végétation ONF.....	57
Tableau 19 : Résultats d'inventaire sur le volume en fonction de la classifications de végétation par télédétection (Bley-Dalouman <i>et al.</i> , 2021)	57
Tableau 20 : Résultats d'inventaire sur le volume en fonction de l'âge théorique des peuplements.	58

9. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des consommations d'énergie primaire à la Réunion en 2020 (%)	7
Figure 2 : Production électrique totale par type d'énergie en 2020 à la Réunion (GWh).	7
Figure 3 : Inflorescence (à droite) et peuplement (à gauche) d'acacia mearnsii dans les Hauts sous le vent (photos personnelles)	10
Figure 4 : Carte de la zone d'étude du projet à l'échelle de l'île de la réunion et de la zone d'étude. Fond (a : fond Open streetmap, b : ESRI World Imagery) Légende : Végétation, ONF 2019.	11
Figure 5 : Schéma conceptuel de sélection de la zone inventoriée et couverte par LiDAR.	16
Figure 6 : Illustration de la zone d'étude et des placettes réalisées. Fond ESRI World Imagery	18
Figure 7 : Illustration de l'inventaire préalable sur la placette 6 (Photo personnelle).....	20
Figure 8 : Coupe le placette 10 (photo personnelle).	21
Figure 9 : Prélèvement d'échantillons de bois (photographie personnelle)..	21
Figure 10 : Volume cumulé en fonction du diamètre des billons mesurés. Placette jeune(bleu), placette mature droit (en vert), placette mature couché (en rouge) et placette mature enchevêtrée (en noir)	27
Figure 11 : Longueur exprimée en fonction du diamètre pour l'ensemble des arbres des placettes cubées. La courbe correspond au modèle logarithmique	28
Figure 12 : Longueur en fonction du diamètre pour les trois zones. Zone 1 en rouge, zone 2 en vert, zone 3 en bleu. Les courbes correspondent aux modèles quadratiques.....	29
Figure 13 : Longueur en fonction du diamètre. Peuplements jeunes en bleu, peuplements matures droit en vert et peuplement mature couché en rouge. Les courbes correspondent aux modèles les plus significatifs soit linéaire pour peuplement jeune et quadratique pour peuplement mature.	29
Figure 14 : Volume en fonction du diamètre (à gauche) et de la longueur (à droite)	30
Figure 15 : Volume mesuré moyen suivant le type de peuplement.	32
Figure 16 : Volume calculé par placette pour l'ensemble des placettes inventoriées (m ³ /ha)	33
Figure 17 : Volume total estimé à l'échelle du massif par zone. Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle de confiance à 95%.	34
Figure 18 : Volume moyen en fonction de l'âge des peuplements. La droite correspond au modèle linéaire et les barres d'erreur à l'intervalle de confiance sur le volume à 95%.	35
Figure 19 : Relation longueur diamètre pour les placettes cubées (en vert) et les placettes d'inventaires (en orange). Les courbes correspondent aux modèles logarithmique renseignés.	36
Figure 20 : Comparaison des tarifs de cubages obtenues avec les tarifs existants pour l'acacia.....	36

Figure 21 : donnée spatiale age_peuplements pour la partie Sud de la zone d'étude.	51
Figure 22 : donnée spatiale classif_teledec.....	52
Figure 23 : Fiche de saisie pour le cubage des placettes	53
Figure 24 : Fiche de saisie papier pour l'inventaire préalable des placettes cubées	54
Figure 25 : longueur en fonction du logarithme du diamètre. La courbe correspond au modèle linéaire et l'intervalle de confiance est à 95%.	59
Figure 26 : Résidus en fonction des valeurs prédites (à gauche) et graphique quantile-quantile (à droite pour le modèle logarithmique entre longueur et diamètre.....	60
Figure 27 : Régression linéaire entre la longueur et le modèle quadratique sur le diamètre. La courbe correspond au modèle linéaire et l'intervalle de confiance est à 95%.	60
Figure 28 : Résultat d'inventaire par zone d'extrapolation	66
Figure 29: Surface d'extrapolation par zone à l'échelle du massif.	67
Figure 30 : Volume moyen extrapolé par zone à l'échelle du massif. Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle de confiance à 95%.	68
Figure 31 : Zone 1.....	69
Figure 33 : Zone 2.....	69
Figure 32 : Zone 3.....	70

10. ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : LISTE DES ESPECES INVENTORIEES	49
ANNEXE 2.1 : CARTE ILLUSTRANT L'AGE DES PEUPLEMENT THEORIQUES D'ACACIA MEARNSII	51
ANNEXE 2.2 : CARTE ILLUSTRANT LA DONNEE SPATIALE CLASSIF_TELEDEC	52
ANNEXE 3 : FICHES DE SAISIES PAPIER	53
ANNEXE 4 : EXPLICATION DU CALCUL DES VARIABLES	55
ANNEXE 5 : TEST DE L'INFLUENCE CLASSIF_TELEDEC ET AGE_PEUPLEMENTS SUR LE VOLUME PEUPLEMENT	56
ANNEXE 6 : RESULTAT DE L'INVENTAIRE SELON LES DIFFERENTES CLASSIFICATION	57
ANNEXE 7.1 : RELATION LONGUEUR DIAMETRE, TEST DU MODELE LOGARITHMIQUE	59
ANNEXE 7.2 : RELATION LONGUEUR DIAMETRE, TEST DU MODELE QUADRATIQUE	60
ANNEXE 8 : RESULTATS DES TESTS STATISTIQUES DES TARIFS DE CUBAGES	62
ANNEXE 9 : SELECTION DES ZONES D'EXTRAPOLATION DE L'INVENTAIRE ET SURFACES A L'ECHELLE DU MASSIF	66
ANNEXE 10 : VOLUME MOYEN PAR ZONE D'EXTRAPOLATION	68
ANNEXE 11 : DETAIL DES ZONES INVENTORIEES	69

ANNEXE 1 : LISTE DES ESPECES INVENTORIEES

Code EPPO	Nom Commun	Nom latin
ACAHP	Tamarin des Hauts	Acacia Heterophylla
ACAMR	Mimosa Vert	Acacia mearnsii
CMYJA	Cryptomeria	Cryptomeria Japonica
CSWOR	Bois rouge	Cassine orientalis
EIARU	Branle vert	Erica reunionensis
FUCMA	Fuchia commun	Fuchsia magellanica
HYPLC	Fleur jaune	Hypericum lanceolatum
LIGOV	Troène du Japon	Ligustrum ovalifolium
PTEAQ	Fougère aigle	Pteridium aquilinum
SOLMR	Bringelier marron	Solanum mauritianum

