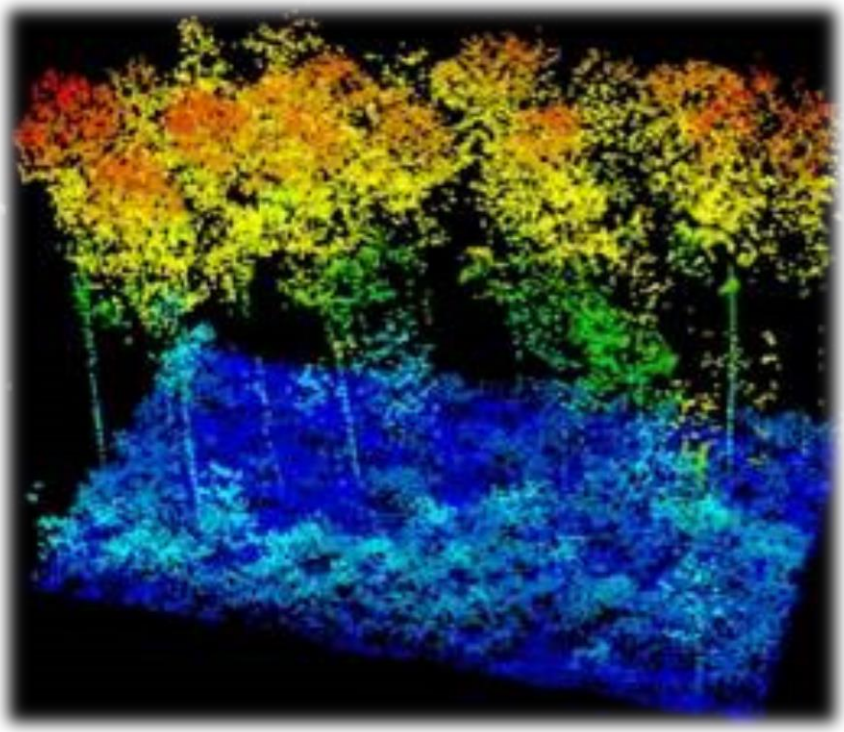
Apport de la télédétection dans l'élaboration d'aménagements forestiers



Mémoire de dominante d'approfondissement :

Gestion forestière

Présenté par : Rémy REVERDY

Stage effectué du 04/03/2019 au 18/08/2019
A l'agence ONF de Metz, 1 rue Thomas Edison 57070 Metz

Maitre de stage : Pierre-Jean MOREL
Enseignent référent : Max BRUCIAMACCHIE

Soutenu le : 30/08/2019

Année 2018/2019

Fiche signalétique d'un mémoire

Rédigé dans le cadre d'études à AgroParisTech

Titre : Apport de la télédétection dans l'élaboration d'aménagements forestiers	
Auteur : Rémy Reverdy	Mots clés : télédétection, aménagements forestiers, LiDAR
Stage assistant ingénieur ☐ Dominante d'approfondissement ☒ CEI ☐ Autre ☐	Date de fin de rédaction : 15/08/2019
Caractéristiques : 75 pages ; 15 figures ; 3 annexes ; bibliographie.	
Organisme d'accueil : Agence ONF de Metz Nom du maître de stage : MOREL Pierre-Jean Fonctions dans l'organisme : Directeur de l'agence ONF de Metz Nom du référent AgroParisTech : BRUCIMACCHIE Max	

Résumés français et en d'autres langues :

J'ai réalisé mon stage de fin d'étude d'école d'ingénieur forestier au sein de l'agence ONF de Metz durant 6 mois.

Ce mémoire traite de l'apport de la télédétection (observation d'une cible à distance) dans la gestion forestière et plus particulièrement, dans l'élaboration des aménagements forestiers. C'est un thème d'actualité qui fait couler beaucoup d'encre depuis quelques années et qui symbolise certainement l'avenir de la gestion forestière. Ce sujet de stage a vu le jour suite à l'interrogation de l'agence ONF de Metz qui était de savoir comment faire face à une vague importante d'aménagements forestiers à réviser dans les années à venir, dans le sud de l'agence.

Ce mémoire apporte donc des informations sur le contenu des aménagements forestiers, sur les besoins des aménagistes en termes de données utiles. Il aborde également le fonctionnement et la disponibilité des différentes technologies de télédétection existantes, ainsi que leur apport dans le domaine forestier.

Un choix justifié de moyen de télédétection a été réalisé, afin de répondre à la problématique de l'agence de Metz concernant l'élaboration d'aménagement forestier. Le LiDAR a ainsi été retenu. Son fonctionnement, ainsi que son historique d'utilisation ont été détaillés et une étude de faisabilité pour la mise en place d'un projet LiDAR a été réalisée. Toute une partie de ce mémoire traite de la mise en place concrète du projet, allant du choix de la zone d'étude, de l'échantillonnage des placettes de calibrations LiDAR, du protocole de relevé de données, jusqu'à la rédaction du cahier des charges concernant l'achat du vol LiDAR. Enfin, une partie décrit les différentes pistes d'avenir concernant la télédétection en forêt.

I have done my internship at the end of my forest engineering study for the ONF agency in Metz for 6 months.

This thesis deals with the contribution of remote sensing (observation of a remote target) in forest management and more particularly in the development of forest management. This is a hot topic that has been in the new for a few years and certainly symbolizes the future of forest management. This subject of internship was born following the questioning of the ONF agency of Metz on how to face an important wave of forest management plans to be revised in the years to come in the south of the agency.

This thesis provides information on the content of forest management plan, on the needs of forest managers in terms of useful data. It also discusses the operation and availability of different remote sensing technologies and their contribution to forestry.

A justified choice of means of remote sensing has been made in order to respond to the problem of the Metz agency concerning the development of forest management plans. LiDAR has been retained. Its operation and its history of use were detailed and a feasibility study for the implementation of a LiDAR project was carried out. A whole part of this thesis deals with the concrete implementation of the project, from the choice of the study area, from the sampling of the LiDAR calibration plots, from the data collection protocol to the drafting of the specifications. concerning the purchase of the LiDAR flight. Finally, a part describes the various future paths concerning remote sensing in the forest sector.

AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

Engagement de non-plagiat

❶ Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.

- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée

- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.

- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive ; recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

❷ Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.

- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.

- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages *in extenso*, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

❸ Sanctions

- En cas de manquement à ces consignes, la DEVE ou le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

❹ Engagement

Je soussigné (e) Rémy Reverdy,

reconnais avoir lu et m'engage à respecter l'engagement de non-plagiat.

À Algrange le 29/08/2019.

Signature :

Cet engagement de non-plagiat doit être inséré en début de tous les rapports, dossiers, mémoires.

REMERCIEMENTS

A Pierre-Jean MOREL, directeur de l'agence ONF de Metz et tuteur de stage pour m'avoir accueilli au sein de son agence, pour toutes les connaissances qu'il m'a transmises, pour son suivi assidu, pour la relecture de ce mémoire, ainsi que pour la confiance qu'il m'a témoignée.

A Alain LARCHER, chef du service forêt, Michel BLANCHET, responsable production aménagement, Francis STUMPF, responsable système d'information géographique, Anne JOLLY, Alexandre PIBOULE, Jerome BOCK, pôle Recherche-Développement-Innovation de l'ONF, ainsi qu'à toutes les autres personnes ayant pris part à ce projet de près ou de loin pour leur aide et leur participation nécessaires au bon déroulement de ce stage.

A l'ensemble du personnel de l'agence de Metz, ainsi que de ses unités territoriales, pour leur chaleureux accueil et les bons moments passés à leurs côtés, pour m'avoir fait partager leur travail au quotidien et pour les connaissances qu'ils m'ont apportées.

A Max BRUCIAMACCHIE, professeur référant pour m'avoir soutenu et guidé sur le sujet quand cela a été nécessaire.

A Murielle, Hélène ainsi qu'à l'ensemble de mes proches pour leur soutien et pour le temps qu'ils ont passé à relire ce mémoire.

Table des matières

INTRODUCTION 7

1 Acquisition d'informations pour l'élaboration d'aménagements forestiers 8

1.1 Les aménagements forestiers 8

1.1.1 Définition, généralités et contenu 8

1.1.2 Les étapes d'élaboration d'un aménagement forestier 9

1.2 Différentes sources d'informations 10

1.2.1 Archives 11

1.2.2 Données de terrain 11

1.2.3 Données numériques de télédétection 15

2 Données utiles pour les aménagistes et savoir-faire en télédétection 17

2.1 Attentes des aménagistes 17

2.2 Etat des lieux sur l'utilisation de la télédétection en forêt 19

3 Choix du LiDAR pour l'élaboration d'aménagement forestier 23

3.1 Principe et fonctionnement 23

3.2 Méthodes de modélisation 24

3.3 Historique de l'utilisation du LiDAR et retour d'expérience au sein de l'ONF 24

3.4 Récapitulatif des apports du LiDAR pour la gestion forestière : données brutes et données dendrométriques 26

3.5 Des domaines d'application des données LiDAR nombreux 28

4 Etude de faisabilité et mise en place d'un vol LiDAR sur l'agence de Metz 29

4.1 Choix de la technologie LiDAR 29

4.1.1 Attentes par rapport au LiDAR 29

4.1.2 Livrables attendus et sélectionnés 30

4.2 Déroulement générique d'un projet LiDAR 30

4.3 Définition du projet 32

4.3.1 Zone d'étude 32

4.3.2 Caractéristiques du vol 35

4.3.3 Mise en place des placettes de calibration et protocole 36
4.3.4 Intégration du LiDAR dans le processus d'élaboration d'aménagements 39
4.4 Moyens mis en place pour le projet 41
4.4.1 Achat du vol CCTP 41
4.4.2 Ressources humaines et formations 41
4.5 Analyse économique 42
4.5.1 Scénario habituel sans le LiDAR 42
4.5.2 Scénario avec le LiDAR 43
4.6 Calendrier prévisionnel du projet 45
4.7 Partenariat et mutualisation 45
4.7.1 Coût du LiDAR, pourquoi mutualiser ? 45
4.7.2 Freins à la mutualisation 46
4.7.3 Scénarios pour l'acquisition par l'agence ONF de Metz 47
5 Pistes d'avenir en télédétection 48
5.1 Une nouvelle technologie de télédétection : la photogrammétrie 48
5.2 Un matériel de plus en plus performant 48
5.3 Amélioration des modèles et des approches en télédétection 50
CONCLUSION 51
BIBLIOGRAPHIE 52
LISTE DES CONTACTS 53
Annexe 1 : CCTP vol LiDAR 55
Annexe 2 : Protocole de relevé de données sur les placettes de calibration 62
Annexe 3 : Fiche de projet à l'intention de la DT Grand-Est 70

TABLES DES FIGURES

Figure 1 : Les différentes résolutions d'une image de télédétection 16

Figure 2 : Matrice SWOT technologie optique 20

Figure 3: Matrice SWOT technologie RADAR 21

Figure 4 : Matrice SWOT technologie LiDAR 22

Figure 5 : Le LiDAR une technologie multi-échos 23

Figure 6 : Classification des points LiDAR 26

Figure 7 : Tableau récapitulatif de la qualité des livrables LiDAR 27

Figure 8 : Chaîne de traitement pour la mise en place d'un projet LiDAR 31

Figure 9 : Agence de Metz et ses UT 32

Figure 10 : Zone d'étude du projet LiDAR 33

Figure 11 : Liste des forêts situées dans la zone d'étude 34

Figure 12 : Zone d'étude N2 du projet LiDAR 34

Figure 13 : Code structure des peuplements 37

Figure 14 : Les différentes strates pour l'échantillonnage des placettes de calibration 37

Figure 15 : Image obtenue avec LiDAR terrestre 49

LISTE DES ABREVIATIONS

ABA : Area Based Approach

AE : Acte d'Engagement

BDR : Base de Données Régénération

CBPS : Code de Bonnes Pratiques Sylvicoles

CCAP : Cahier des Clauses Administratives Particulières

CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières

CRAIG : Centre Régional Auvergnat d'Information Géographique

CRPF : Centre Régional de la Propriété Forestière

DCM : Délibération du Conseil Municipal

DFCI : Défense des Forêts Contre les Incendies

DFRN : Direction Forêts et Risques Naturels

DG : Direction Générale

DNAG : Directives Nationales d'Aménagement et de Gestion

DRA : Directives Régionales d'Aménagement

DRAC : Direction Régionale des Affaires Culturelles

DRAF : Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt

EAM : Elaboration d'Aménagements forestiers

EPIC : Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial

FCBA : Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement

FOU : Fourré

FUT : Jeune futaie

FWF : Full Wave Form

GAU : Gaulis

GPS : Global Positioning System

IGN : Institut National de l'information Géographique et forestière

INS : Inertial Navigation System

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

ITA : Individual Tree Approach

LPO : Ligue pour la Protection des Oiseaux

MNH : Modèle Numérique de Hauteur

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : Modèle Numérique de Terrain

ONAG : Orientations Nationales d'Aménagement et de Gestion

ONF : Office National des Forêts

PER : Perchis

PNR : Parc Naturel Régional

PSG : Plan Simple de Gestion

RC : Règlement de Consultation

RGD 73-74 : Régie de Gestion des Données des Pays de Savoie

RTG : Règlement Type de Gestion

RTM : Restauration des Terrains en Montagne

RUT : Responsable d'Unité Territoriale

SEM : Semis

SIG : Système d'Information Géographique

SPL : Single Photon LiDAR

SRA : Schémas Régionaux d'Aménagement

TFT : Technicien Forestier Territorial

TSF : Taillis Sous Futaie

UED : Unité Elémentaire de Description

UG : Unité de Gestion

UT : Unité Territoriale

INTRODUCTION

Le point de départ de la télédétection, défini simplement comme l'observation d'une cible à distance, peut être repéré par la première photographie aérienne prise par Nadar en 1858 depuis un ballon. La télédétection a ensuite évolué avec le développement de l'aviation et l'apparition de nouveaux vecteurs (avions, satellites, drones…). Les premières applications de la télédétection ont été d'ordre militaire pour des besoins de reconnaissance. Le principal capteur utilisé a longtemps été la chambre photographique argentique ; depuis, il a été remplacé par la technologie numérique et l'apparition de nouveau capteurs (RADAR, LiDAR).

L'apparition des satellites a également marqué une nouvelle ère dans la télédétection. Le premier satellite (TIROS-1) à délivrer des images de la terre fut mis en orbite autour de la Terre en 1960 par les américains à des fins météorologiques. Depuis, beaucoup de satellites l'ont rejoint qui permettent une couverture totale et permanente de la Terre.

Les applications de la télédétection sont multiples : géologie, étude des océans, catastrophe naturelle, génie civil, cartographie de l'occupation des sols, agriculture… Mais depuis quelques années, la télédétection a également fait son entrée dans le domaine forestier.

Il est vrai que depuis longtemps, l'homme a essayé de cartographier ses forêts, afin de connaître au mieux son territoire. C'est ainsi que vit le jour, la première carte forestière : la carte de Cassini, commandée par Louis XIV au 18ème siècle. Résultat d'un travail de plus de 60 ans, qui a permis de connaître les limites de nos forêts. En 1987, l'Institut Géographie National (IGN) décide de cartographier la limite des forêts, mais également les essences majoritairement présentes de façon révolutionnaire, c'est-à-dire, derrière un écran, en utilisant des photographies aériennes ; ce qui prendra tout de même 17 ans, avant de terminer cette carte à l'échelle nationale. Depuis, le développement de l'intelligence artificielle, via des algorithmes, permet d'automatiser de plus en plus de cartographies.

L'Office National des Forêts (ONF) créée en 1964 sous forme d'Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC) est en charge de la gestion durable de l'ensemble des forêts publiques, qu'elles soient domaniales ou communales. Dans le cadre de cette mission, l'ONF a donc compris tout l'intérêt de la télédétection et a mis en place, depuis maintenant quelques mois, un plan stratégique pour le déploiement opérationnel de la télédétection à des fins de gestion forestière et plus particulièrement pour l'élaboration et le suivi d'aménagements forestiers.

Ce mémoire aborde donc les apports de la télédétection dans l'élaboration d'aménagements forestiers, afin de répondre à la problématique soulevée par l'agence ONF de Metz : comment répondre à une vague importante d'aménagements à réviser dans les années à venir ?