Tableau 14 : Liste des espèces inventoriées et code EPPO

ANNEXE 2.1 : CARTE ILLUSTRANT L'AGE DES PEUPEMENT THEORIQUES D'ACACIA MEARNsii

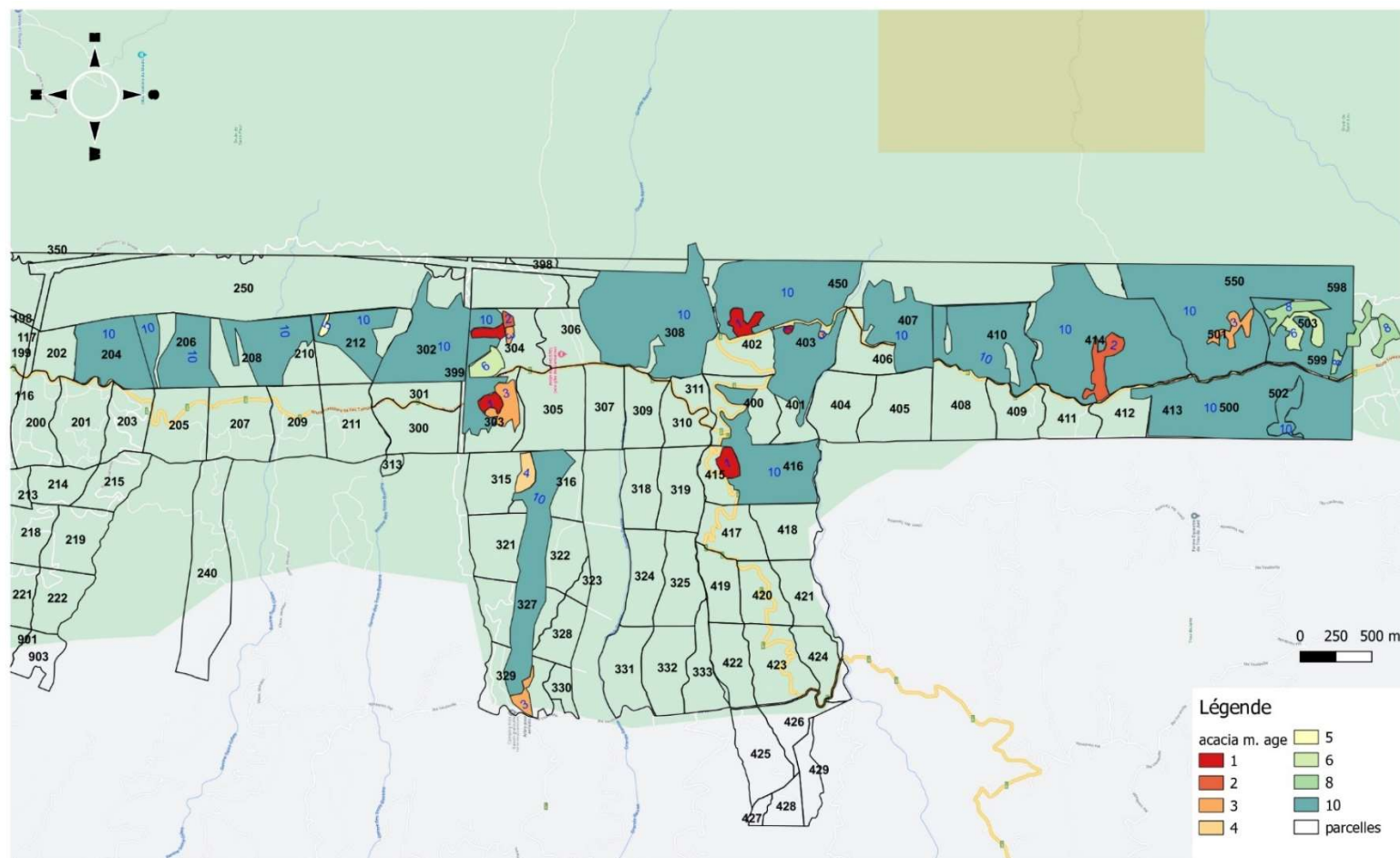


Figure 22 : donnée spatiale age_peuplements pour la partie Sud de la zone d'étude.

ANNEXE 2.2 : CARTE ILLUSTRANT LA DONNEE SPATIALE CLASSIF_TELEDEC

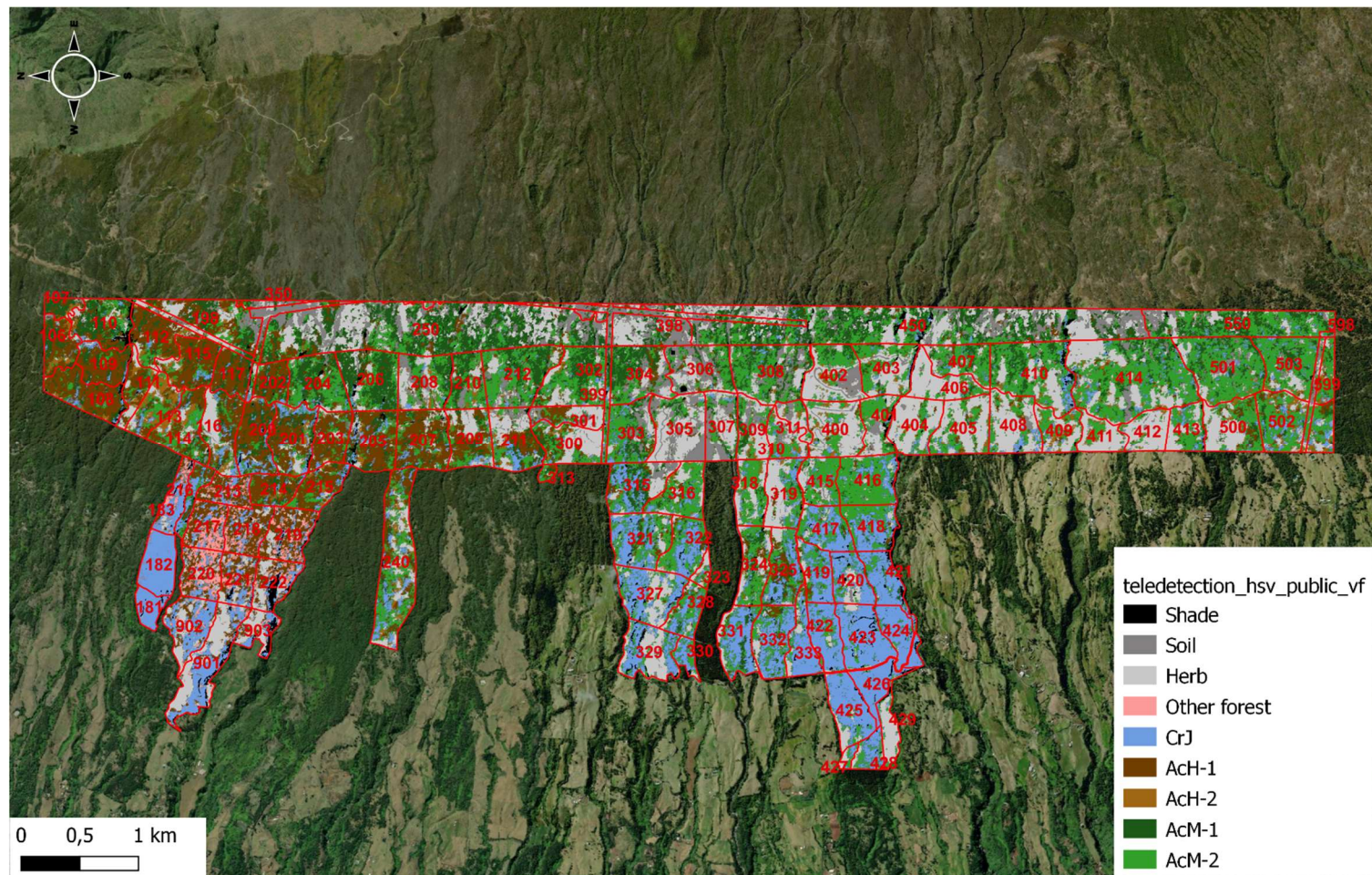


Figure 23 : donnée spatiale classif_teledec

ANNEXE 3 : FICHES DE SAISIES PAPIER

id_placette		FICHE DE SAISIE - COUPE HSV ACACIA												
		Volume												
Classes de diamètre	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Longueurs cumulées par classe de diamètre														
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Figure 24 : Fiche de saisie pour le cubage des placettes

ANNEXE 4 : EXPLICATION DU CALCUL DES VARIABLES

ID VARIABLE	VARIABLE	EXPLICATION ET UNITÉ
9	Longueur	Longueur mesurée, ou à défaut estimée ou à défaut calculée (m) selon modèle logarithmique : $L = 4.9 \times \ln(D)$
13	surface_terriere	Surface terrière de l'arbre (m ²) $St = \pi \times (D/2)^2$
14	volume_calcule_0	Volume calculé suivant le modèle 0 (m ³)
15	volume_calcule_1	Volume calculé suivant le modèle 1 (m ³)
16	volume_calcule_2	Volume calculé suivant le modèle 2 (m ³)
17	volume_calcule_3	Volume calculé suivant le modèle 3 (m ³)
18	volume_calcule_4	Volume calculé suivant le modèle 4 (m ³)
19	volume_calcule_lidar	Volume calculé suivant le modèle lidar (en m ³)

Tableau 15 : Variable calculé du tableau par arbre

ID VARIABLE	VARIABLE	EXPLICATION ET UNITÉ
7	nb_tige_sup	Nombre de tige supérieur à 2 cm de diamètre. (nb tige/placette) Nombre d'arbre issu du tableau par arbre
8	Diamètre moyen (cm)	Diamètre moyen de tous les arbres. (cm) Moyenne du diamètre sur tous les arbres de la placette
9	surface_terriere_tt_arbre	Somme de la section à 1.3m du pied de tous les arbres non secs. (m ² /ha)
10	densité_tt_arbre	Nombre d'arbre non secs par hectare. (nb tige/ha)
11	longueur_moyenne (m)	Longueur moyenne de tous les arbres non sec de la placette. (en m)
12,13,14, 15	_acacia	Même variables calculées avec les acacias non sec.
17	volume_calcule_m3	Somme du Vindiv calculé par le modèle 3 (m ³ /ha)
18	Volume	Volume_calcule_m3 ou volume_mesuré si disponible (m ³ /ha)

Tableau 16 : Variables calculées du tableau par placette.

ANNEXE 5 : TEST DE L'INFLUENCE CLASSIF_TELEDEC ET AGE_PEUPLEMENTS SUR LE VOLUME PEUPLEMENT

Le modèle suivant est testé

Call:

lm(formula = volume ~ classif_teledetection + age_peuplement, data = d)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-93.288	-39.557	0.079	23.921	177.034

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-98.2851	32.4866	-3.025	0.00327 **
classif_teledetectionAcH-1	-0.9814	40.8720	-0.024	0.98090
classif_teledetectionAcH-2	6.5323	61.1670	0.107	0.91520
classif_teledetectionAcM-1	39.2282	31.0939	1.262	0.21050
classif_teledetectionAcM-2	64.5877	26.1293	2.472	0.01541 *
classif_teledetectionCrJ	64.1831	46.7171	1.374	0.17305
classif_teledetectionHerb	54.2029	28.5020	1.902	0.06056.
classif_teledetectionSoil	29.8161	38.2590	0.779	0.43793
age_peuplement	12.8122	2.0780	6.166	2.21e-08 ***

Residual standard error: 55.84 on 86 degrees of freedom

(5 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.4122, Adjusted R-squared: 0.3575

F-statistic: 7.537 on 8 and 86 DF, p-value: 1.404e-07

On constate que la classif _télédétection n'as pas d'impact significatif sur le volume sauf pour AcM-2. En revanche, la age_peuplements à un influence significative. Ce modèle n'est pas utilisé pour extrapoler le volume à l'ensemble du massif.

ANNEXE 6 : RESULTAT DE L'INVENTAIRE SELON LES DIFFERENTES CLASSIFICATION

ONF légende	Moyenne de volume	Écartype de volume	Nombre de placette	Coefficient de variation	Erreur d'échantillonnage	Intervalle de confiance I1	Intervalle de confiance I2	Nombre de placette (erreur 13 %)
A	31,8		1			31,8	31,8	
B	103,1	101,3	6	98,3%	80,2%	20,4	185,8	1545
C	35,2	61	3	173,3%	200,1%	-35,2	105,6	4805
D	73,5	69,3	79	94,3%	21,2%	57,9	89,1	1422
E	38,1	63,4	4	166,4%	166,4%	-25,3	101,5	4430
F	31,1		1			31,1	31,1	
G	12,1		1			12,1	12,1	
Vide	29,8	14,9	5	50,0%	44,7%	16,5	43,1	400
Total	69,1	69,3	100	100,3%	20,1%	55,2	83,0	1609

Tableau 17 : Résultats d'inventaire sur le volume en fonction de la classification de végétation de l'ONF.

ONF Nomenclature	ONF légende
A	Ancien pare-feux
B	Forêt cultivée de tamarin des hauts
C	Forêt cultivée de tamarin des hauts en mélange avec acacia mearnsii
D	Forêt secondaire d'acacia mearnsii
E	Fourré et matorral continu à branle vert
F	Fourré secondaire à ajonc d'Europe
G	Fourré secondaire à fougère aigle

Tableau 18 : Nomenclature de la classification végétation ONF.