Dans un premier temps, nous verrons comment est construit un aménagement forestier et à quoi il sert. Dans un deuxième temps, nous verrons quelles sont les attentes des aménagistes en termes d'informations utiles et dans quelles mesures les différents moyens de télédétection peuvent y répondre. Puis, la partie suivante développera, le moyen de télédétection retenu, pour répondre à la problématique de l'agence de Metz. Ensuite, une étude de faisabilité, ainsi qu'une description de la mise en place concrète du projet de télédétection sera rédigée. Enfin, dans une dernière partie, nous verrons quelles sont les pistes d'amélioration à exploiter à l'avenir en télédétection, afin de répondre au mieux aux besoins des aménagistes.

1 Acquisition d'informations pour l'élaboration d'aménagements forestiers

1.1 Les aménagements forestiers

Les milieux forestiers sont particuliers du fait de leur complexité, de leur fragilité ou encore de leur évolution parfois inattendue. La plupart des actions que l'homme exerce sur ces milieux vont donc avoir une répercussion. En effet, les conséquences négatives ou positives engendrées par ces actions peuvent être immédiatement visibles ou au contraire, se matérialiser des années après. Ces effets sont également irréversibles sur le court terme. Les travaux effectués dans une forêt sont généralement réalisés dans le but d'obtenir un résultat après une longue période, c'est pourquoi, il faut que les efforts soient répétés avec cohérence, assiduité et continuité, pour atteindre un objectif fixé en amont.

Ces actions ne peuvent donc pas être réalisées au hasard, elles doivent, au contraire, « être réfléchies et décidées en fonction d'objectifs bien définis et organisées dans le temps et l'espace ». C'est donc là, tout le rôle de l'aménagement forestier.

1.1.1 Définition, généralités et contenu

En France, les documents d'aménagement forestier diffèrent selon qu'il s'agisse de la forêt privée ou de la forêt publique.

Pour information, en forêt privée, ce document est appelé « Plan Simple de Gestion » (PSG), il est obligatoire pour les propriétaires qui ont une surface de forêt supérieure à 25 ha et facultatif pour les autres, il doit être validé par le Centre Régional de la Propriété Forestière (CRPF). Le principe du PSG est proche de celui du document d'aménagement de la forêt publique mais ne nécessite pas une précision aussi importante que ce dernier. Il existe également d'autres document de gestion pour la forêt privée comme le Code de Bonnes Pratiques Sylvicoles (CBPS) ou le Règlement Type de Gestion (RTG) qui sont plutôt utilisés sur des petites propriétés. Ces documents permettent aux propriétaires d'éviter les démarches administratives lors de l'exploitation de leur bois, d'obtenir certaines subventions ou avantages fiscaux et enfin de pouvoir dans certains cas prétendre à une certification en prouvant la gestion durable de leur forêt.

La forêt publique, qu'elle soit domaniale ou propriété de collectivités, est la plupart du temps soumise au régime forestier et donc gérée par l'Office National de Forêts (ONF). Le document de gestion s'appliquant à ces forêts s'appelle un « aménagement forestier ». Il est rédigé par un aménagiste de l'ONF et il est actuellement valable 20 ans, après quoi il devra être révisé.

En amont de l'aménagement forestier propre à chaque forêt, on retrouve des textes de portée nationale comme les Directives Nationales d'Aménagement et de Gestion (DNAG) et les Orientations Nationales d'Aménagement et de Gestion (ONAG) définissant les principes fondamentaux qui doivent guider les gestionnaires dans la rédaction des aménagements forestiers. Des documents de portée régionale ou locale comme les Directives Régionales d'Aménagement (DRA) pour les forêts domaniales et les Schémas Régionaux d'Aménagement (SRA) pour les forêts communales viennent compléter les textes nationaux et représentent en quelque sorte la « boite à outils » de l'aménagiste. Au sein de l'ONF, il existe aussi une note de service, la NDS-13-G-1833, concernant l'élaboration des aménagements forestiers, leur adaptation par rapports aux différents enjeux et dans laquelle se trouve la structure type à suivre pour rédiger un aménagement.

L'aménagement forestier, en France, est constitué de trois grandes parties :

- Etat des lieux – bilan
- Propositions de gestion : objectifs, principaux choix, programme d'actions
- Récapitulatifs –indicateurs de suivi

Dans la première partie « état des lieux – bilan » on retrouve les informations générales concernant la forêt comme la localisation, la surface, le foncier ou encore la période d'aménagement. Les analyses du milieu naturel se trouvent également dans cette partie ce qui permet d'obtenir des informations sur la topographie, la géologie et les sols (carte des stations), les types de peuplements forestiers (carte des peuplements) ou encore sur les espèces animales ou végétales remarquables, présentes dans la forêt.

On retrouve aussi ici, l'analyse des principales fonctions de la forêt qui sont au nombre de quatre :

- la fonction de production ligneuse,
- la fonction écologique,
- la fonction sociale,
- la fonction de protection contre les risques naturels.

Enfin, cette partie de l'aménagement contient toujours une analyse de la gestion passée.

La seconde partie « propositions de gestion » est une partie dans laquelle on retrouve la synthèse de l'état des lieux faite précédemment, ainsi que les objectifs de gestion retenus.

En découle alors les principaux choix en termes de zonage, d'essences objectifs, de critère d'exploitabilité ou encore de traitements sylvicoles, pour atteindre les objectifs recherchés. Enfin, c'est à cet endroit que sera explicité le programme d'actions concernant chaque fonction de la forêt (programme des coupes et travaux, programme d'actions spécifiques liées à la biodiversité…).

Pour terminer, la dernière partie « récapitulatifs – indicateurs de suivi » fait part d'un bilan économique et financier prévisionnel pour la durée de l'aménagement, qui se base sur les récoltes de bois escomptées et les investissements nécessaires. On y retrouve également quelques indicateurs qui permettront la mise en œuvre et le suivi de l'aménagement forestier.

1.1.2 Les étapes d'élaboration d'un aménagement forestier

L'élaboration d'un aménagement forestier débute généralement par une « réunion de démarrage », qui s'effectue en interne avec les gestionnaires : le Responsable d'Unité Territoriale (RUT), le Technicien Forestier Territorial (TFT) qui est responsable de l'application de l'aménagement, l'aménagiste (responsable du projet d'aménagement) et le responsable du pôle aménagement. C'est à cette étape que sont abordés les points suivants :

- Etat des lieux de la forêt : foncier, desserte, les peuplements forestiers, difficultés rencontrées, état sanitaire…
- Application de l'ancien aménagement.
- Relation avec la commune et pôle d'intérêt de la commune (pour les forêts communales)
- Acteurs en relation avec la forêt.
- Discussion sur les différents enjeux liés à la forêt en question (production, social, écologique, protection)

C’est une étape très importante qui permet de dresser un premier bilan sur la forêt. La plupart des informations sont fournies par le technicien de terrain qui est le seul à connaitre parfaitement sa forêt. De là, en découlent les objectifs à viser ainsi que la préparation de la phase terrain pour la récolte de données.

Pour les forêts communales, s’en suit normalement une première rencontre avec la commune pour connaître leurs attentes concernant l’aménagement forestier.

Arrive ensuite la phase de terrain qui permettra de récolter les données nécessaires à la mise à jour de l’état des lieux de la forêt. Ce relevé de données est généralement défini selon deux méthodes complémentaires : la méthode de description à l’avancement et la méthode d’inventaire, qui seront abordées dans la *partie 1.2.2*.

Une deuxième rencontre avec la commune suit normalement cette phase de terrain. Toutefois, notons bien que généralement une seule rencontre avec la commune est organisée et elle a plutôt lieu après la phase terrain. Ceci permet entre autre de connaître les différentes contraintes liées à la forêt avant de fixer les objectifs avec le propriétaire. A ce moment un point est également abordé avec la commune concernant le résultat de l’ancien aménagement.

Pour les forêts domaniales, c’est un peu différent, car les communes ne sont pas rencontrées à ce stade-là. Elles sont simplement prévenues de la révision d’aménagement et amenées à s’exprimer le cas échéant sur des souhaits particuliers, puis informées sur le projet en fin d’étude, lors d’une présentation. D’autre part, une tournée terrain, en interne ONF, est organisée avec la présence de la Direction Territoriale (DT) pour présenter les grands objectifs, les principales contraintes ou encore l’effort de régénération attendu. Pour les domaniales de plus de 2 000 ha cette tournée est organisée directement avec la Direction Forêts et Risques Naturels (DFRN) représentant la Direction Générale (DG) de l’ONF.

Suite à ces phases de rencontre, si tout est validé par les communes, par la DT ou la DG, commence normalement la rédaction de la deuxième partie de l’aménagement (définition des objectifs, plan d’actions) et du bilan par l’aménagiste selon le plan exposé précédemment.

L’aménagement est ensuite présenté au conseil municipal pour les forêts communales et devant les communes de situation et d’autres acteurs comme les chasseurs, les Parcs Naturels Régionaux (PNR) ou diverses associations d’usagers de la forêt, pour les forêts domaniales. Lors de cette présentation, le TFT, gestionnaire et responsable de l’application de l’aménagement doit obligatoirement être présent avec, en principe l’aménagiste à ses côtés. Pour les forêts communales, l’aménagement est alors validé ou non, suite à une « Délibération du Conseil Municipal » (DCM).

Enfin, le ministère de l’agriculture et de l’environnement ou la Direction Régionale de l’Agriculture et de la Forêt (DRAF) doivent donner leur approbation via un arrêté ministériel ou préfectoral, concernant les aménagements respectifs des forêts domaniales et communales.

1.2 Différentes sources d’informations

Comme expliqué précédemment, l’aménagement forestier est constitué d’une partie « état des lieux – bilan » et afin de rédiger cette partie, il faut obtenir des données sur la forêt concernée par l’aménagement. Ces informations sur la forêt peuvent être acquises de différentes façons.

1.2.1 Archives

La première source d'information sur une forêt est la mémoire du TFT en charge de celle-ci, c'est pourquoi le TFT est très important lors de la révision d'un aménagement ; c'est lui qui va apporter la majeure partie des connaissances relatives à sa forêt. Toutefois la seule mémoire du TFT n'est pas suffisante car il peut ne pas se souvenir de tout ou en fonction du contexte, ne pas être en mesure d'assurer la transmission de ses connaissances à son successeur.

Il existe donc un outil qui permet de conserver les informations sur les actions réalisées sur une forêt ; c'est « le sommier ». C'est un document écrit, mis en place sous l'aire de l'administration des eaux et forêts et conservé par l'ONF, qui est archivé par massifs forestiers et par parcelles. Il retrace la « vie » d'une forêt et on y retrouve des informations concernant la sylviculture pratiquée, les travaux forestiers réalisés, l'exploitation forestière. Toutes ces informations sont datées et très souvent les montants investis ou récoltés sont indiqués.

Lors de la révision d'un aménagement, les aménagistes utilisent de nombreuses données de l'ancien aménagement. En effet, la délimitation des peuplements par exemple est construite à partir de l'ancien aménagement et mise à jour grâce à des relevés Global Positioning System (GPS) sur le terrain ou à de la photo-interprétation à partir d'ortho photographies. L'ancien aménagement donne également des informations concernant une partie du réseau de desserte forestière. Toutes les informations cartographiques qui se trouvent dans les anciens aménagements sont également stockées sous format numérique dans les bases de données du Système d'Information Géographique (SIG) de l'ONF.

Il existe également d'autres bases de données concernant les forêts gérées par l'ONF. Ces informations sont issues du Système d'Information de l'ONF et peuvent être utilisées lors de la révision d'un aménagement. La Base de Données Régénération (BDR) par exemple permet d'avoir des informations concernant le type de peuplement d'une forêt et surtout des informations sur les peuplements en régénération (surface, hauteur peuplement…). Le logiciel PROD BOIS utilisé à l'ONF peut également servir aux aménagistes pour récupérer des informations concernant l'exploitation passée. D'autres informations, comme le suivi des coupes et travaux de la période passée, le bilan financier ou encore la mise en œuvre du plan de chasse peuvent aussi être retrouvées dans ces bases de données.

Enfin, notons tout de même que les aménagistes peuvent obtenir des informations supplémentaires par l'intermédiaire d'autres structures comme la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC) concernant les vestiges archéologiques en forêt ou encore la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) pour des informations relatives aux oiseaux.

1.2.2 Données de terrain

En Moselle, il existe deux manières de récolter des données dendrométriques sur le terrain :

- la méthode de description à l'avancement
- la méthode d'inventaire statistique

Les protocoles utilisés pour la récolte de données sur le terrain sont, la plupart du temps, issus d'une directive nationale. Notons cependant que sur une même forêt, différents protocoles peuvent être utilisés et les méthodes de description à l'avancement et d'inventaire peuvent être complémentaires l'une de l'autre. En effet, une forêt n'est pas toujours homogène et les méthodes de relevé de terrain vont donc varier en fonction des types de peuplements, des différents enjeux (production, biodiversité, social) ou encore de demandes particulières d'une commune, par exemple. Des Unités Elémentaires de Description (UED) sont alors définies au préalable au sein d'une forêt, sur lesquelles les méthodes de relevé de données pourront donc être différentes.

1.2.2.1 Description à l'avancement

La description à l'avancement est une évaluation plutôt qualitative, « à dire d'expert ». Elle consiste à parcourir la forêt et à recueillir des informations utiles à l'élaboration des aménagements forestiers.

Elle est surtout utilisée pour les jeunes peuplements en futaie régulière où les arbres ne sont pas pré comptables ou pour des peuplements très homogènes. L'aménagiste va donc estimer la proportion des différentes essences présentes, la densité de tiges ou encore la hauteur moyenne. Cette information concernant la hauteur est très importante puisque la programmation des différents travaux sylvicoles ou des éclaircies se base très souvent sur celle-ci.

Cette méthode de récolte de données peut être également appliquée sur des forêts de faible surface, sur lesquelles un inventaire statistique ne serait pas pertinent ou encore sur des peuplements à enjeu de production faible.

1.2.2.2 Inventaire

C'est une méthode qui se différencie de la description à l'avancement car elle est quantitative, les données obtenues sont donc plus précises et mieux maîtrisées.

Afin de choisir l'inventaire qui convient bien à la description de la forêt, il y a différentes étapes :

- Connaitre l'objectif de l'inventaire
- Choisir le type d'inventaire (pied à pied ou statistique)
- Choisir le type de placette (temporaire ou permanente puis angle fixe ou surface fixe…)
- Choisir le plan d'échantillonnage (aléatoire simple, systématique…)
- Choisir l'effort d'échantillonnage (nombre de placettes, taille des placettes)

1.2.2.2.1 Inventaire en plein ou pied à pied

Il consiste à relever tous les arbres pré comptables par essence et par classe de diamètres sur une surface déterminée.

C'est une méthode simple à mettre en place, précise à l'échelle du domaine inventorié et qui donne un bon résultat sur la répartition des diamètres. Toutefois, elle présente quelques inconvénients. Tout d'abord, c'est une méthode répétitive et lassante, qui peut donc entraîner une sous-estimation, allant jusqu'à 10 %, sur des surfaces importantes, dû à l'erreur humaine. De plus, même si elle est précise au niveau du domaine inventorié, l'estimation des données à l'hectare à partir de cette méthode l'est beaucoup moins et il est difficile d'ajouter d'autres variables supplémentaires lors du relevé de terrain. Enfin, le coût d'un inventaire pied à pied est directement proportionnel à la surface, ce qui est donc à proscrire sur des grandes forêts.

Sur l'agence ONF de Metz, cette méthode d'inventaire est encore utilisée. L'inventaire pied à pied est en général dédié aux parcelles en cours de régénération ou à passer en régénération, repérées lors de la réunion de démarrage, afin d'obtenir une information précise sur la ressource s'y trouvant et donc d'améliorer le bilan prévisionnel des coupes. Exceptionnellement, cela permet de faire le meilleur choix pour la définition du groupe de régénération. C'est une pratique d'usage à l'agence de Metz. Les petites parcelles sur lesquelles un inventaire statistique ne serait pas représentatif peuvent également être inventoriées en plein.

1.2.2.2.2 Inventaire statistiques

Les inventaires statistiques consistent à échantillonner une forêt par l'intermédiaire de placettes, pour éviter de devoir compter tous les arbres présents sur le domaine à inventorier. Les résultats obtenus suite à ces inventaires, vont permettre de décrire les différents peuplements forestiers en utilisant le guide de typologie : « Peuplements forestiers feuillus du Plateau lorrain ».

Placette temporaire :

Les placettes temporaires ne sont pas matérialisées sur le terrain, elles ne serviront donc qu'une seule fois pour l'inventaire et il ne sera pas possible de retrouver leur position exacte par la suite. Leur utilisation se justifie surtout lorsqu'elles sont mises en œuvre au travers d'un inventaire typologique, c'est-à-dire lorsque les données récoltées permettent d'entrer dans une clé d'identification issue d'un guide de peuplement. Sur l'agence de Metz, c'est le guide « peuplements forestiers feuillus du Plateau lorrain » qui est utilisé.

Il existe une multitude de types de placettes différentes, cependant je mentionnerai seulement les deux plus répandues : les placettes à angle fixe ou placettes relascopiques et les placettes à surface fixe.

Placette à angle fixe :

Sur ce genre de placette il faut se placer au centre de la placette et relever au relascope la surface terrière par essence et par catégorie de bois, ce qui permettra l'obtention d'une information sur la structure horizontale du peuplement. On prend en compte tous les arbres dont le diamètre apparent à 1,30 m vu du centre de la placette est supérieur à un angle horizontal fixé au préalable.

L'implantation de ce genre de placette est très simple et ces placettes s'avèrent être précises quant à la mesure de la surface terrière par hectare. Cependant, la placette relascopique est assez difficile à appréhender conceptuellement, ce qui entraîne donc parfois des erreurs dans la prise de données. De plus, lorsque la visibilité n'est pas bonne (sous étage trop dense) certains arbres ne pourront pas être observés depuis le centre de la placette ce qui induira également des erreurs. Notons toutefois que les placettes relascopiques peuvent être réalisées selon une autre méthode : au lieu de rester au centre de la placette, l'observateur navigue d'arbre en arbre. Il mesure alors le diamètre des arbres au centimètre près ainsi que la distance séparant l'arbre du centre de la placette. Le rapport entre le diamètre de l'arbre et la distance permet alors de savoir s'il faut inventorier l'arbre ou non. Cette méthode est plus chronophage mais évite les oublis lorsque la végétation est dense et permet de s'assurer d'inventorier correctement les arbres. Cette méthode s'avère donc plus précise que l'utilisation du relascope depuis le centre de la placette.

Tout comme l'inventaire en plein, cette méthode d'inventaire par placette à angle fixe est coûteuse pour de grandes surfaces. En effet, un binôme peut réaliser environ 25 placettes par jour. En sachant qu'environ une placette est réalisée par hectare, la surface inventoriée sera donc seulement de 25 ha en une journée.

Au niveau de l'agence de Metz, on utilise des placettes relascopiques à partir d'un maillage d'un point par hectare, voire un point tous les deux hectares pour les jeunes peuplements homogènes.

Placette à surface fixe :

Les placettes à surface fixe ont un périmètre bien délimité et peuvent être de différentes formes mais la plupart du temps, elles sont circulaires. Leur nombre est à définir en fonction de la précision recherchée dans les estimations et ces placettes doivent au minimum contenir une dizaine d'arbres.

Le principe de relevé de données est proche de l'inventaire pied à pied, mais sur une surface bien plus petite. Une fois la placette délimitée, on relève alors les tiges pré comptables par essence et par classe de diamètre mais la taille réduite des placettes permet également de prendre d'autres données comme le nombre de perches d'avenir, le pourcentage de recouvrement de la régénération ou d'autres données comme le bois mort au sol, les dégâts fait par le gibier…

Le concept de placette à surface fixe est très simple à appréhender, l'implantation est facile à concevoir même si elle peut parfois être difficile à mettre en œuvre à cause d'une pente importante, d'un relief escarpé ou des arbres se trouvant sur la limite de la placette. Les résultats fournis peuvent être étudiés théoriquement très facilement. La mesure de la densité de tiges par hectare est plus précise qu'avec des placettes relascopiques. Cependant, comme pour l'inventaire en plein ou l'inventaire relascopique, le coût est proportionnel au nombre de placettes réalisées et donc généralement élevé pour une surface forestière importante.

Placette permanente :

Contrairement aux placettes temporaires, ces placettes permanentes sont installées pour durer dans le temps afin qu'on puisse y retourner des années plus tard et reprendre des données. Comme les placettes temporaires, elles peuvent être relascopiques ou à surface fixe. Pour être repérées, le centre de ces placettes et matérialisé par un piquet métallique planté dans le sol et ne dépassant pas la surface de la terre, afin de ne pas influencer la gestion sur cette zone précise. Ces placettes seront retrouvées plus tard grâce à des détecteurs de métaux. La différence majeure par rapport aux placettes temporaires réside dans le fait que les arbres présents sur une placette permanente doivent être repérés avec azimut et distance par rapport au centre de la placette pour les retrouver quelques années plus tard et les mesurer à nouveau afin d'obtenir une notion d'accroissement ; c'est pour cela qu'une placette permanente est en général plus longue à réaliser qu'une placette temporaire (en moyenne 10% de temps supplémentaire).

De plus en plus de réseaux de placettes permanentes sont installés en forêt. Comme vu précédemment, les placettes temporaires qu'elles soient relascopiques ou à surface fixe sont généralement très coûteuses sur des surfaces importantes puisqu'il faut en réaliser un grand nombre. Cependant, dans certains cas, comme par exemple dans une forêt aux peuplements très homogènes, le nombre de placette à réaliser pourra être fortement réduit tout en restant statistiquement fiable. Dans un premier temps, les placettes permanentes permettent donc de réduire le coût sur des forêts de grandes surfaces. En effet, un réseau constitué de placettes permanentes, installées, tous les 5 à 10 ha peut être suffisant pour obtenir des résultats statistiques représentatifs d'une forêt. Le nombre de placettes permanentes à installer sera donc fortement réduit par rapport à des placettes temporaires. Deuxièmement, si l'on veut vérifier un comptage qui a été réalisé quelques temps auparavant, il sera très simple de retrouver de telles placettes et de procéder au contrôle. Enfin, les placettes permanentes, permettent d'acquérir des données dites « dynamiques » comme l'accroissement par exemple et donc, de suivre l'évolution des individus (tiges) ou des peuplements dans le temps selon différents paramètres (surface terrière, composition en essence…). Elles ne peuvent pas être obtenues avec des placettes temporaires. Ces données dynamiques comme l'accroissement sont très importantes dans le cas d'une gestion irrégulière par exemple, où la sylviculture retenue repose sur un contrôle à postériori. Le protocole de relevé sur une placette permanente peut être très complet, voire même complexe car outre les données quantitatives, il est également possible d'y ajouter des données plutôt qualitatives.

Pour conclure, l'installation de réseaux de placettes permanentes se justifie sur des forêts de surfaces importantes et dont la gestion est plutôt irrégulière. Notons enfin que les données issues de ce type de placette

seront bonnes à l'échelle de la forêt, mais bien moins précises à l'échelle de la parcelle sauf dans le cas d'un réseau de placettes très dense.

1.2.3 Données numériques de télédétection

L'observation directe des forêts lors de ces relevés de terrain peut s'avérer être parfois complexe, d'une part à cause de leur importante surface et d'autre part du fait de l'accessibilité, pas toujours optimisée. C'est pourquoi, l'utilisation de techniques de télédétection afin d'observer et caractériser, grâce à des capteurs, une cible (les forêts dans notre cas) à distance est en plein essor.

La télédétection est définie comme : « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci ».

1.2.3.1 Capteurs et vecteurs utilisés en télédétection

En télédétection il existe différents capteurs ou technologies, ils mesurent la réflexion d'un rayonnement électromagnétique et sont capables d'utiliser des informations dans divers domaines du spectre électromagnétique allant de l'ultraviolet aux micro-ondes.

Il existe deux types de capteurs :

Les capteurs dits « passifs », reçoivent les rayonnements électromagnétiques, issus d'une source d'énergie externe (souvent le soleil) et réfléchis par des cibles. C'est le cas des capteurs optiques, qui captent l'énergie lumineuse du soleil réémise par les cibles, du domaine d'ondes du visible ou moyen infrarouge. Les capteurs thermiques captent quant à eux les radiations émises par les objets en fonction de leur température dans l'infrarouge.

Les capteurs dits « actifs » ont l'avantage de ne pas dépendre d'une source d'énergie externe puisqu'ils vont eux-mêmes émettre leur propre énergie qui, une fois réfléchie par une cible sera analysée. C'est le cas des capteurs RADAR, qui mesurent la réflexion d'ondes RADAR qui sont des micro-ondes. Enfin, les capteurs LIDAR, exploitent la réflexion d'un faisceau laser afin de mesurer la distance les séparant d'un objet ; la technologie actuelle utilise plutôt le domaine d'ondes du visible, du proche au moyen infrarouge ou de l'ultraviolet.

Ces capteurs peuvent être embarqués à bord de différents vecteurs : satellites, avions, hélicoptères, ULM ou drones. Finalement, c'est la combinaison entre le capteur et le vecteur qui va conditionner les caractéristiques des informations obtenues qui peuvent être décomposées en trois critères.

Ces différents vecteurs vont surtout conditionner la **résolution spatiale** (finesse géométrique) des données acquises. Les données obtenues par satellite seront en général moins fines (résolution d'une centaine de mètres à une dizaine de centimètre pour les plus précis) que par les autres vecteurs, pouvant fournir une résolution centimétrique. Cette résolution spatiale est définie par la taille d'un pixel qui détermine la longueur du côté du terrain qu'il représente. Plus le pixel sera petit, meilleure sera la résolution. Il faut toutefois garder à l'esprit, qu'en général, le gain de résolution spatiale entraine une perte de la vue globale de la cible.

Les satellites présentent toutefois l'avantage d'obtenir des informations sur des domaines géographiques plus vastes et d'acquérir, sur une même zone, des données rapprochées dans le temps, on parle de bonne **résolution temporelle**. En effet, les satellites d'observation sont programmés pour survoler de manière régulière l'ensemble de la Terre. Ainsi, un satellite va repasser au même endroit dans un intervalle de quelques jours. Certains satellites vont prendre des images à chaque passage (Landsat, Sentinel) d'autres, enregistreront les

données que sur programmation spécifique (Spot, Pléiades). D'autres satellites dits géostationnaires observent en permanence la même zone.

La régularité d'obtention de données dans le temps peut être conditionnée par la météorologie, puisque l'ennuagement par exemple, pose un important problème pour l'obtention d'image dans le domaine du visible ; ce problème peut être contourné en utilisant une technologie RADAR. Pour ce qui est des autres vecteurs, c'est l'opérateur qui décidera en fonction de son budget et de ses objectifs de procéder à une nouvelle acquisition sur une même zone.

Enfin, les caractéristiques des données obtenues par télédétection dépendent également de la **résolution spectrale** des différents capteurs. Celle-ci définit la capacité à capter une part plus ou moins importante du spectre électromagnétique. Plus un capteur possède de bandes spectrales, plus la richesse de l'information sera importante et il sera alors possible de distinguer des cibles aux signatures spectrales différentes.

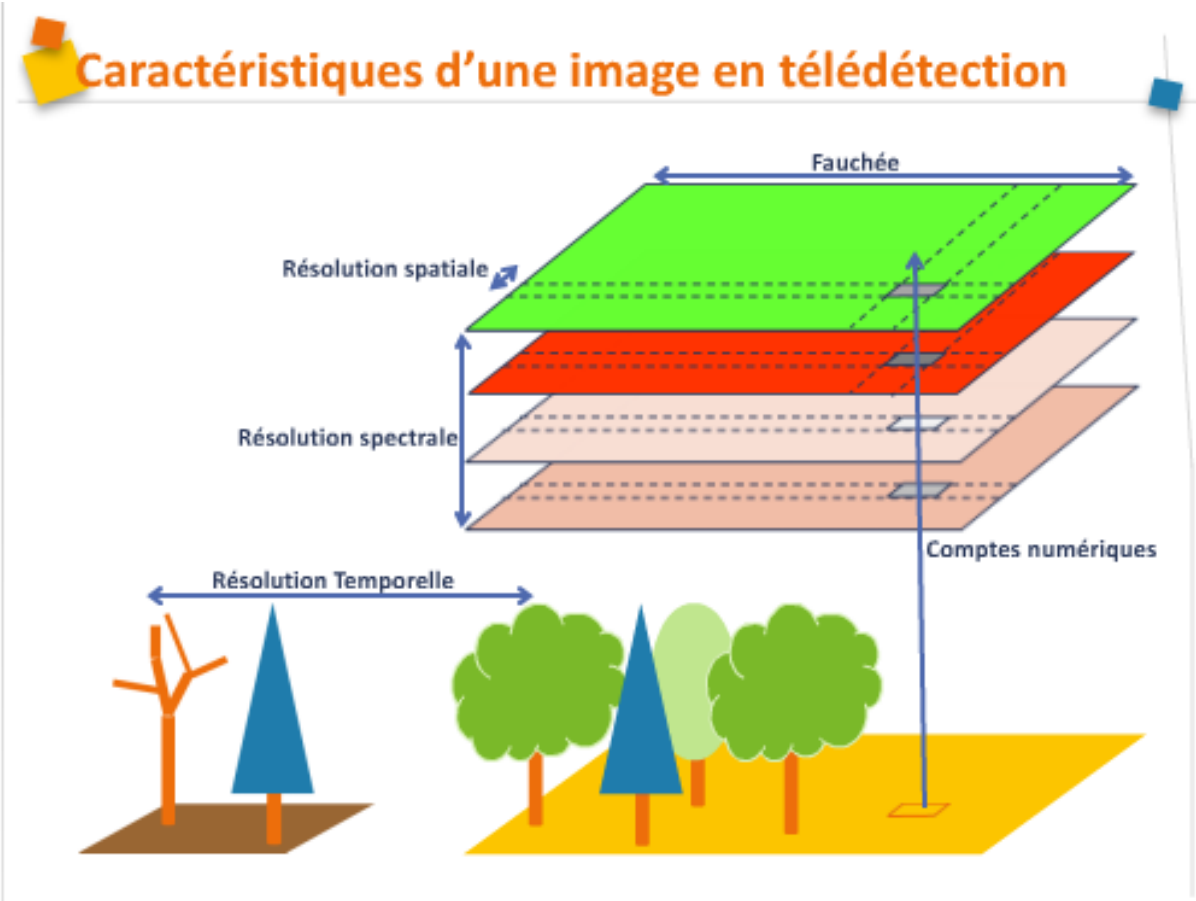


Figure 1 : Les différentes résolutions d'une image de télédétection

Les données brutes issues de la télédétection peuvent se présenter sous forme de photographie 2D mais également en 3D comme les nuages de points obtenus par LIDAR. Toutefois, la plupart de ces données sont inutilisables sans une analyse préalable. L'analyse peut être simplement visuelle (photointerprétation) ou elle peut être numérique grâce à des procédures de calculs utilisant des algorithmes permettant de relier mathématiquement les données issues de la télédétection et les données terrain. Notons toutefois que les données de terrain restent indispensables pour compléter, voire calibrer les données de télédétection.

1.2.3.2 Applications de la télédétection en forêt

Les premières utilisations de la télédétection en forêt ont servi à observer des territoires de grandes surfaces et souvent peu accessibles. Au niveau international, par exemple, en zone tropicale, l'utilisation de données satellitaires s'avère performante pour le suivi de la déforestation et la technologie RADAR est bien utile pour pallier les contraintes météorologiques. Des données satellitaires ont également été utilisées en Guyane pour le suivi de trouées d'exploitation et la détection de l'orpaillage illégal.

En France, la télédétection à partir de données satellitaires à résolution « faible » ne s'était pas réellement imposé puisque que, avec un contexte de forêt très hétérogènes et assez faciles d'accès les données reçues par ce biais n'étaient pas considérées comme assez précises. Toutefois, après la tempête de 1999, la télédétection s'est révélée être d'une grande efficacité et a permis un gain de temps considérable dans l'inventaire des dégâts et dans l'aide à la reconstitution des peuplements forestiers détruits. Depuis, la télédétection s'est développée en France et s'avère être très utile, surtout depuis l'apparition de données à résolution très fine. Outre le suivi des dégâts de tempêtes, la télédétection satellitaire est d'une grande aide à la Défense des Forêts Contre les Incendies (DFCI) pour l'élaboration de cartes des feux ou de combustibilité des couverts forestiers ; l'atout majeur du satellite pour cette activité est son passage régulier dans le temps aux mêmes endroits.