Résultat télédétection	Moyenne de volume	Écartype de volume	Nombre de placette	Coefficient de variation	Erreur d'échantillonnage	Intervalle de confiance I1	Intervalle de confiance I2	Nombre de placette (erreur 13 %)
AcH-1	8,8	6,5	4	73,9%	73,9%	2,3	15,3	
AcH-2	36,4		1	0,0%	0,0%	36,4	36,4	
AcM-1	31,3	30,4	11	97,1%	58,6%	13,0	49,6	1
AcM-2	89,4	74,6	55	83,4%	22,5%	69,3	109,5	1
CrJ	94	0,1	2	0,1%	0,2%	93,9	94,1	
Herb	66,3	72	18	108,6%	51,2%	32,4	100,2	1
Soil	11,6	11,7	4	100,9%	100,9%	-0,1	23,3	1
Vide	29,8	14,9	5	50,0%	44,7%	16,5	43,1	
Total	69,1	69,3	100	100,3%	20,1%	55,2	83,0	1

Tableau 19 : Résultats d'inventaire sur le volume en fonction de la classifications de végétation par télédétection (Bley-Dalouman *et al.*, 2021)

Âge peuplement	Moyenne de volume	Écartype de volume	Nombre de placette	Coefficient de variation	Erreur d'échantillonnage	Intervalle de confiance I1	Intervalle de confiance I2	Nombre de placette (erreur 13 %)
1	2,4	4,7	4	195,8%	195,8%	-2,3	7,1	6136
2	5	5	2	100,0%	141,4%	-2,1	12,1	1600
3	11,3	12,7	2	112,4%	158,9%	-6,7	29,3	2021
6	46	38,4	8	83,5%	59,0%	18,8	73,2	1115
8	57,9		1	0,0%	0,0%	57,9	57,9	0
10	73,6	55,2	76	75,0%	17,2%	60,9	86,3	900
20	366,4	46,9	2	12,8%	18,1%	300,1	432,7	26
ND	22,3	45,3	5	203,1%	181,7%	-18,2	62,8	6602
Total	69,1	69,3	100	100,3%	20,1%	55,2	83,0	1609

Tableau 20 : Résultats d'inventaire sur le volume en fonction de l'âge théorique des peuplements.

ANNEXE 7.1 : RELATION LONGUEUR DIAMETRE, TEST DU MODELE LOGARITHMIQUE

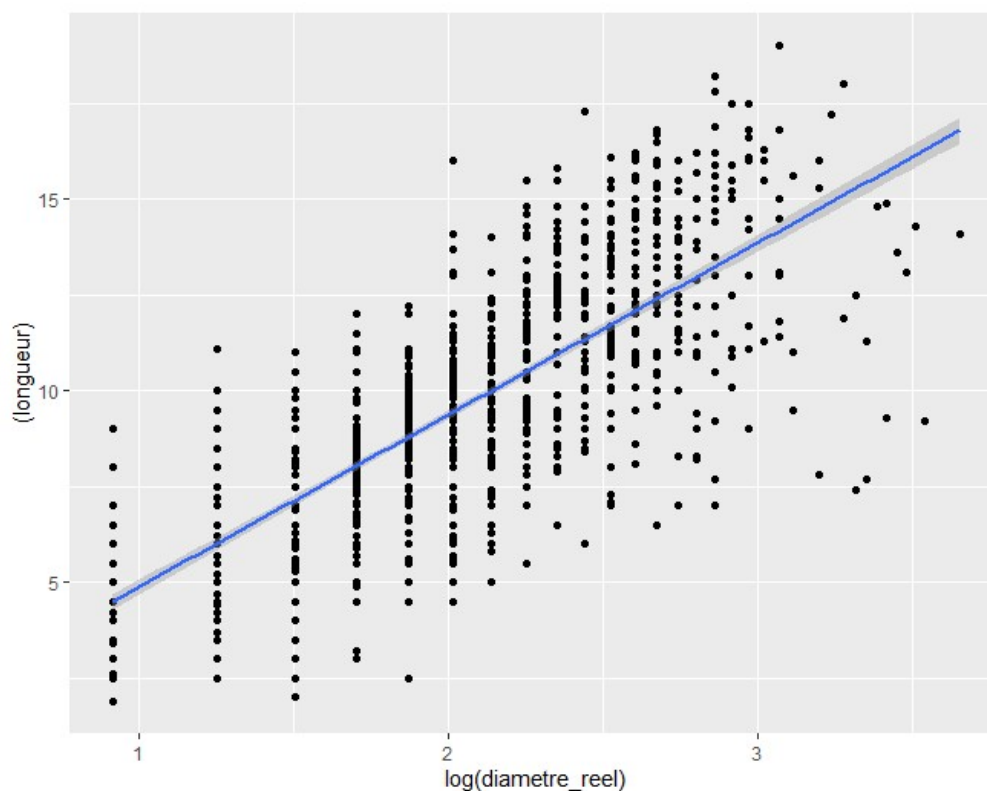


Figure 26 : longueur en fonction du logarithme du diamètre. La courbe correspond au modèle linéaire et l'intervalle de confiance est à 95%.

```
m1 = lm((longueur) ~ log(diametre_reel), data=d)
```

L'écart-type résiduel vaut $\hat{\sigma} = 1.79$ le R^2 est de 0,7139 et le modèle est significatif (test de Fisher : $F_{1,1054} = 2633$, $p\text{-value} < 2,2 \times 10^{-16}$). Les valeurs des coefficients sont les suivantes:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-0.22510	0.18049	-1.247	0.213
log(diametre_reel)	4.93571	0.09619	51.314	<2e-16 ***

La pente est significativement différente de zéro alors que l'ordonnée à l'origine non, le modèle s'écrit :

$$L = a \ln(D)$$

avec $a = 4.93571$

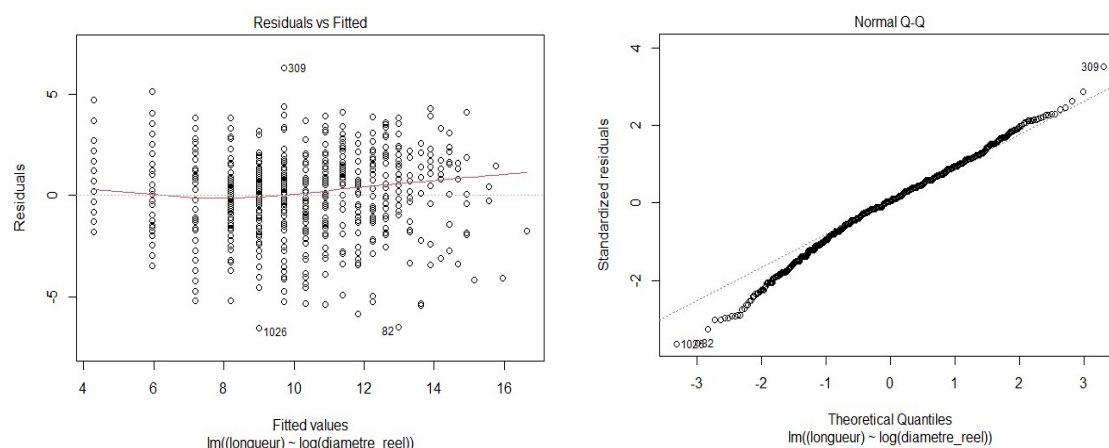


Figure 27 : Résidus en fonction des valeurs prédites (à gauche) et graphique quantile–quantile (à droite) pour le modèle logarithmique entre longueur et diamètre.

L'analyse des résidus montre que les hypothèses de distribution normale et de variance constante des résidus sont bien vérifiées, on peut donc valider le modèle.

ANNEXE 7.2 : RELATION LONGUEUR DIAMETRE, TEST DU MODELE QUADRATIQUE

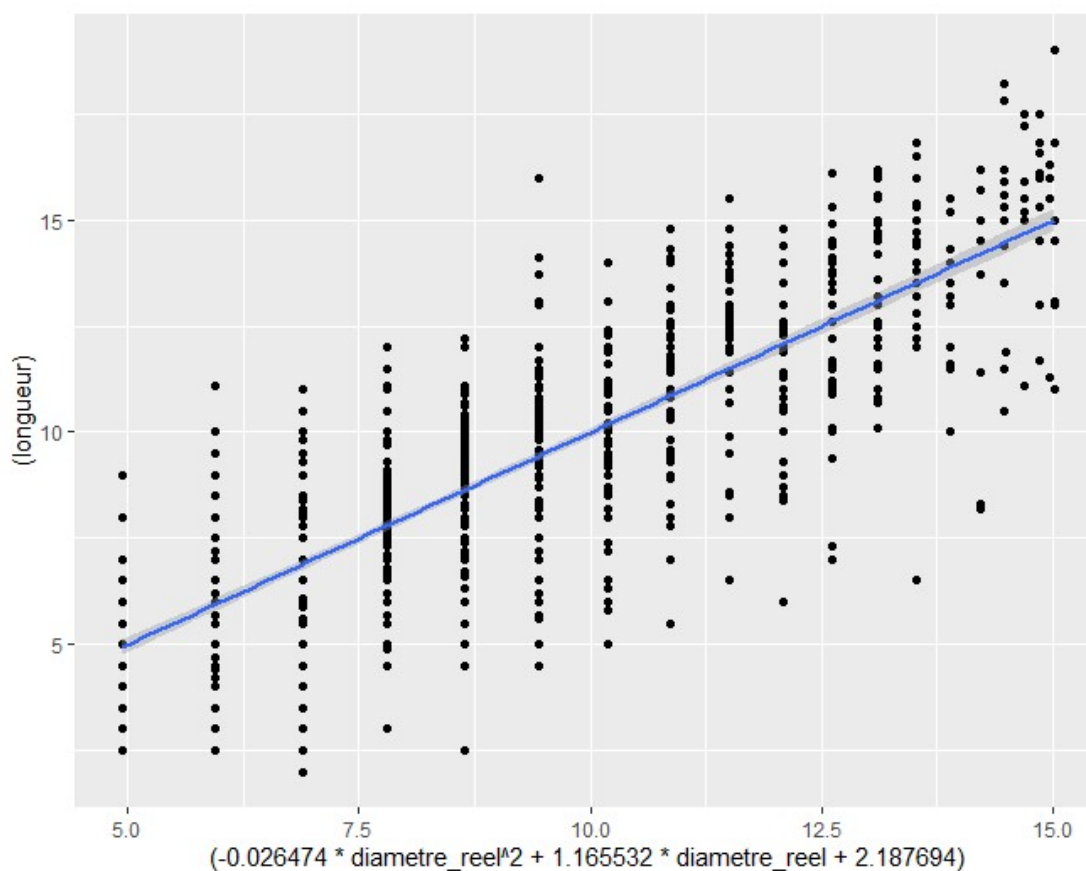


Figure 28 : Régression linéaire entre la longueur et le modèle quadratique sur le diamètre. La courbe correspond au modèle linéaire et l'intervalle de confiance est à 95%.

mq = lm(longueur ~ diametre_reel + (diametre_reel^2), data = d1))

L'écart-type résiduel vaut $\hat{\sigma} = 1.77$ le R^2 est de 0,7191 et le modèle est significatif (test de Fisher : $F_{2,1053} = 1351$, p-value $< 2,2 \times 10^{-16}$). Les valeurs des coefficients sont les suivantes :

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.187694	0.177655	12.31	<2e-16 ***
diametre_reel	1.165532	0.041138	28.33	<2e-16 ***
diametre_reel^2	-0.026474	0.001922	-13.77	<2e-16 ***

Tous les coefficients sont significatifs donc le modèle s'écrit :

$$L = a + bD + cD^2$$

avec $a = 2.187694$, $b = 1.165532$ et $c = -0.026474$

L'analyse des résidus permet de valider le modèle.

ANNEXE 8 : RESULTATS DES TESTS STATISTIQUES DES TARIFS DE CUBAGES

Les différents modèles ont été sélectionnés et testés sous R.

Régression linéaire entre $\ln(V)$ et $\ln(D)$

$m1 = \text{lm}(\log(\text{volume_mesure}) \sim \log(\text{diametre_reel}), \text{data}=d)$

L'écart-type résiduel vaut $\hat{\sigma} = 0,2434$ le R^2 est de 0,9597 et le modèle est hautement significatif (test de Fisher : $F_{1,34} = 833,6$, p-value $< 2,2 \times 10^{-16}$). Les valeurs des coefficients sont les suivantes:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-8.60996	0.21012	-40.98	<2e-16 ***
log(diametre_reel)	2.38255	0.08252	28.87	<2e-16 ***

La première colonne de ce tableau donne les valeurs des coefficients. Le modèle s'écrit donc: $\ln(V) = -8,60996 + 2,38255 \ln(D)$. La deuxième colonne donne les écart-types des estimateurs des coefficients. La troisième colonne donne la valeur de la statistique de test de l'hypothèse nulle « le coefficient est nul ». Enfin la quatrième colonne donne la p-value de ce test. Dans le cas présent, à la fois la pente et l'ordonnée à l'origine sont significativement différents de zéro. Le modèle devient :

$$V = a D^b$$

avec $a = e^{-8.60996} = 0.000182281$ et $b = 2.38255$

Régression linéaire entre (V) et (DBH^2L)

$m2 = \text{lm}(\text{volume_mesure} \sim \text{diametre_reel}^2 * \text{longueur}, \text{data}=d)$