Actuellement, le plein développement des nouvelles technologies 3D à fine résolution comme le LiDAR permet de connaître et de suivre la ressource forestière. Cette forme de télédétection permet de cartographier en continu et quantitativement la ressource forestière à des échelles plus fines comme la parcelle forestière ou l'unité de gestion par l'intermédiaire de données dendrométriques comme la hauteur, la surface terrière ou encore le volume. Le LIDAR pouvant traverser la canopée, permet en plus d'obtenir une information sur ce qui se trouve sous les arbres : reliefs, vestiges, desserte. En Guyane par exemple, le LiDAR est utilisé pour optimiser la desserte ; ce qui permet d'une part, des économies sur les visites de terrain et d'autre part, de limiter l'impact des routes forestières sur les sols en optimisant leurs installations.

2 Données utiles pour les aménagistes et savoir-faire en télédétection

2.1 Attentes des aménagistes

Comme dit précédemment, l'élaboration d'aménagements forestiers nécessite d'avoir des informations à l'échelle de la forêt, ces données peuvent donc être obtenues via des bases de données archivées, des mesures de terrain ou grâce à la télédétection. Dans cette partie, nous allons donc voir quelles informations sont nécessaires pour l'aménagiste afin de rédiger son aménagement. Ceci ne représente pas une liste exhaustive mais seulement les besoins mis en lumière par les aménagistes de l'agence de Metz.

Avant tout, les aménagistes ont besoin de faire le point sur **le foncier.** Pour cela, ils utilisent donc le cadastre ainsi que le parcellaire forestier. Ils peuvent être parfois amenés à recaler ce parcellaire forestier ou le modifier en fonction de limites naturelles aperçues sur le terrain ou en fonction des entrées et sorties de certains terrains dans le régime forestier.

Les informations concernant les **infrastructures** en forêt ont également besoin d'être connues : le réseau de desserte forestière, le bâtis ou encore les concessions de lignes de gaz ou de ligne électrique.

Ils ont également besoin d'informations concernant la qualité des sols ce qui se traduit par la connaissance des **stations forestières**. Celles-ci peuvent parfois être reconnues grâce à **la topographie** ou par la profondeur du sol comme c'est le cas sur les plateaux calcaires. Toutefois, les stations situées sur le plateau Lorrain sont maintenant caractérisées par un nouveau guide d'identification « plaine de lorraine », dont la clé d'entrée principale est basée sur l'étude du sol et plus précisément sur sa texture. Les aménagistes essayent donc actuellement de trouver des concordances entre l'ancien guide d'identification et le nouveau pour éviter de reprendre des données sur le terrain. La connaissance de ces stations permettra également d'avoir une idée de **la fertilité des sols**. Pour le moment, la DT a arrêté une typologie de fertilité en fonction de la station.

Les informations concernant les **peuplements** forestiers en place sont primordiales. Les attentes qui ressortent sont donc :

- La **composition des peuplements en essences.**

- Le **capital sur pied**, souvent appréhendé par la surface terrière mais caractérisé plutôt par le volume dans l'aménagement.

- La **structure des peuplements** est une donnée très importante pour rédiger un aménagement. Pour l'obtenir, c'est la typologie de peuplement « feuillus du plateau lorrain » qui est utilisée et la clé d'entrée est le pourcentage en GB et TGB de la surface terrière totale qui est utilisé. La structure par essences est également intéressante.

- Le **diamètre moyen** d'un peuplement peut être également utile à l'aménagiste lorsque deux peuplements ont des compositions et des structures identiques. Le diamètre moyen pourra donc être utilisé pour décider quel peuplement sera ciblé pour passer dans le groupe de régénération.

- La **hauteur** est également nécessaire, mais celle-ci est surtout utilisée dans les jeunes peuplements (tiges non pré comptables) afin de suivre leur évolution est de programmer les travaux sylvicoles. Elle peut servir aussi de clé d'entrée dans les guides de sylviculture, en combinaison avec l'âge du peuplement, afin de connaître la classe de fertilité de ce peuplement.

- Les **dégâts de gibier** sont aussi pris en compte dans la rédaction des aménagements, toutefois ils ne sont quasiment jamais quantifiés mais seulement observés lors des inventaires ou des descriptions à l'avancement.

- La **qualité des bois** est également une information qui peut influencer l'aménagiste. Le souci réside dans le fait que les descriptions concernant la qualité des arbres sont très subjectives et peuvent fortement varier d'un descripteur à l'autre. Cette qualité est généralement appréciée à dire d'expert. Le choix de parcelles a passé en régénération doit normalement tenir compte de cette qualité.

- **L'état sanitaire** d'une forêt doit influencer la rédaction de l'aménagement. Attention, le degré d'ouverture entre aussi en jeu : un peuplement post tempête sera ouvert puisque les arbres endommagés auront été extraits, toutefois une parcelle peut être fermée mais avec des bois dépérissant.

Les informations concernant **la biodiversité** et la culture sont également présentes dans l'aménagement. Par exemple, la présence de mares ou de mardelles, de ruisseaux, d'arbres remarquables ou encore de vestiges archéologiques sont notés dans les aménagements forestiers afin de les préserver lors de l'exploitation forestière.

Enfin, les **données concernant l'application de l'aménagement passé** sont importantes et permettent de voir si l'effort de régénération a été atteint, de vérifier le niveau de récolte ou encore de faire le bilan économique et de l'ajuster.

2.2 Etat des lieux sur l'utilisation de la télédétection en forêt

L'imagerie optique, comme dit précédemment, est un moyen de télédétection passif. Les images peuvent être obtenues par couverture aérienne (avion, hélicoptère, drone…) ou via des satellites. La résolution spatiale de ces images va surtout dépendre du vecteur utilisé, les ortho photographies capturées par l'IGN par avion ont une résolution de 25cm ce qui est très précis, quant aux images issues de satellites, la résolution peut aller jusqu'à 1km. Toutefois, de plus en plus de satellites à haute résolution (10-60m) comme « Sentinel 2 », voire à très haute résolution spatiale (<4m), comme « Pléiades », font leur apparition. Les satellites présentent l'avantage majeur de fournir des données concernant la même zone à haute résolution temporelle. C'est le cas par exemple de « Sentinel 2 » qui fournit des images de la même zone tous les cinq jours. Ce qui représente un atout considérable pour déceler les changements concernant les peuplements forestiers et donc repérer d'éventuelles coupes rases ou encore les divers dépérissements (propagation de maladie, chablis…).

Notons tout de même que l'utilisation des données satellitaires peut être contrainte, par la quantité de nuage au moment où la photographie est prise, malgré l'hyper temporalité et la gratuité de certaines de ces données. En effet, un fort taux d'ennuagement peut diminuer la qualité de certaines images, voire les rendre totalement inexploitables.

Ces données optiques vont permettre d'appréhender en premier lieu et plutôt facilement le taux de couvert ou d'ouverture des peuplements, l'état sanitaire ou encore l'activité chlorophyllienne. Elles peuvent également donner des informations sur la composition en essence d'un massif forestier, voire d'un peuplement forestier, plus ou moins finement en fonction de leurs résolutions spatiales.

La résolution spectrale des capteurs optiques est également primordiale. Prenons l'exemple de « Sentinel 2 » dont le capteur possède 10 bandes spectrales : 3 dans le domaine du visible, 5 dans le proche infrarouge et 2 dans le moyen infrarouge. Tous les 5 jours, « Sentinel 2 » va donc fournir, grâce à ses 10 bandes spectrales, 10 photos différentes ; on parle de technologie multi spectrale. Plus le capteur possède de bandes spectrales, plus l'information obtenue sera riche. Cela permettra alors de différencier plus facilement les cibles par leur signature spectrale et donc de séparer plus aisément la végétation du reste, voire de faire des différences au sein de la végétation grâce à la notion de réflectance.

Ces images optiques sont déjà couramment utilisées afin de procéder à des analyses visuelles (délimitation préalable des UED grâce aux ortho photos). Toutefois, ces données peuvent également être exploitées par analyse mathématique, via des algorithmes construits à partir de données récoltés sur le terrain. La détection se fera alors automatiquement. Cette technologie a été utilisée, par exemple, pour l'identification et le suivi des peupleraies sur trois bassins populicoles français afin d'estimer la surface en peupleraie (Yousra Hamrouni).

La photogrammétrie est une technique qui repose entièrement sur une modélisation de la géométrie des images et de leur acquisition afin de reconstituer une copie 3D correspondant exactement à la réalité. En effet, deux images prises dans des conditions semblables, dont les points de vue sont parallèles, mais décalés dans l'espace, forment un couple stéréoscopique qui permet de retrouver la sensation de relief par stéréoscopie.

En plus des apports de l'imagerie optique, la photogrammétrie permet également d'obtenir des informations, sur la structure 3D de la surface du couvert et sur la hauteur des peuplements (à condition d'avoir au préalable le modèle numérique de terrain).

Forces	Faiblesses
Beaucoup de données disponibles et parfois gratuites (IGN, satellites) Résolution spatiale plus ou moins importante (25cm-1km) Information sur le **couvert forestier, l'état sanitaire des peuplements, sur l'activité chlorophyllienne** Possibilité de **distinction d'essence** (technologie multi spectrale et notion de réflectance) Résolution temporelle qui peut être importante avec satellite : possibilité de **suivi des peuplements** (maladie, tempête…)	Aucune information sous la canopée Technologie dépendante des conditions climatiques Difficile d'avoir une résolution spatiale importante, une forte résolution temporelle pour un faible coût Besoin de normaliser les images issues de différentes sources Besoin d'un MNT précis pour faire de la photogrammétrie
Opportunités	**Menaces**
Mise en place d'une convention avec l'IGN pour le traitement des images Possibilité photogrammétrie pour avoir des informations en 3D	Pas assez de recul sur les résultats de la photogrammétrie

Figure 2 : Matrice SWOT technologie optique

La technologie RADAR est une technologie dite « active ». Comme les capteurs optiques, les capteurs RADAR peuvent être embarqués à bord d'avion, de drone ou de satellite (« Sentinel 1 »). Ce sont des microondes qui sont émises par le RADAR et analysées à leur retour au capteur. Peu d'études concernant l'utilisation de capteurs RADAR à bord d'avion pour l'analyse de la forêt sont parues. Le satellite « Sentinel 1 » est quant à lui équipé d'un capteur RADAR, et comme tout capteur RADAR, il opère dans une seule longueur d'onde - la bande C (centrée sur 5,6 cm), les informations d'une même zone sont fournies tous les 6 jours à une résolution spatiale comprise entre 10 et 20 mètres. L'information RADAR rend compte de différentes caractéristiques : la rugosité des surfaces observées, la structure de la cible ou encore de son contenu en eau.

Il ne faut également pas oublier que le RADAR a un avantage majeur : son fonctionnement est indépendant du soleil et très peu affecté par les conditions météorologiques le problème lié à l'ennuagement peut donc être contourné par cette technologie.

Forces	Faiblesses
Résolution spatiale plus ou moins importante Haute résolution temporelle grâce aux satellites Technologie non sensible aux conditions climatiques Informations sur : la **structure du couvert, la taille des objets** (bande P = taille des troncs; bandeX et C = feuillage) et **leur contenu en eau**	Une seule bande spectrale = peu d'information à exploiter Pas d'information sur la différenciation des essences
Opportunités	**Menaces**
	Peu de connaissances sur l'apport du RADAR pour des projets forestiers Peu d'investissement par l'ONF sur cette technologie

Figure 3: Matrice SWOT technologie RADAR

La technologie LiDAR, est un moyen de télédétection « actif » qui peut être embarqué à bord de différents vecteurs (avion hélicoptère, drone…). Le LiDAR va apporter une information sous forme d'un nuage de points 3D qui permet alors d'appréhender dans un premier temps, le relief du sol, la hauteur des peuplements, leurs structures verticales, ainsi que l'agencement spatial en 3D.

En plus de ces premières informations apportées par le LiDAR, l'analyse par des algorithmes du nuage de points permet la modélisation de données dendrométriques spatialisées et continues sous forme de carte.

Plusieurs variables dendrométriques ont déjà été estimées et modélisées et ceci à différentes échelles, avec différentes méthodologies et appliquées à des contextes locaux concrets avec une grande précision et exactitude (Treitz et al, 2012). Les variables les plus souvent modélisées sont : la biomasse et le volume (Zianis D, Muukkonen P, Mäkipää R, Mencuccini M, 2005), la surface terrière (Maltamo M, 1997), la répartition des diamètres (Breidenbach J, Gläser C,Schmidt M, 2008), le taux de couvert et bien sûr, la hauteur (Næsset E, Okland T, 2002 ; Bocket al., 2009).

D'une manière générale, ces études ont porté en majorité sur des peuplements de résineux, mais quelques études sur les feuillus ont quand même été réalisées (Heurich and Thoma, 2008 ; Bock et al, 2009)

Les divers projets « démonstrateurs » réalisés par l'ONF font le point sur la précision des différentes variables dendrométriques pour un contexte particulier.

Forces	Faiblesses
Le laser pénètre la canopée, ce qui apporte des informations sur : • **Le relief du sol** • **La présence d'infrastructures** : route, vestiges, lignes électriques • Des caractéristiques de la **végétation en sous-étage** Des données brutes en 3D concernant : • **La structure verticale** et l'agencement spatial du peuplement forestier • De très bonnes caractéristiques de **hauteur** • La modélisation de **variables dendrométriques** (d0, G, H0…) **spatialisées et continues** **Différenciation au sein des essences de résineux** Beaucoup de connaissances engrangées au sein de l'ONF	Pas de distinction au sein des essences feuillues Peu de précision sur la structure par classe de diamètre d'arbres feuillus Cout d'acquisition important donc peu voire pas d'acquisition sur les mêmes zones Besoin de variables de terrain et d'une expertise métier
Opportunités	**Menaces**
Mutualisation des données et des coûts d'acquisition Amélioration des modèles	Réadaptation du processus de récolte de données terrain Intégration de la donnée par les utilisateurs

Figure 4 : Matrice SWOT technologie LiDAR

Finalement, c'est la technologie LiDAR qui a été retenue par l'agence de Metz pour répondre à leur problématique. Les données dendrométriques spatialisées fournies par le LiDAR, l'information obtenue caractérisant la canopée et l'apport de connaissance concernant le relief du sol et de ce qui se trouve sous la canopée sont des atouts considérables pour la rédaction des aménagements forestiers, mais également pour la gestion forestière quotidienne.

L'expérience et l'expertise de l'ONF dans le traitement des données LiDAR ont également pesé dans le choix de cette technologie.

3 Choix du LiDAR pour l'élaboration d'aménagement forestier

3.1 Principe et fonctionnement

Ce mémoire traite essentiellement de la technologie LiDAR aéroportée. C'est-à-dire que le matériel « LiDAR » est embarqué à bord, le plus souvent, d'un avion (il peut être également embarqué dans un hélicoptère, un ULM ou même sur un drone).

Les recherches sur le LiDAR ont débuté dans le milieu des années 70. La première fois qu'a été soulevée la possibilité d'obtenir des applications forestières à partir de données LiDAR date de 1964 (Rempel et Parker) qui utilisaient un LiDAR, de type télémètre aéroporté. Toutefois la première vraie expérience de mesure d'arbres par LiDAR a été rapportée en 1976 par Solodukhin et al. Les expériences se sont multipliées dans les années qui ont suivi et la technologie a évolué vers le « LiDAR profileur ».

Une étape importante du développement de la technologie LiDAR fut l'intégration du GPS et de l'Inertial Navigation System (INS) dans les années 1990, ce qui a permis d'améliorer la précision concernant la localisation de l'appareil et donc la précision de localisation des données récoltées. A partir de 1993, est apparu le « LiDAR balayeur » qui a permis d'importants progrès comme l'augmentation des fréquences d'impulsions laser ou l'augmentation du nombre de retours d'ondes.

Le principe fondamental de fonctionnement du système LiDAR repose sur la mesure du temps entre l'émission d'une courte pulsation de lumière laser et la détection de la lumière laser réfléchie par une cible vers le capteur. Grâce à la connaissance de la vitesse de la lumière, il est alors possible d'en déduire la distance qui sépare le matériel LiDAR qui émet le laser et l'objet qui a reflété la lumière laser. Puisque la position du capteur et son orientation sont bien connus via le GPS et l'INS, les données récoltées forment alors un nuage de points 3D représentant la surface de ce qui a été scanné par le laser.