L'écart-type résiduel vaut $\hat{\sigma} = 0,02192$ le R^2 est de 0,9683 et le modèle est hautement significatif (test de Fisher : $F_{1,34} = 1070$, p-value $< 2,2 \times 10^{-16}$). Les valeurs des coefficients sont les suivantes:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	6.727e-03	3.724e-05	1.31	0.199
diametre_reel^2*longueur	3.724e-05	1.138e-06	32.72	<2e-16 ***

La première colonne de ce tableau donne les valeurs des coefficients. Le modèle s'écrit donc: $V = 6.727 \times 10^{-3} + DBH^2L$. La pente est significativement différente de zéro mais l'ordonnées à l'origine non, ainsi le modèle s'écrit :

$$V = a D^2L$$

avec $a = 3.724 \times 10^{-5}$

Régression linéaire entre $\ln(V)$ et $\ln(DBH^2L)$

m3 = lm(log(volume_mesure) ~ log(diametre_reel^2*longueur) ,data=d)

L'écart-type résiduel vaut $\hat{\sigma} = 0,1776$ le R^2 est de 0,9785 et le modèle est hautement significatif (test de Fisher : $F_{1,34} = 1596$, p-value $< 2,2 \times 10^{-16}$). Les valeurs des coefficients sont les suivantes:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-9.72525	0.17937	-54.22	<2e-16 ***
log(diametre_reel^2*longueur)	0.94916	0.02376	39.95	<2e-16 ***

La première colonne de ce tableau donne les valeurs des coefficients. Le modèle s'écrit donc: $\ln(V) = -9,72525 + 0,94916 \ln(\text{DBH}^2L)$. La fois la pente et l'ordonnée à l'origine sont significativement différents de zéro.

$$V = a (D^2L)^b$$

avec $a = e^{-9.72525}$ et $b = 0.94916$

Régression linéaire multiple entre $\ln(V)$, $\ln(D)$ et $\ln(L)$

m4 = lm(log(volume_mesure) ~ log(diametre_reel) + log(longueur) ,data=d)

L'écart-type résiduel vaut $\hat{\sigma} = 0,1802$ le R^2 est de 0,9779 et le modèle est hautement significatif (test de Fisher : $F_{2,33} = 775.4$, p-value $< 2,2 \times 10^{-16}$). Les valeurs des coefficients sont les suivantes:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-9.6921	0.2539	-38.171	< 2e-16 ***
log(diametre_reel)	1.9160	0.1059	18.089	< 2e-16 ***
log(longueur)	0.9176	0.1702	5.391	5.81e-06 ***

$$V = a (D)^b (L)^c$$

avec $a = e^{-9.6921} = 6.17696 \times 10^{-5}$, $b = 1.9160$ et $c = 0.9176$

Régression linéaire simple entre $\ln(V)$ et $\ln(L)$

mlidar = lm(log(volume_mesure) ~ log(longueur) ,data=d)

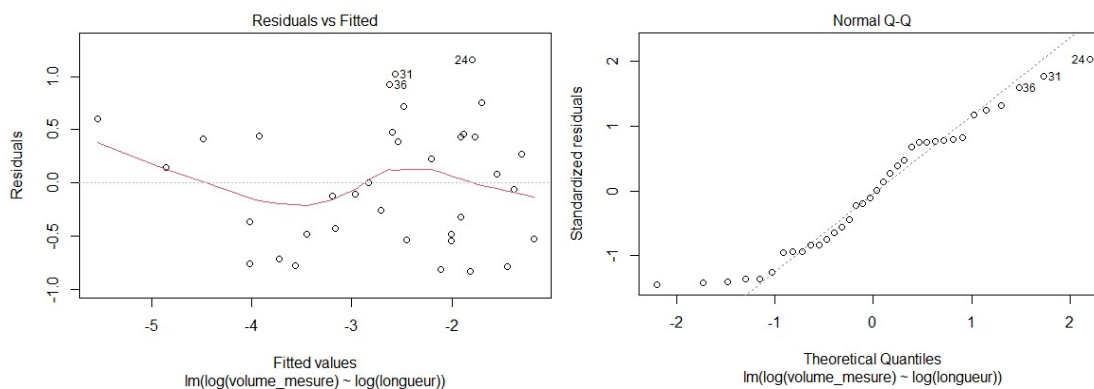
L'écart-type résiduel vaut $\hat{\sigma} = 0,5865$ le R^2 est de 0,7659 et le modèle est significatif (test de Fisher : $F_{1,34} = 115.5$, $p\text{-value} = 1.7872 \times 10^{-12}$). Les valeurs des coefficients sont les suivantes:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-11.0668	0.7886	-14.03	1.05e-15 ***
log(longueur)	3.4330	0.3194	10.75	1.79e-12 ***

L'ordonnée à l'origine et la pente sont significativement différentes de zéro et l'analyse des résidus ne montre rien permettant d'infirmer le modèle donc celui-ci est accepté et devient :

$$V = a (L)^b$$

avec $a = e^{-11.0668}$, $b = 3,4330$



Test modèle LIDAR 2

Call: `lm(formula = log(volume_mesure) ~ log(longueur) + classe_inclinaison, data = d)`

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.70402	-0.40418	-0.03403	0.40451	1.16601

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-11.4103	0.7982	-14.295	6.26e-15 ***
log(longueur)	3.5137	0.3199	10.985	4.91e-12 ***
classe_inclinaison2	0.2193	0.2163	1.014	0.3188
classe_inclinaison3	0.6862	0.4192	1.637	0.1121

classe_inclinaison4	0.6180	0.5757	1.074	0.2916
classe_inclinaison5	1.2821	0.5669	2.262	0.0311 *

Residual standard error: 0.5502 on 30 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.8234, Adjusted R-squared: 0.794

F-statistic: 27.98 on 5 and 30 DF, p-value: 1.903e-10

Seul le caractère cassé des arbres a une influence significative sur la longueur. Ce modèle n'est pas conservé.

ANNEXE 9 : SELECTION DES ZONES D'EXTRAPOLATION DE L'INVENTAIRE ET SURFACES A L'ECHELLE DU MASSIF

Les zones conservées sont les suivantes :

Zone	Volume moyen (m3/ha)	Écart-type de volume	Nombre de placette	Coefficient de variation	Erreur d'échantillonnage	Intervalle de confiance 11	Intervalle de confiance 12	Nombre de placette (erreur 13 %)
ONF D	73,5	69,3	79	94,28%	21,21%	57,9	89,1	1422
AcM-1	31,3	30,4	11	97,02%	58,51%	13,0	49,7	1506
AcM-2	89,4	74,6	55	83,52%	22,52%	69,2	109,5	1116
Herb	66,3	72,0	18	108,62%	51,20%	32,4	100,2	1888

Figure 29 : Résultat d'inventaire par zone d'extrapolation

On conserve la zone de Forêt secondaire d'acacia mearnsii, zone D, car elle bien couverte par l'inventaire avec 79 placettes et un volume moyen de 73.5 m³/ha.

On conserve les zones AcM-1 (acacia mearnsii jeune) et AcM-2 (Acacia mearnsii mature). La zone Herb (couvert herbacé) présente un volume significatif d'acacia, l'inventaire rentre donc en contradiction avec les résultats de classification. Cette confusion entre un couvert herbacé et de l'acacia peut être expliquée par deux facteurs. D'une part le décalage entre la date d'inventaire et la date de l'image de base de la classification (2020) (Bley-Dalouman *et al.*, 2021) peut expliquer cette différence au vu de la vitesse de développement de l'acacia. D'autre part, il peut s'agir d'une limite de cette classification par télédétection qui parvient mal à faire la différence entre ces deux types de végétation. La zone Herb a été conservé à titre exploratoire.

L'extrapolation à partir de la zone age_peuplements 10 ne sera pas possible car la méthode de détermination de l'âge ne permet pas de savoir l'espèce réellement présente et donc la surface associée à chaque essence.

La surface de la zone à l'échelle du massif est présentée ici pour les zones sélectionnées.

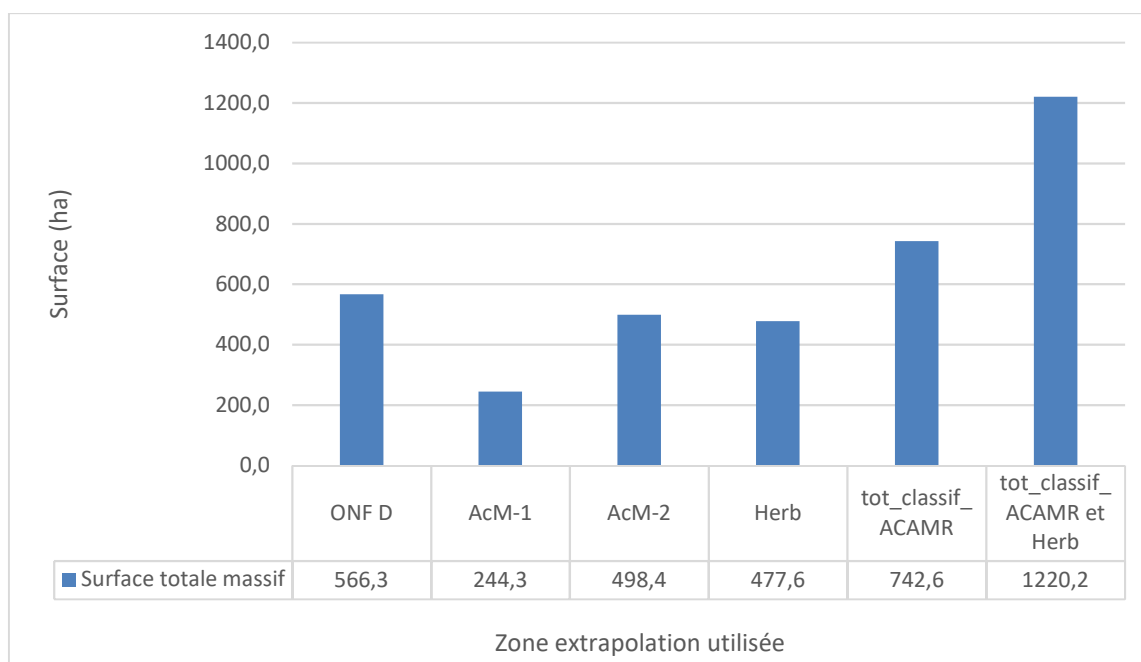


Figure 30: Surface d'extrapolation par zone à l'échelle du massif.

D'après la Figure 30, la surface classée en acacia selon la classification par télédétection est supérieure à la surface donnée par l'ONF. En considérant que la zone Herb a également un volume d'acacia significatif, l'écart en termes de surface est très important (+115%) par rapport à la zone ONF D.

ANNEXE 10 : VOLUME MOYEN PAR ZONE D'EXTRAPOLATION

Le Volume moyen est calculé comme la moyenne des placettes appartenant à chaque zone.

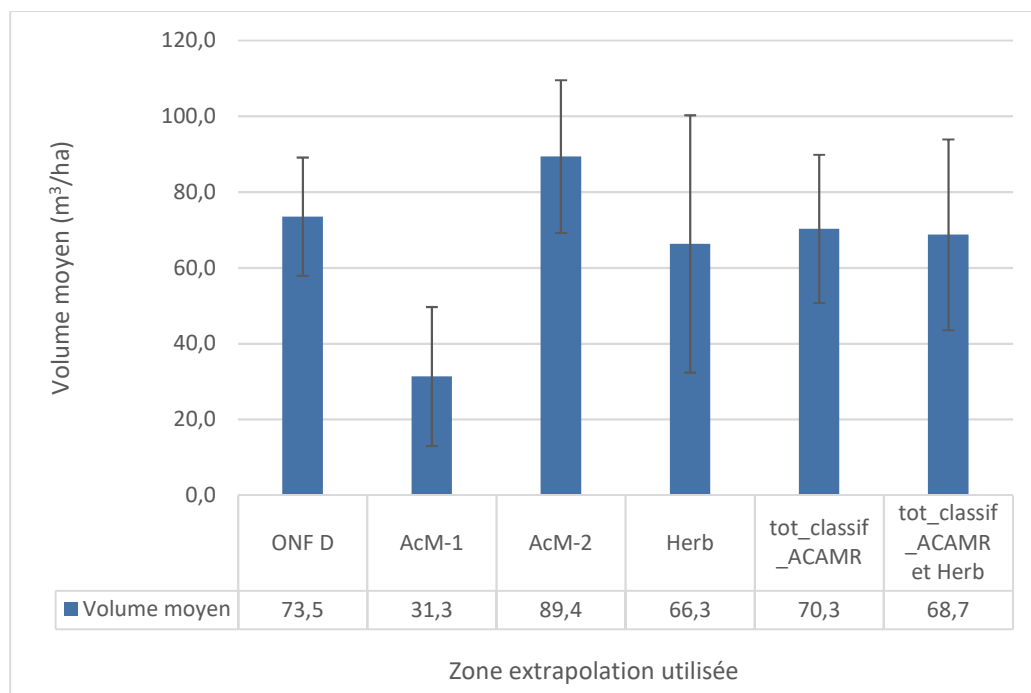


Figure 31 : Volume moyen extrapolé par zone à l'échelle du massif. Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle de confiance à 95%.