La technologie utilisée pour les applications forestières émet plutôt un faisceau laser de petit diamètre, de l'ordre du mètre au sol. En effet, un faisceau de faible diamètre est plus adapté, car cela permet d'obtenir une précision accrue entre les données scannées par le laser et les arbres individualisés ou les placettes. La densité de points arrivant au sol peut varier de 0,5 à plus de 20 points/m2 et dépend de plusieurs paramètres comme l'altitude de vol, la vitesse de vol, le pourcentage de recouvrement entre les différentes bandes parcourues par l'avion, la fréquence de pulsations émises par le laser ou encore l'angle d'émission.

Le LiDAR est une technologie multi-échos. En effet, une impulsion émise par le laser de l'avion peut rencontrer différents obstacles avant de toucher le sol. A chaque obstacle rencontré, il va y avoir une onde de lumière réfléchie différente, qui sera renvoyée vers le récepteur LiDAR, on parle de plusieurs « retours ». Il existe deux systèmes d'enregistrement. Un, est appelé système full-waveform (FWF), il permet de numériser la séquence entière des retours lumineux en tant que fonction de hauteur. L'autre, est appelé système à retour discret (discrete return system), il va quant à lui enregistrer de 1 à en général 4, voire 5 échos, suite à la rencontre du faisceau laser avec des obstacles se situant entre la canopée et le sol.

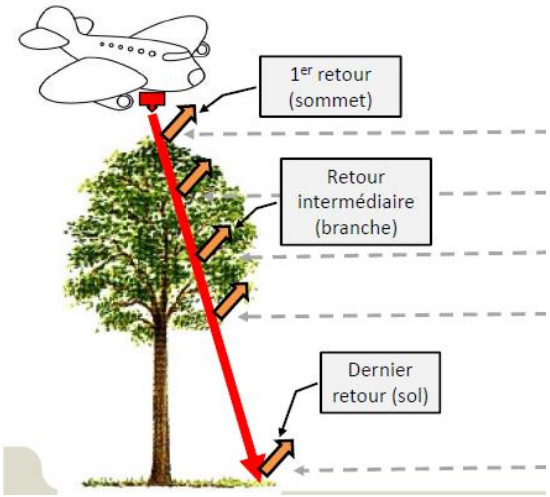


Figure 5 : Le LiDAR une technologie multi-échos

3.2 Méthodes de modélisation

Dans la littérature, deux approches sont généralement utilisées pour traiter les données LiDAR. L'approche dite « surfacique » (ABA) et l'approche « allométrique » (ITA).

L'approche surfacique consiste à utiliser les valeurs de terrain récoltées sur une placette de calibration à rayon fixe (variables dendrométriques) et de les expliquer au mieux grâce à un modèle statistique à partir de certaines métriques issues du nuage de points LiDAR extrait sur l'emprise de la placette.

L'approche à l'arbre est différente. En effet, cette fois, il faudra dans un premier temps détecter les houppiers des arbres à partir du Modèle Numérique de Surface (MNS) ou du Modèle Numérique de Hauteur (MNH) issu des données LiDAR. Après avoir individualisé ces houppiers, il va falloir recaler les houppiers détectés avec le LiDAR, sur les arbres relevés et localisés sur les placettes de calibration. Une fois cette étape réalisée, on va pouvoir déduire le diamètre de chaque arbre à partir des caractéristiques de son houppier (surface, volume…) grâce à des relations allométriques et donc obtenir des variables dendrométriques à l'échelle de la placette. Une autre méthode consiste à utiliser la somme des caractéristiques des houppiers de la placette, afin d'obtenir des variables dendrométriques à partir d'algorithmes.

Cette approche de modélisation fait face à certains problèmes. Tout d'abord, la réussite de cette phase de détection dépend fortement du choix de l'algorithme de détection et de son paramétrage. A cela, se rajoute les conditions forestières qui peuvent fortement affecter le pourcentage de détection. Par exemple, dans des forêts particulièrement denses, il arrive que certains arbres soient enlacés ou tellement serrés qu'un seul houppier soit détecté par l'algorithme. De plus les arbres dominés, ou le sous étage ne sont pas bien, voire pas du tout détectés. Ceci entraîne donc des erreurs dans la prédiction des variables dendrométriques. Ce problème peut se régler ou du moins il est possible de l'amoindrir en améliorant l'algorithme 3D, en utilisant des filtres ou encore en utilisant les données issues de la technologie FWF.

Un autre problème découle de cette méthode : une fois la phase de détection achevée, on va obtenir le diamètre de l'arbre grâce aux caractéristiques de son houppier, via une relation d'allométrie or, il n'existe pas de relation résolue entre le houppier d'un arbre et son diamètre. En effet, la densité d'arbre peut jouer sur la compression des houppiers, de même, l'historique de la sylviculture va également influer sur la forme du houppier. Ce problème d'allométrie n'est pour le moment pas résolu et ne pourra certainement pas l'être.

C'est pourquoi, d'autres méthodes sont en cours de réflexion, comme l'approche semi-ITC ou encore une méthode qui est actuellement au stade de recherche à l'ONF et qui peut également être répertoriée parmi les approches à l'arbre. Cette méthode consiste à repérer directement les troncs des arbres à partir d'un alignement de points repérés dans le nuage de points LiDAR et donc d'obtenir directement les diamètres à partir de simples relations géométriques.

Ces deux méthodes peuvent, semble-t-il, être complémentaires puisque l'ABA pourrait permettre d'améliorer la détection des houppiers sur le MNS ou le MNH.

3.3 Historique de l'utilisation du LiDAR et retour d'expérience au sein de l'ONF

Le premier intérêt porté par l'ONF à la technologie LiDAR en France a eu lieu en 2007 et concernait la forêt de Haye à Nancy. A cette époque, un vol LiDAR avait été commandé par des partenaires de l'ONF à des fins archéologiques. Le pôle Recherche Développement et Innovation (RDI) de l'ONF a donc saisi l'opportunité pour se procurer les données LiDAR récoltées afin de tenter des modélisations qui permettraient d'obtenir des variables dendrométriques. Les résultats ont vite démontré que le LiDAR s'avérait être une technologie très intéressante pour le monde forestier.

Quelques mois plus tard, le service recherche de l'ONF fut restructuré. Les pôles RDI de Nancy et de Chambéry se sont spécialisés en télédétection, en sachant l'importance que celle-ci allait certainement avoir dans les années à venir.

Au vu des bons résultats LiDAR en forêt de Haye, l'ONF a donc décidé de se lancer dans un projet en collaboration avec différents acteurs de la recherche forestière comme l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN), l'institut technologique FCBA (Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement) ou encore L'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) concernant l'utilisation du LiDAR en forêt. Ce projet, nommé FORESEE, s'est déroulé entre 2010 et 2014 et visait à développer des outils permettant d'augmenter le niveau de connaissances en termes de ressources en bois disponibles et des conditions de sa mobilisation, notamment pour la filière énergétique.

Ce projet s'est déroulé sur différents sites d'études.

- Sur le massif des Landes avec ces peuplements réguliers de pin maritime.
- Dans les forêts domaniales de Haye et de Languimberg en Lorraine en contexte de plaine et de peuplements feuillus réguliers ou d'anciens Taillis Sous Futaie (TSF).
- Dans les Alpes où les conditions topographiques représentent un handicap important pour la gestion forestière.

FORESEE a donc permis à l'ONF de construire des modèles de prédiction permettant d'obtenir des paramètres dendrométriques à partir des données LiDAR plus ou moins robustes en fonction des différents peuplements forestiers que l'on peut trouver en France. Cette phase « d'étude » ayant bien fonctionnée, augmenta donc les demandes concernant l'utilisation du LiDAR au pôle RDI.

Il était donc temps de commencer le transfert des résultats de la recherche vers l'application via des projets « démonstrateurs ». Les démonstrateurs sont des projets menés en coopération entre la RDI et un service opérationnel et dont les résultats sont amenés à être directement utilisés par le service opérationnel dans un objectif précis.

En 2014, deux projets « démonstrateurs » concernant la révision d'aménagements forestiers par l'intermédiaire de données LiDAR ont donc été initiés. Le premier en forêt domaniale de Lège et Garonne et sur le site « Dunes et forêts du Porge » et le deuxième dans les forêts domaniales de Saint-Gobain et de Coucy-Basse.

En 2016, deux nouveaux projets « démonstrateurs » ont été sélectionnés dans le but, de tester les algorithmes et les modèles créés précédemment, dans de nouveaux contextes. Ces projets se sont déroulés en Maurienne et en forêt d'Orléans.

Début d'année 2018, la DG de l'ONF a demandé aux pôles RDI le déploiement et la généralisation de l'utilisation du LiDAR vers l'opérationnel, forçant donc la RDI à ralentir leur effort porté sur l'amélioration de leur modèle de prédiction et à mettre en place une chaîne de traitement (*partie 4.2*) permettant le transfert de connaissances. Ce transfert de compétences nécessitera sans nul doute la formation, à l'échelle de la DT, d'un responsable projet LiDAR et d'un spécialiste dans le traitement des données LiDAR. Il faudra également mettre à disposition des services opérationnels, un outil permettant de valoriser au maximum les données LiDAR traitées.

3.4 Récapitulatif des apports du LiDAR pour la gestion forestière : données brutes et données dendrométriques

Les données brutes issues de l'acquisition LiDAR sont récupérées sous forme d'un nuage de points, plus ou moins dense en fonction des caractéristiques du vol effectué. Une fois récupérés, ces points seront classifiés (souvent par le prestataire du vol) afin d'être utilisés.

Code	Libellé
0	Created, never classified *(jamais classé)*
1	Unclassified *(non classé)*
2	Ground *(sol)*
3	Low Vegetation *(végétation basse)*
4	Medium Vegetation *(végétation moyenne)*
5	High Vegetation *(végétation haute)*
6	Building *(bâtiment)*
7	Low Point (noise)
8	Reserved
9	Water *(eau)*
10	Rail
11	Road Surface
12	Reserved
...	...

Figure 6 : Classification des points LiDAR

Dans un premier temps, la séparation des classes de points « sols » et de points « végétation » va permettre d'obtenir des produits de niveau 1.

Le plus recherché et l'un des produits les plus utiles de niveau 1, est le modèle numérique de terrain. Il peut servir dans l'aménagement du parcellaire et dans l'optimisation de l'exploitation en repérant au mieux les dessertes forestières existantes, les dessertes qu'il va falloir mettre en place pour sortir du bois ou encore les obstacles rendant inexploitables certaines parcelles.

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) peut être très utile dans d'autres domaines comme l'archéologie, l'urbanisme, la prévention des risques naturels (détection d'ouvrages de Restauration des Terrains en Montagne (RTM), de couloirs d'avalanche, de zone de glissement de terrain…) ou le suivi de zone à enjeux d'inondations

Le second produit de niveau 1 qui peut être obtenu suite à la séparation des points classifiés, est le MNH ; celui-ci peut être utilisé pour faire de la photo détection. En effet, dans le domaine forestier, il peut permettre la délimitation d'unité de gestion ou encore la détection des différents stades de développement des peuplements. Notons que le MNH permet également d'individualiser les tiges à partir de la détection des apex et donc d'obtenir des variables dendrométriques. Ce MNH est obtenu par différence entre le MNS et le MNT.

Les produits de niveau 2 sont obtenus directement à partir du nuage de points ou suite à une individualisation du houppier sur le MNH ou le MNS. Voici quelques exemples dans le domaine de la gestion forestière :

- **La hauteur dominante** : c'est-à-dire, la moyenne des hauteurs de la strate dominante et co-dominante compris comme la moyenne de la hauteur des 100 plus gros arbres à l'hectare (Pardé and Bouchon, 1988). C'est la variable la mieux appréhendée par le LiDAR, avec moins de 5% d'erreur, la hauteur obtenue est aussi, voire plus précise, que lors des inventaires de terrain. Cette variable est utile pour avoir une idée de la fertilité des sols ou encore du stade de développement des différents peuplements

  La hauteur des jeunes peuplements. Afin d'effectuer le suivi des régénérations, naturelles ou artificielles, dans le cadre d'une gestion régulière ou d'un suivi de la régénération surfacique, l'ONF a créé en 2005 la BDR, qui permet de suivre les flux de régénération et de quantifier les surfaces en travaux dans les jeunes peuplements. Le critère d'évaluation principal est la hauteur de ces peuplements. Une telle base de données permet de planifier les travaux, d'évaluer leur coût, ou de calculer des indicateurs du renouvellement des forêts : critère essentiel justifiant la gestion durable des forêts.

- **Les diamètres dominants et quadratiques**

- **La surface terrière**. Cette donnée est primordiale pour les aménagistes surtout lors d'une gestion en futaie régulière et permet d'appréhender le capital sur pied ainsi que la structure d'un peuplement forestier. Notons toutefois que les différents projets LiDAR réalisés par l'ONF montrent une erreur relative pouvant aller jusqu'à 25% sur une surface de 7 a dans des peuplements feuillus (l'erreur diminue sur des surfaces plus importantes) ce qui s'avère être insuffisant pour les aménagistes.

- **Le volume.**

- **La densité de tiges**. En revanche la donnée sature pour des peuplements à plus de 700 tiges/ha. Cette donnée est surtout utilisée pour les résineux

- **La distinction des variables par catégories de bois** (8 à 10 cm d'erreur : ce qui peut parfois être préjudiciable pour des arbres en limite de classe)

- **La distinction des essences**. Cette distinction se fait bien sur la différenciation feuillus/résineux et au sein des espèces de résineux. En revanche la distinction entre les feuillus n'est pas encore aboutie, car leurs caractéristiques structurales sont trop proches.

Evaluation de la qualité des livrables (erreur) et adéquation aux besoins (Utilisateurs)	Contextes résineux		Contextes feuillus	
	Erreur (7 ares)	*Utilisateurs*	*Erreur (7 ares)*	*Utilisateurs*
MNT brut et pentes		++		++
MNH brut		++		++
Hauteur dominante (H0)	1-1,5 m	++	1-1,5 m	+
Diamètre dominant (D0) ou moyen (Dg)	2 à 3,5 cm	+	3,5 à 5,5 cm	+
Surface terrière G / ha	2,5 à 6 m2/ha (5 à 15 %)	++	3,5 à 6 m2/ha (15 à 25 %)	+
Volume / ha	20 à 60 m3/ha (15 à 20 %)	+		
Densité de tiges / ha	50 à 100 t/ha (15 à 35 %)	-	50 à 100 t/ha (15 à 35 %)	-
Composition en essences (% de G)	10 à 15 %	+		

Très bon Bon Moyen à mauvais

Figure 7 : Tableau récapitulatif de la qualité des livrables LiDAR

3.5 Des domaines d'application des données LiDAR nombreux

Dans le domaine forestier, la donnée LiDAR peut intéresser les acteurs à tous les niveaux :

- Les gestionnaires territoriaux (PNR, DRAF), pour l'évaluation des enjeux économiques par zone, en connaissant finement la ressource disponible ou encore dans l'aide à la décision pour des investissements dans la desserte par exemple.
- Les gestionnaires forestiers (ONF, coopératives forestières, experts forestiers…), afin d'alléger les phases d'inventaires forestiers, d'avoir une information spécialisée continue et plus fine qu'auparavant, permettant d'avoir des données utilisables à l'échelle de la parcelle.
- Pour les opérateurs (exploitants, filière bois…) dans un but de prospection ou de préparation de chantier, par exemple.

Le plein développement de la technologie LiDAR au cours de ces dernières années, ainsi que la précision des données récoltées font que le LiDAR est de plus en plus utilisé et peut être valorisé dans un grand nombre de secteurs d'activité, autres que la forêt, comme l'ingénierie d'infrastructures (planification urbaine et rurale, installation des routes, implantation d'éoliennes, implantation de remontées mécaniques dans les stations de ski…) ; la surveillance des risques naturels (chute de blocs rocheux, avalanches, glissements de terrain, inondations, évolution des glaciers…) ; l'agriculture de précision (tracteurs autonomes) ou encore l'archéologie (découverte de vestiges sous couvert forestier, modélisation 3D…).