ANNEXE 11 : DETAIL DES ZONES INVENTORIEES

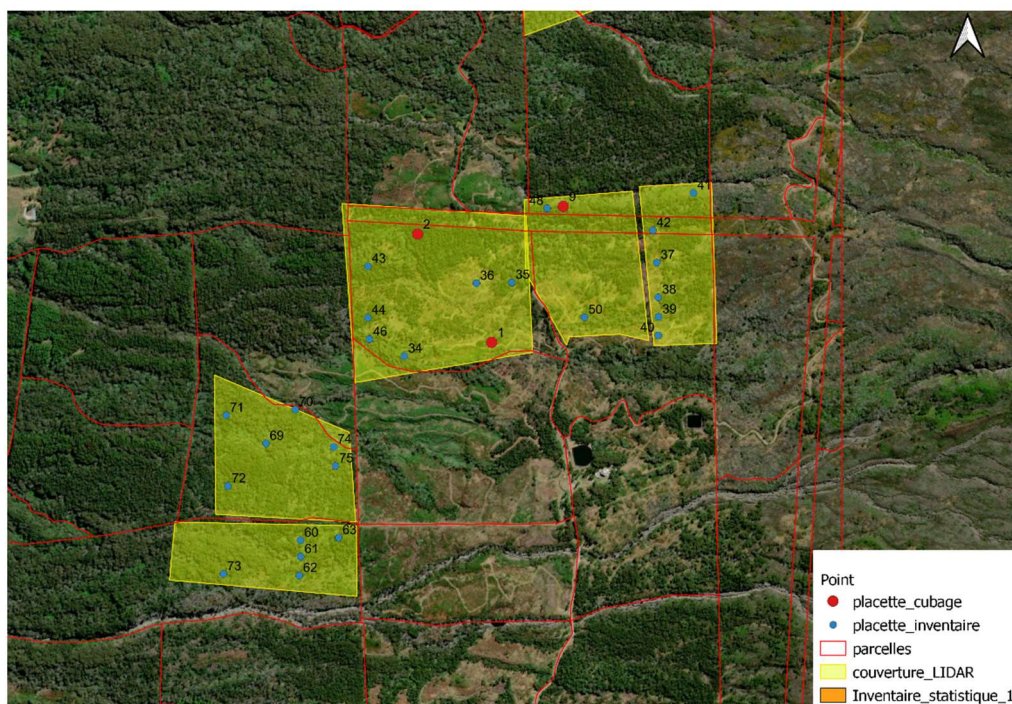


Figure 32 : Zone 1

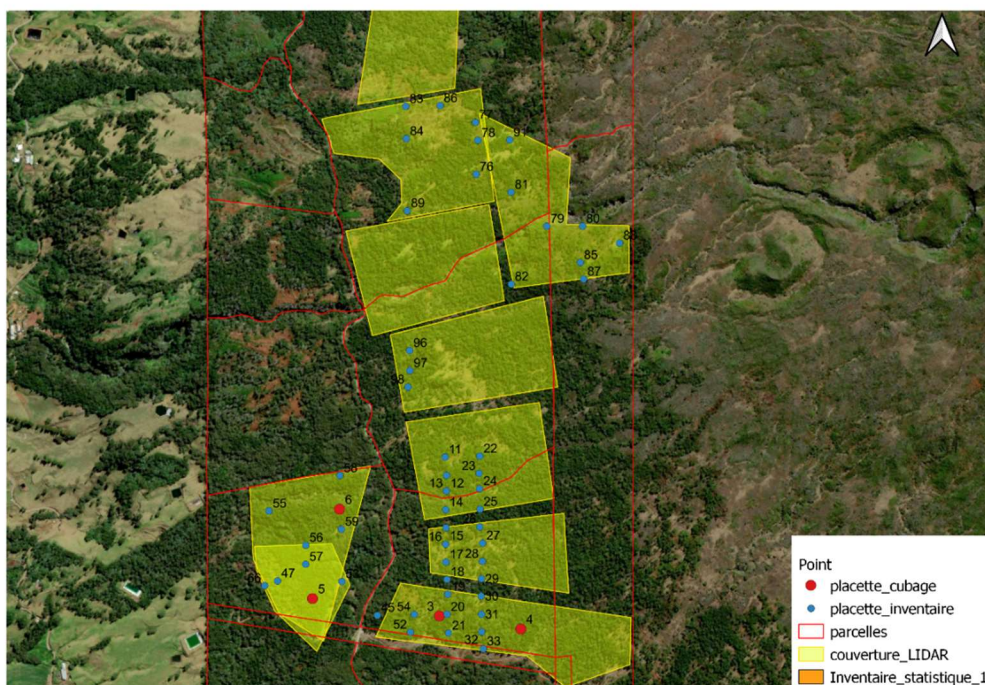


Figure 33 : Zone 2

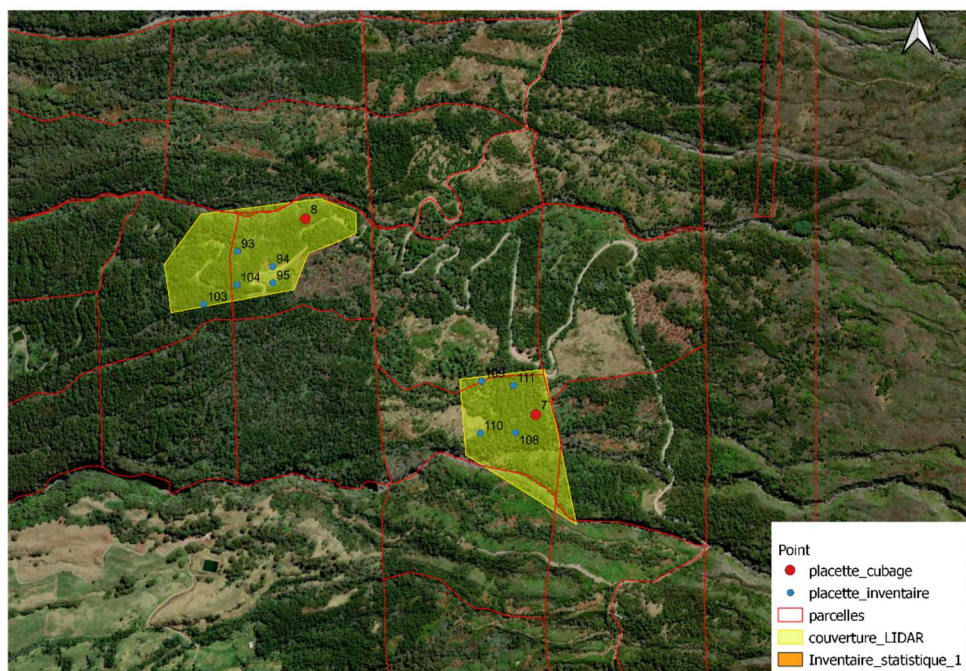


Figure 34 : Zone 3