Ceci laisse entendre que sur un même territoire, plusieurs acteurs pourraient être intéressés par l'obtention de données LiDAR. C'est pourquoi, il peut être parfois judicieux de vérifier en amont si une acquisition LiDAR n'a pas déjà été effectuée sur la zone qui nous intéresse ou même de chercher des partenaires financiers intéressés par la même zone d'étude, afin de partager les frais d'acquisition de la donnée. Le but étant donc de mutualiser les données le plus possible, si cela est envisageable. La *partie 4.7* de mon rapport, concernant l'étude de faisabilité de mise en place d'un vol LiDAR sur la Moselle traitera de cette problématique de mutualisation.

4 Etude de faisabilité et mise en place d'un vol LiDAR sur l'agence de Metz

Mon stage au sein de l'agence ONF de Metz avait également pour but de faire une étude de faisabilité quant à la mise en place d'un projet de télédétection pour l'agence. En effet, ce projet devrait voir le jour pour répondre à l'arrivée d'une importante quantité d'aménagements à réviser, pour des forêts du Sud de l'agence, dans les années à venir.

4.1 Choix de la technologie LiDAR

4.1.1 Attentes par rapport au LiDAR

Le choix du LiDAR comme moyen de télédétection a été argumenté dans les *parties 2 et 3* en expliquant dans quelles mesures il peut répondre aux besoins de l'élaboration d'aménagement (EAM).

Rappelons alors simplement les attentes et objectifs de ce projet de télédétection.

La programmation de plus de 10 000 ha de révision d'aménagements forestiers de 2021 à 2025 dans le sud de l'agence de Metz a été l'élément déclencheur de ce projet. L'objectif principal de cette acquisition LiDAR est donc de répondre à cette vague importante d'aménagements à réviser en facilitant leur rédaction : par un gain de temps, par une simplification du processus d'EAM ou encore par l'apport de données nouvelles ou de meilleure qualité.

D'autres attentes (secondaires) sont ressorties de l'utilisation du LiDAR :

- ✓ Améliorer l'état des lieux et la connaissance relative à la ressource forestière
- ✓ Améliorer le suivi des aménagements forestiers : programmation des travaux et des coupes, support d'information pour les martelages…
- ✓ Affiner la connaissance du micro relief.
- ✓ Recaler le parcellaire forestier et la desserte.
- ✓ Détecter des vestiges en forêt.

Une fois le choix du LiDAR fait, il faut alors se demander comment organiser l'ensemble du projet, cibler une zone d'étude, fixer les caractéristiques techniques du vol, préparer l'échantillonnage des placettes de calibration, ainsi que le protocole de relevé terrain, décrire les moyens humains ou matériels à mettre en place et faire une analyse économique de ce projet. Enfin, les besoins non satisfaits par l'outil de télédétection devront être listés et des outils ou des prises de mesures complémentaires devront être trouvés pour répondre à ces besoins.

4.1.2 Livrables attendus et sélectionnés

Suite à l'acquisition et aux traitements des données LiDAR, plusieurs informations sont attendues.

Le MNT utile au recalage du parcellaire et de la desserte, à la détection d'éventuels vestiges archéologiques et tout simplement pour une meilleure connaissance du micro relief.

Le MNS et le MNH, ceux-ci peuvent être utilisés pour faire de la photo détection. En effet, ils donnent une vue sur la canopée et peuvent donc permettre de délimiter des UED ou encore de détecter les différents stades de développement des peuplements. Notons qu'ils permettent également d'individualiser les tiges à partir de la détection des apex et donc d'obtenir des variables dendrométriques.

Les données dendrométriques spatialisées : H0, G, D0

Le LIDAR apporte une donnée qui n'existait pas encore : une **donnée cartographiée continue** et **utilisable à des échelles plus fines** comme à l'Unité de Gestion (UG), l'UED ou même sur des surfaces plus petites.

Dans un contexte de transition vers une gestion forestière assistée par de nouvelles technologies, il semble donc opportun et important de se lancer dans un tel projet afin de rester au contact des dernières nouveautés disponibles tout en répondant à des objectifs opérationnels, tels que la rédaction d'aménagements forestiers.

4.2 Déroulement générique d'un projet LiDAR

Suite aux recherches concernant l'utilisation de données LiDAR par le pole RDI de l'ONF, il a été décidé en 2018 par la DG de l'ONF de transférer les compétences acquises vers les services opérationnels. Pour y parvenir, la RDI a mis au point une chaîne de traitement (voir figure ci-dessous) et a identifié différents rôles nécessaires au bon fonctionnement d'un projet utilisant des données LiDAR.

Cette chaîne de traitement est une étape fondamentale et indispensable au transfert de connaissances et de compétences vers les services opérationnels. En effet, cela permet de structurer le développement d'un projet, mais également de décharger la RDI (en terme de travail de traitement des données et de mise en place d'un projet), pour qu'elle puisse continuer son travail de recherche. Il faudra toutefois que certaines personnes soient formées au départ par la RDI, afin d'avoir les compétences nécessaires à la mise en place et à la réalisation d'un tel projet.

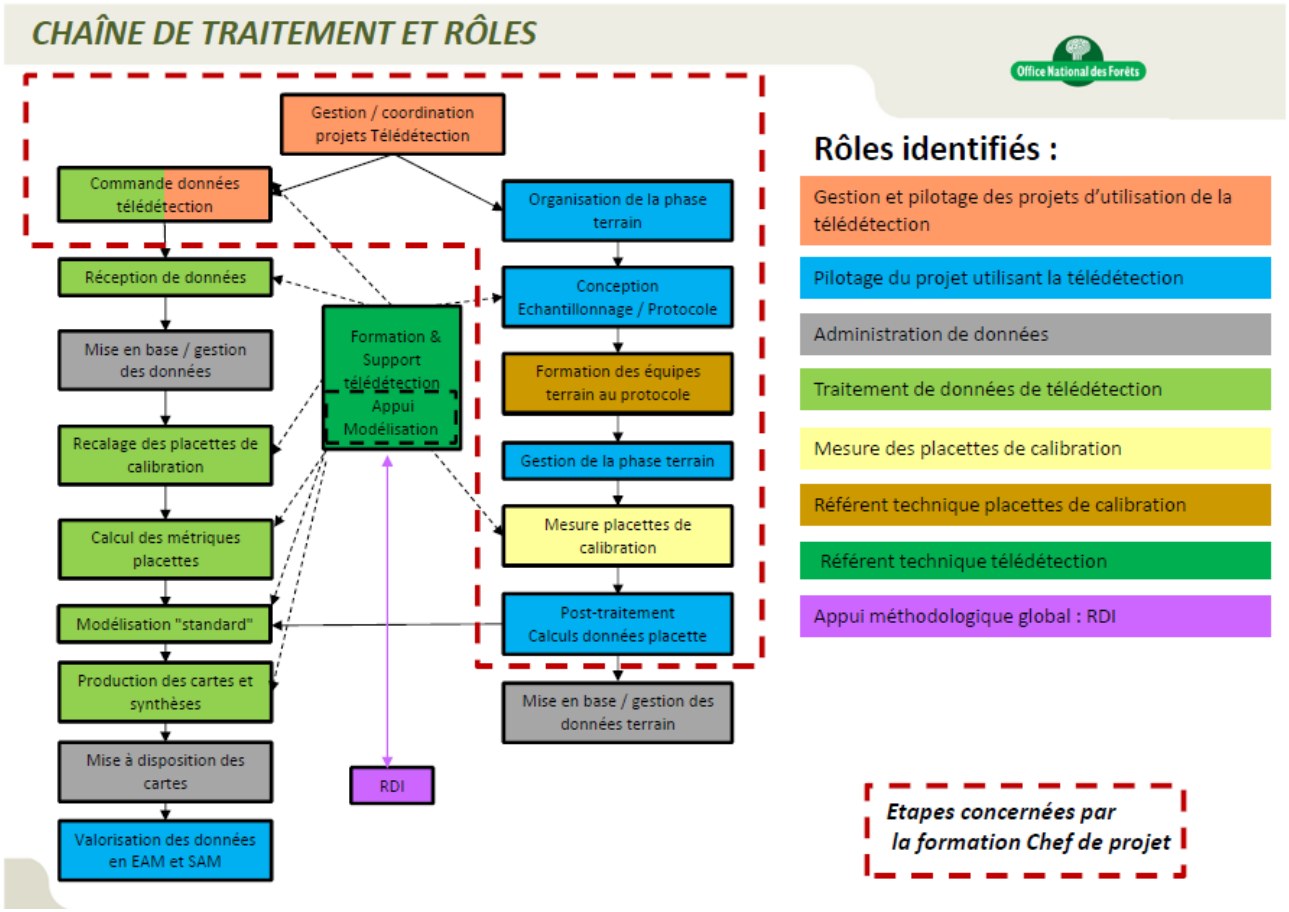


Figure 8 : Chaîne de traitement pour la mise en place d'un projet LiDAR

Pour le **pilotage du projet utilisant la télédétection**, une personne a été ciblée au sein de l'agence de Metz, elle intégrera le pôle aménagement de l'agence, en tant qu'aménagiste à partir de Septembre. Cette personne devra s'occuper de la gestion globale du projet, allant de la commande des données (rédaction du CCTP), en passant par la mise en place de la partie terrain (préparation de l'échantillonnage de placettes de calibration, rédaction du protocole de terrain) jusqu'à la valorisation des données produites pour les services opérationnels. Elle suivra donc une formation « Chef de projet LiDAR » donnée par la RDI et pourra s'appuyer sur ce mémoire pour poursuivre la mise en place de ce projet de télédétection sur l'agence de Metz. Le rôle de **référent technique placettes de calibration** pourra être endossé par cette même personne, qui devra alors également former les personnes en charge de la prise de mesures sur le terrain.

Pour la **mesure des placettes de calibration** sur le terrain, des équipes (binômes) seront constituées. Les binômes sont composés si possible du TFT en charge de la forêt sur laquelle les mesures sont prises, ce qui permettra un gain de temps sur le terrain, et d'un chef d'équipe (*partie 4.4.2*).

Le **traitement des données issues de la télédétection** est une compétence nouvelle à l'ONF. La personne chargée de ce rôle, devra suivre une formation spécifique. Elle devra s'occuper de donner les spécifications du vol, de vérifier les données lors de leur réception, de recaler les placettes de calibration, de calculer les métriques LiDAR, il faudra également se charger de la modélisation informatique ainsi, que de la production de documents (cartes) dérivés des données LiDAR brutes. La personne en charge sera bien sûr appuyée par la RDI. C'est un poste, qui pour le moment n'est pas encore créé. Toutefois, ce rôle est primordial, puisque sans lui, les données LiDAR acquises resteront « muettes ». Suite à l'utilisation de données LiDAR par l'agence de Verdun et la volonté de l'agence de Metz d'utiliser le LiDAR, la DT a donc décidé d'affecter du personnel au niveau de l'agence étude pour remplir ce rôle. Un appui sera également apporté par les géomaticiens de l'agence de Metz.

4.3 Définition du projet

4.3.1 Zone d'étude

4.3.1.1 Agence de Metz

L'agence territoriale de Metz représente la partie ouest du département de la Moselle et est constituée de 6 Unités Territoriales (UT) :

- Albestroff-Sarralbe
- Canner et Pays de Sierck
- Pays Messin
- Saulnois
- Thionvillois
- Warndt

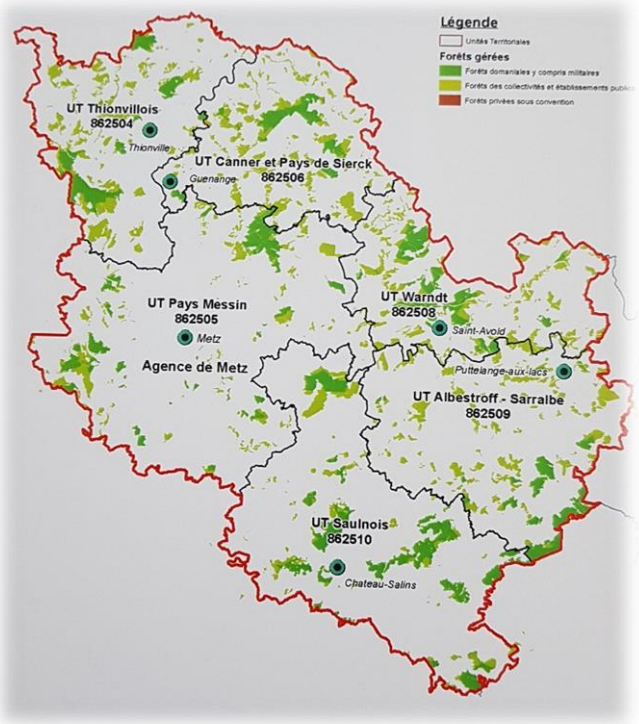


Figure 9 : Agence de Metz et ses UT

L'agence de Metz s'occupe de la gestion d'environ 70 000 ha de forêts, 27 300 ha de forêts domaniales, 41 700 ha de forêts communales et 1 600 ha de forêts militaires. Les essences majoritaires sont le chêne, le hêtre et le charme qui se retrouvent principalement dans des peuplements réguliers ou dans des anciens TSF dont la conversion en futaie régulière est largement avancée.

Dans un premier temps, il a d'abord fallu définir la zone d'étude avant de mettre en place le projet de survol LiDAR. Au départ, l'idée était de survoler tout le Sud de l'agence avec, pour limite Nord, une ligne droite entre Metz et Honskirch. Cette zone géographique représente environ 150 000 ha dont seulement 21 000 ha, morcelés, relèvent de la forêt publique.

4.3.1.2 Choix d'une zone d'étude restreinte

Suite à la consultation des bases de données de l'ONF concernant les dates d'aménagement de chaque forêt, on a pu s'apercevoir qu'un nombre important d'aménagements devaient être révisés dans les cinq années à venir (2019-2024). Afin d'envisager un autre scénario d'acquisition, avec une zone d'étude réduite en terme de surface, le choix a été fait de conserver les forêts dont l'aménagement devait être révisé dans les 5 ans à venir et dont la rédaction de l'aménagement n'était pas encore entamée. Un deuxième filtre a été ajouté : seules les forêts de plus de 80 ha ont été conservées. Un travail a ensuite été réalisé afin d'optimiser la zone d'étude pour minimiser le coût d'acquisition du vol LiDAR : les forêts trop morcelées ou trop éloignées des principaux massifs de la zone d'étude ont été retirées de la zone. Enfin, les forêts de moins de 80 ha et passant quand même dans les 5 ans à venir en révision d'aménagement ont été ajoutées à la sélection lorsqu'elles étaient attenantes aux forêts sélectionnées précédemment. La superposition de ces deux filtres, puis l'optimisation de la zone, nous a conduit à une zone d'étude d'environ 10 915 ha de surface, constituée de 20 forêts dispersées en 4 secteurs assez distinctes.

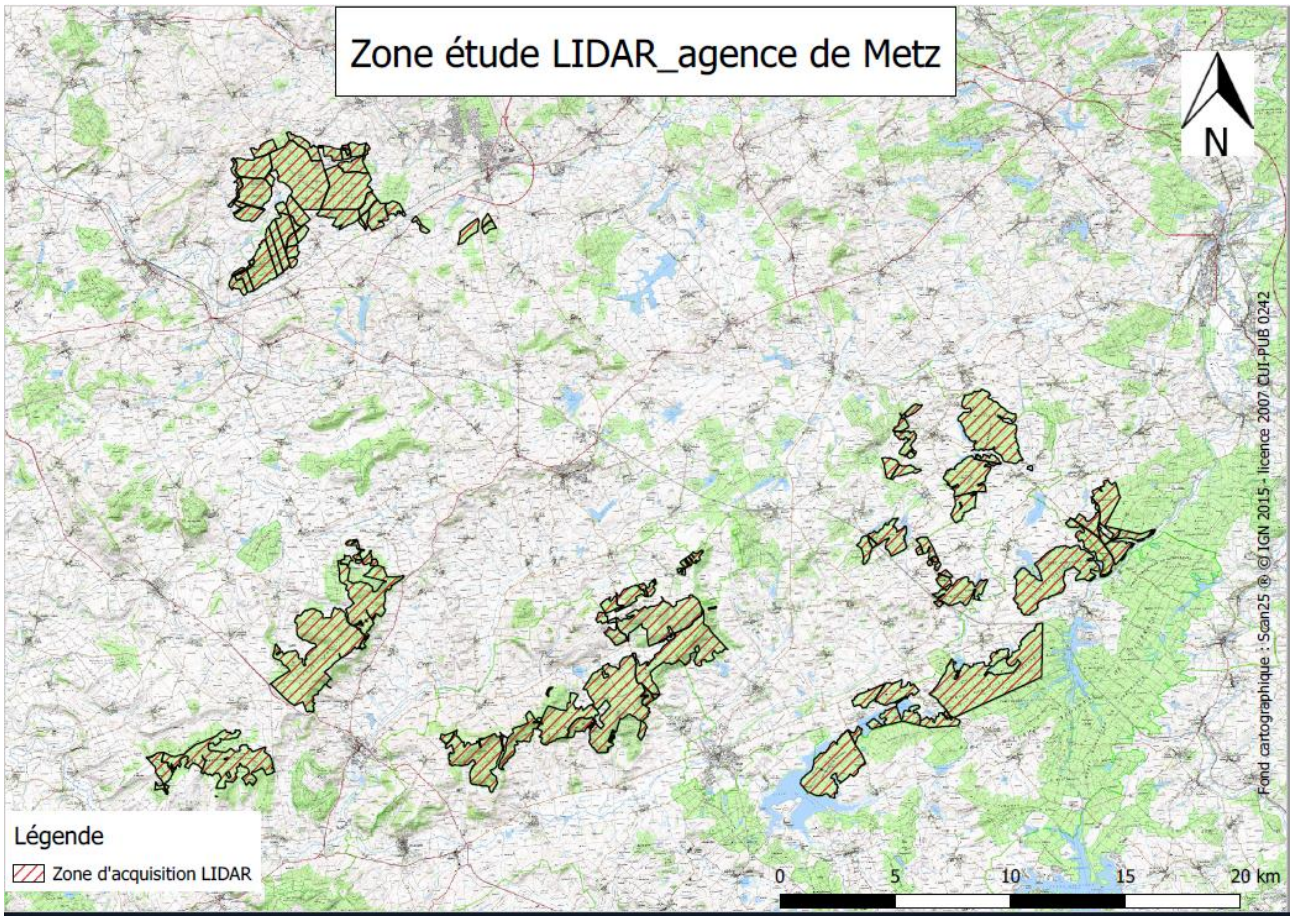


Figure 10 : Zone d'étude du projet LiDAR

Type de forêt		Nom de la forêt	Surface	Date de révision d'aménagement
Communale		Albestroff	102,13	2023
		Bermering	107,19	2023
		Bréhain	21,19	2023
		Chateau Bréhain	37,04	2023
		Château-voué	3,19	**pas d'amgt**
		Guinzeling	95,86	2023
		Hestroff	53,35	2021
		Zarbeling	9,91	2025
Domaniale		Albestroff (mittershein)	3263,19	2022
		Albestroff (albestroff)		2025
		Amelecourt	1245,85	2021
		Bride	2451,02	2023
		Gremecey	485,91	2025
		Hémilly	1164,32	2024
		Romersberg	597,32	2024
Syndicale	LAVIERGE	La Vierge	1 269,27	2021
Total général			**10 915,89**	

Figure 11 : Liste des forêts situées dans la zone d'étude

Une deuxième option concernant la zone d'acquisition a été soulevée. En effet, les 4 secteurs distincts de la première zone d'étude ne sont pas attenants, mais ne sont tout de même pas très éloignés les uns des autres. Il est alors possible que ces zones interstitielles, sur lesquelles nous n'avons pas demandé d'acquisition et qui sont situées entre les secteurs retenus pour la première zone d'étude, soient tout de même survolées par l'avion pour éviter de prendre trop de virage et étirer le plus possible les bandes de vol. Nous avons donc pensé que l'acquisition de données sur les forêts se trouvant dans ces zones interstitielles n'augmenterait pas drastiquement le coût de l'acquisition. C'est pourquoi, dans cette deuxième option, nous avons ajouté à la zone d'acquisition, toutes les forêts qui nous semblaient vraisemblablement dans la trajectoire de vol de la première zone d'étude. La surface de forêts concernée par l'acquisition passerait donc à environ 15 165 ha repartie sur 67 forêts.

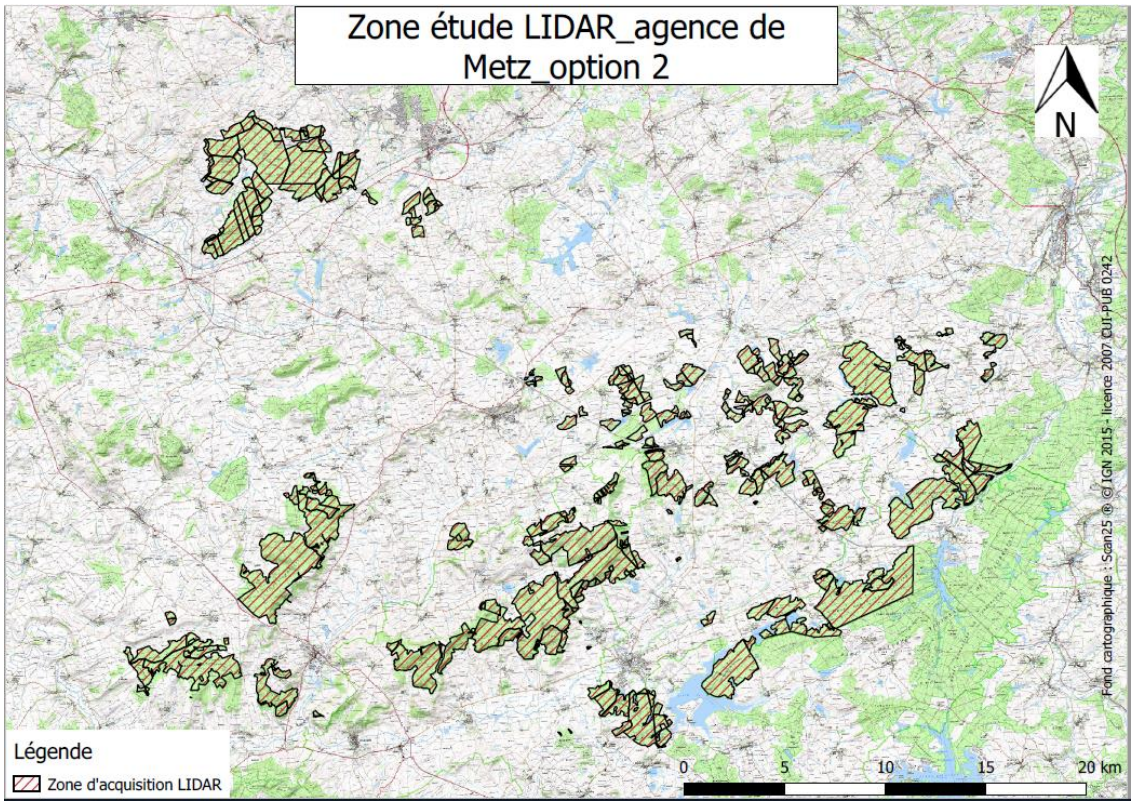


Figure 12 : Zone d'étude N2 du projet LiDAR

Ces deux options seront intégrées dans l'appel d'offre de marchés publics. Le choix entre ces deux options sera réalisé suite à l'étude des offres faites par les différents prestataires d'acquisition LiDAR (SINTEGRA, OPSIA…).

4.3.2 Caractéristiques du vol

Dans un premier temps, le vol doit recouvrir entièrement la zone d'étude validée. Si certains secteurs ne sont pas survolés par le prestataire, l'ONF pourra alors demander, sans surcoût, un vol complémentaire ou même demander au prestataire de recommencer entièrement l'acquisition des données.

Le vol doit être réalisé « hors feuille » c'est-à-dire durant la période pendant laquelle les arbres feuillus ont perdu leurs feuilles. Ce choix a été fait de façon à obtenir un MNT de qualité. En effet, sans les feuilles, la canopée est bien plus perméable au laser du LiDAR et par conséquent, le nombre de points arrivant jusqu'au sol sera plus important. Ce MNT de qualité permettra donc de répondre à différents objectifs « secondaires » comme le recalage du parcellaire, la détection de la desserte forestière ou encore la détection de vestiges archéologiques. Il va également de soi que le vol doit être réalisé dans de bonnes conditions climatiques, il faut surtout éviter l'acquisition s'il y a un manteau neigeux au sol ou sur un sol inondé. La neige arrêterait les points, qui ne toucheraient donc pas le sol et les notions de hauteurs seraient donc faussées.

L'élément important sur lequel il a fallu se positionner est la densité minimum d'émission de points.

Une densité de points inférieure à 4 points / m2 est difficilement utilisable pour des applications forestières. Seules des mesures à partir des métriques du nuage de points sont réalisables et l'expérience a montré que les résultats obtenus n'étaient pas à la hauteur des attentes.

Pour une approche à l'arbre, c'est-à-dire par détection de houppier il est nécessaire d'avoir une densité de points minimale de 4 à 8 points / m2. A partir de cette densité, un modèle de détection de houppier pourra être construit et des données dendrométriques pourront découler de relations allométriques.

La densité de points finalement retenue est de 10 points / m2. La RDI a défini cette densité comme « le nombre standard d'impulsions minimum qui correspond à un levé standard par avion et qui est suffisante pour des projets forestiers classiques ».

Dans le but d'avoir une meilleure précision sur la structures des peuplements, nous avions pensé à encore augmenter cette densité d'émission afin qu'elle dépasse les 15 points / m2. En effet, à partir de cette densité de points, une détection de tronc (points alignés dans le nuage représentant le tronc) aurait été envisageable. Toutefois cette méthode n'a pas été retenue puisqu'elle n'est pas encore robuste et toujours en phase de recherche. De plus, même si le nombre d'impulsions au m2 n'augmente pas considérablement, il faut que les bandes de vol se recouvre au minimum à 80 % pour utiliser cette méthode ; ce qui engendre un fort surcoût.

L'ensemble des caractéristiques du vol se retrouve dans le CCTP qui se trouve en *annexe 1* de ce mémoire.

4.3.3 Mise en place des placettes de calibration et protocole

4.3.3.1 Définition et rôle

La combinaison de différentes sources de données est quasi obligatoire pour l'application de la télédétection en forêt.

Le cas le plus simple et le plus commun est la combinaison des données LiDAR avec des données récoltées sur le terrain. Ces données terrain vont permettre de calibrer les modèles mathématiques exploitant les données LiDAR. Ces modèles doivent être recalibrés pour chaque cas particulier, puisque les caractéristiques des peuplements survolés changent, mais également parce que les configurations d'acquisition sont différentes d'un vol à l'autre. Les données terrain permettant de calibrer ces modèles sont donc relevées sur ce qu'on appelle des placettes de « calibration ».

Les placettes de calibration LiDAR sont obligatoirement des placettes à surface fixe. Il est impossible de calibrer un vol liDAR à partir de placettes relascopiques. Ces placettes doivent être géo référencées, c'est pourquoi il faut relever avec précision le centre de la placette grâce à un GPS d'une précision suffisante (Trimble GEO7X).

4.3.3.2 Choix du type et de la localisation des placettes

Echantillonnage :

Il aurait été possible de mettre en place un maillage aléatoire sur l'ensemble de la zone d'étude. Toutefois, peu de placettes seraient tombées dans les peuplements les moins représentés sur le terrain. Le modèle mathématique aurait donc été moins bon pour ces peuplements minoritaires. Pour répondre à ce problème, nous avons décidé de considérer l'ensemble des forêts de la zone d'étude comme un seul massif et de le stratifier afin que tous les types de peuplements soient représentés.

Les différentes strates ont été créées par le croisement de deux clés d'entrée : l'essence majoritaire et la structure du peuplement (issue de la typologie plateaux lorrains). Ces informations proviennent des bases de données SIG des aménagements en cours.

Dans un premier temps, deux strates ont été créées en fonction de l'essence majoritaire : une strate « chêne » dont les peuplements sont en majorité composés de chêne et une strate « autres feuillus » dans laquelle le chêne n'est pas majoritaire. Les peuplements résineux ont été exclus de l'échantillonnage car leur surface est trop faible et l'épicéa, majoritaire dans ces peuplements est voué à disparaître.

Ensuite, ces deux strates ont été divisées chacune en 2 autres strates : « peuplements adultes : chêne » (diamètre > 17.5 cm) et « jeunes peuplements : chêne » (diamètre < 17.5 cm). De même pour la strate « autres feuillus ».

Enfin ces 4 strates ont encore été subdivisées en fonction de la structure des peuplements. La strate « peuplements adultes : chêne » a été divisée en 2 strates : « peuplements en croissance active » regroupant les structures 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 5.1 et « peuplements mûrs ou en maturation », regroupant les structures 2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 5.2, 5.3. **Les codes des structures sont définis dans la figure ci-dessous.** De même pour la strate « peuplements adultes : autres feuillus ». La strate « jeunes peuplements : chêne » a été subdivisée également en 2 strates : « régénération » regroupant les peuplements allant de semis à gaulis et une strate « sortie de compression » représenté par les peuplements de perchis allant jusqu'à une hauteur d'environ 15 mètres.

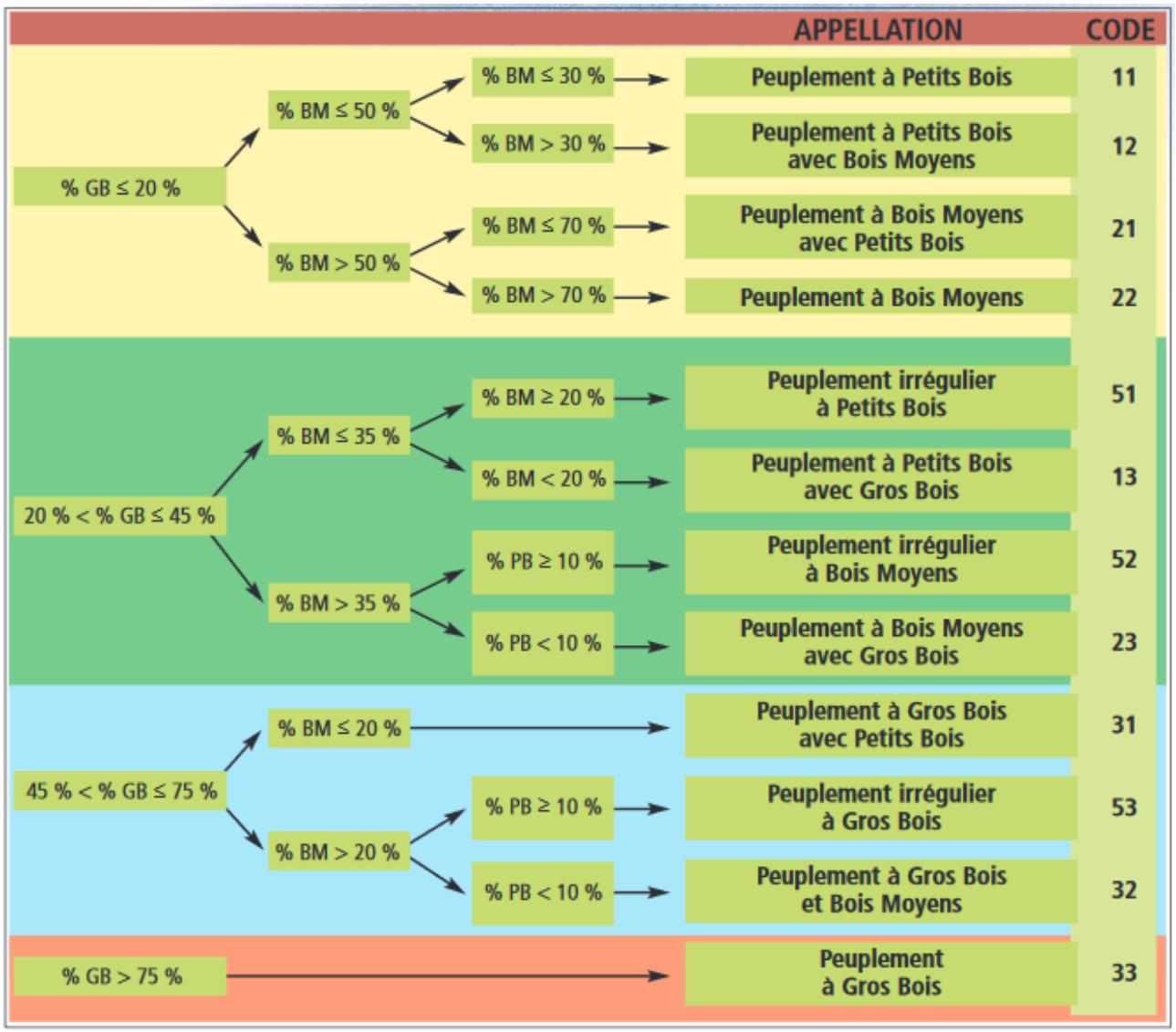


Figure 13 : Code structure des peuplements

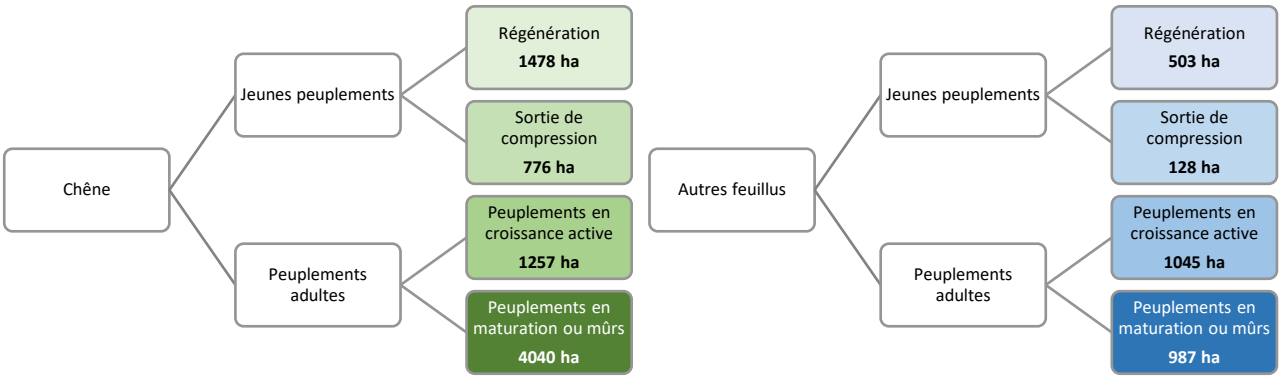


Figure 14 : Les différentes strates pour l'échantillonnage des placettes de calibration

Afin que tous les types de peuplements soient bien représentés, il a été décidé de mettre un minimum de 70 placettes sur les différentes strates de peuplements adultes et un minimum de 30 placettes sur les jeunes peuplements. Nous amenant donc à un nombre total de 400 placettes de calibration.

Un maillage aléatoire a donc été appliqué à ces différentes strates, afin de positionner les placettes de calibration. Un maillage systématique par strate a également été mis en place afin de choisir des placettes de secours dans le cas où les premières placettes ne seraient pas réalisables.

Le modèle mathématique de calcul de hauteur dominante étant déjà assez robuste, une mesure de hauteur sera relevée sur seulement 60 placettes en peuplements adultes et sur toutes les placettes en jeunes peuplements. Ces 60 placettes ont donc été choisies et repérées dans l'échantillonnage dans le but d'obtenir une mesure dans différentes gammes de hauteur et afin qu'elles soient reparties de façon homogène sur les différentes forêts de la zone d'étude.

Une fois les données récoltées sur l'ensemble des placettes de calibration, il faudra vérifier à partir de la typologie « peuplements forestiers feuillus du Plateau lorrain » si les placettes relevées sont bien tombées dans les strates attendues. Si ce n'est pas le cas, il faudra alors passer ces placettes dans la strate qui convient le mieux ou les utiliser en tant que placette de validation afin de les comparer aux résultats issus de la modélisation LiDAR.

Caractéristiques des placettes de calibration :

Les placettes de calibration peuvent être temporaires ou permanentes. Dans le cas de ce projet, les placettes temporaires ont été retenues. En effet, dans cette zone d'étude, la forêt est en majorité gérée sous forme de futaie régulière. Les TSF restant sont tous en conversion vers des futaies régulières plus ou moins avancées. Aucune perspective particulière n'est ressortie quant au fait de passer vers une gestion irrégulière dans les années à venir. L'implantation d'un réseau de placette permanente, pour la seule calibration LiDAR n'est donc pas spécialement justifiable si elle n'est pas couplée à un rôle d'observatoire. Ces placettes temporaires retenues seront toutefois matérialisées comme des placettes permanentes, grâce à un piquet métallique afin de pouvoir les retrouver facilement pour éventuellement contrôler la prise de donnée ou les retrouver dans quelques années pour obtenir une notion d'accroissement à l'échelle des différentes strates.

Les données concernant les **peuplements adultes**, seront récoltées sur des placettes de 15 m de rayon, soit environ 7 ares. L'avantage de choisir ce rayon (assez important) permet de standardiser ce projet par rapport à ce qui a déjà été fait et de limiter l'effet lisière. En effet, plus la surface de la placette sera importante et plus l'effet lisière sera atténué, c'est-à-dire qu'il y aura moins d'arbres dont le houppier serait situé pour partie dans la placette et pour partie en dehors de la placette. Dans l'idéal, il faudrait qu'au moins 10 arbres soient inventoriés sur ces placettes afin de stabiliser la variance des mesures réalisées. S'il y a moins de 10 arbres, les prises de mesures seront quand même réalisées mais il faudra vérifier lors du traitement de ces données que le modèle mathématique créé est également bien applicable dans ces peuplements moins denses.

Les placettes de calibration **dans les jeunes peuplements** n'auront qu'un rayon de 8 m (2 a) et seule une hauteur sera mesurée. Il a été montré dans un précédent mémoire de stage, que la réduction de la taille des placettes n'influençait pas la précision du modèle de calcul de hauteur. Au contraire, l'augmentation de la taille des placettes diminue la précision du modèle. Logiquement, plus la placette sera petite, plus elle sera homogène c'est ce qui explique que le modèle obtenu à partir de placettes plus petites sera plus précis. Toutefois, la modélisation de la hauteur dominante dans les jeunes peuplements se fera certainement par une approche surfacique. Selon la bibliographie, White et al., (2013) recommandent une taille de placette comprise entre 8 et 14 mètres pour utiliser cette approche. C'est pourquoi, ce rayon minimum de 8 mètres a été retenue pour la calibration dans les jeunes peuplements.

4.3.3.3 Quelles données récolter ?

Différentes données seront récoltées sur les placettes de calibration :

- **Le positionnement des arbres inventoriés en distance et azimut**. Ces données de distance et d'azimut permettront de recaler les placettes de calibration au sein du nuage de points LiDAR et de calibrer le modèle mathématique de détection des houppiers.

- **L'essence de l'arbre inventorié.**

- **Le diamètre de l'arbre inventorié**. Cette donnée est très importante puisqu'elle permettra de modéliser les variables dendrométriques du diamètre dominant, de la surface terrière ou encore du volume. Le diamètre devra donc être pris avec précision en suivant le protocole (double prise de diamètre, prise du diamètre au centimètre près, bonne utilisation du compas forestier).

- **La hauteur de l'arbre inventorié**. Cette donnée permettra de calibrer le modèle de la hauteur dominante. Le modèle étant déjà assez robuste, la prise de hauteur se fera seulement sur 60 placettes en peuplements adultes et l'ONF utilisant une estimation traditionnelle non biaisée de la hauteur dominante qui consiste à mesurer sur une placette de surface n (a) les n-1 plus gros arbres (Parde and Bouchon, 1988). Finalement, seuls les six plus gros arbres de la placette seront mesurés en hauteur.

  Pour les placettes jeunes peuplements, une mesure de hauteur sera réalisée sur toutes les placettes puisque c'est la seule donnée qui nous intéresse sur ce genre de peuplements et que la gamme de calibration des modèles existants ne couvre pas l'ensemble des jeunes peuplements concernés par la BDR. Sur ces placettes, on mesurera seulement l'arbre le plus gros de l'essence objectif.

4.3.3.4 Protocole

J'ai rédigé un protocole pour la prise de données sur les placettes de calibration. Je me suis inspiré du protocole type déjà utilisé dans les différents projets LIDAR que j'ai simplifié et adapté aux attentes de l'agence de Metz. J'ai également pris le temps d'aller le tester sur le terrain, afin de l'affiner, mais aussi pour avoir une idée du temps nécessaire à la réalisation d'une placette. En moyenne, en comptant le temps de déplacement, il faut prévoir environ une heure par placette soit un maximum de 8 placettes réalisables par jour.

Le protocole se trouve en *annexe 2* de ce mémoire.

4.3.4 Intégration du LiDAR dans le processus d'élaboration d'aménagements

4.3.4.1 Ecarts entre les attentes des aménagistes et les résultats LiDAR

Comme expliqué précédemment, le LiDAR n'apporte pas (encore) certaines données qui semblent indispensables à la rédaction d'un aménagement forestier.

C’est en effet le cas pour la composition en essence. Bien entendu, la différenciation entre feuillus et résineux par le LiDAR est largement possible tout comme la distinction entre les différentes essences résineuses, qui a fait ces preuves en contexte de montagne puisque différents résineux ont pu être caractérisés grâce à leur architecture particulière. Toutefois, la distinction entre les essences feuillues est actuellement impossible. C’est pourtant une information cruciale pour les aménagistes. En effet, il est important de connaître cette composition afin de définir une essence objectif mais également pour définir quelle parcelle forestière passer en coupe. Par exemple, une parcelle à majorité de hêtre passera en régénération avant une parcelle à majorité de chêne si elles sont identiques au niveau des autres variables dendrométriques et toutes les deux dans un état sanitaire correct. Cette information concernant les essences est d’autant plus importante pour l’agence de Metz sur laquelle il y a une forte proportion de chêne dont la valeur marchande est très élevée actuellement.

De même, le pourcentage de surface terrière par classe de diamètre, qui est la clé d’entrée dans la typologie « peuplements forestiers feuillus du Plateau lorrain » pour définir la structure d’un peuplement ne sera pas fourni avec précision par le LiDAR. C’est pourtant une donnée avec laquelle les aménagistes de l’agence ont l’habitude de travailler leur permettant de délimiter les UG mais également de cibler le groupe de parcelles susceptibles de passer en de régénération.

Il faudra alors trouver un moyen d’obtenir ce genre d’informations indispensables à l’aménagiste en modifiant le diagnostic d’aménagement habituel afin d’optimiser les données fournies par le LiDAR.

4.3.4.2 Réorganisation du processus d’élaboration d’aménagements et appropriation de la donnée LiDAR

Dans un premier temps, le MNT fourni par le LiDAR permettra de faire un point sur le foncier et s’il est nécessaire, de recaler le parcellaire forestier. Il permettra également de faire l’inventaire de la desserte forestière ou des éventuels vestiges archéologiques.

Le MNS et le MNH fournis par le LiDAR pourront être utilisés pour délimiter en amont les UED, en complément de l’ortho photo utilisée jusqu’à présent mais aussi pour avoir une idée du stade de développement des différents peuplements.

Enfin, les différentes variables dendrométriques fournies par le LiDAR sous forme de carte permettront de délimiter les différentes UG mais aussi de programmer les coupes et les travaux.

Toutefois, comme dit ci-dessus, certaines informations comme la composition en essence, la structure des peuplements ou d’autres informations plutôt qualitatives (dégât de gibier, qualité des bois…) ne seront pas apportées par le LiDAR. Ces informations étant importantes, il a été décidé de réaliser une évaluation-diagnostic mais de façon différente des descriptions actuelles.

En effet, pour optimiser les données apportées par le LiDAR, les inventaires ne seront plus réalisés que ce soit les inventaires relascopiques ou les inventaires en plein. Cependant, le LiDAR ne signe aucunement la fin des observations de terrain puisqu’en plus de la phase de terrain nécessaire à la mise en place des placettes de calibration, toutes les parcelles seront décrites à l’avancement afin de valider les dires du LiDAR, de s’imprégner de la forêt avant de rédiger l’aménagement mais également pour diagnostiquer les informations manquantes pour l’EAM citées plus haut. L’aménagiste donnera donc à dire d’expert la composition en essence ainsi que la structure des UG prédéfinies grâce au LiDAR qui pourront donc être modifiées suite à l’obtention de ces informations. Cette description permettra aussi d’apporter toutes les informations qualitatives nécessaires à la rédaction de l’aménagement. La façon de récolter les données sur le terrain doit encore être réfléchie entre la future responsable de ce projet et les aménagistes de l’agence de Metz.

4.4 Moyens mis en place pour le projet

4.4.1 Achat du vol CCTP

Comme pour tout projet LiDAR, il va falloir acheter les données ou plus particulièrement payer un prestataire pour l'acquisition de ces données LiDAR. Cet achat, va se dérouler par marché public, c'est-à-dire qu'un contrat à titre onéreux va être conclu entre l'ONF et un prestataire LiDAR pour l'acquisition de données sur la zone d'étude. En amont, il va donc falloir rédiger un Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) qui est un document contractuel rassemblant les clauses techniques du marché public. Il fait partie des documents à intégrer au dossier de consultation des entreprises tout comme le Règlement de Consultation (RC), l'Acte d'Engagement (AE) ou encore le Cahier des Clauses Administratives Particulières (CCAP).

Les prescriptions contenues dans ce CCTP vont permettre à la personne responsable du suivi du marché de vérifier le bon déroulement de celui-ci, l'atteinte de ses objectifs et la bonne réalisation des prestations. Une fois signé par les deux parties, le CCTP va prendre une valeur légale. C'est pourquoi, la rédaction du CCTP doit être impartiale et précise. Dans un premier temps, pour ne pas favoriser ou exclure arbitrairement certains prestataires lors de la mise sur le marché. Dans un deuxième temps, afin d'être couvert suite à une mauvaise prestation, puisque les contraintes rédigées dans ce document devront impérativement être respectées par le prestataire ayant remporté le marché.

Le CCTP se trouve en *annexe 1*, je l'ai complété en m'appuyant sur un CCTP type construit par la RDI et sur leurs recommandations.

4.4.2 Ressources humaines et formations

Outre les moyens financiers qu'il va falloir dédier à ce projet, il faudra également des moyens humains pour le réaliser.

Pour ce qui est du suivi global du projet, en tant que chef de projet, une explication a déjà été donnée précédemment ; c'est une personne du pôle aménagement, Céline Mangin, qui occupera ce rôle.

De même, pour la personne en charge de la réception des données et du traitement des données LiDAR, une explication a déjà été donnée précédemment ; ce sera certainement une personne de l'agence étude au niveau DT qui sera ciblée.

La suite de ce chapitre concerne formation des équipes de terrain pour la récolte de données sur les placettes de calibration.

Dans un premier temps, il ne fallait pas surcharger les personnes concernées par ce projet. En effet, ce projet LiDAR va leur apporter du travail supplémentaire par rapport à leurs missions habituelles. L'idée est donc de prévoir au maximum une journée de terrain dédiée au relevé des placettes de calibration par semaine et par binôme. La récolte de données va durer de novembre 2019 à février 2020. Cette période a été choisie pour être la plus proche temporellement parlant du survol LiDAR et cette phase d'inventaire durant une période hors feuille, sera d'autant plus simple à réaliser. Il y a 17 semaines durant cette période, en prenant une moyenne de 8 placettes réalisables par jour et en fixant 1 jour de terrain par semaine cela nous amène donc à 136 placettes réalisables par binôme sur cette période. Pour atteindre l'objectif de 400 placettes, il a donc été décidé de mettre en place 3 équipes ($3 \times 136 = 408$ placettes).

Afin que les données soient récoltées de façon homogène, trois chefs d'équipe, qui ne changeront jamais durant toute la période de calibration, ont été ciblés. Celine Mangin, également en charge du suivi global du projet, Paul Velte, animateur sylvicole et Francis Stumpf, responsable SIG. Ils seront formés tous ensemble sur une journée voire une demi-journée, afin qu'ils s'imprègnent bien du protocole et qu'ils s'accordent sur la façon dont ils vont procéder pour relever les données. Ils seront formés de préférence par un personnel de la RDI, afin de bien les familiariser avec l'utilisation du matériel (GPS et Vertex) et la prise de hauteur qui est sans doute la mesure la plus compliquée à appréhender.

Ces 3 chefs d'équipe seront assistés par des TFT, si possible par le TFT en charge de la forêt sur laquelle les relevés seront effectués, ceci dans le but de gagner du temps lors du cheminement, grâce aux connaissances de l'agent de terrain. **Une formation devra donc être organisée auprès des TFT**, afin qu'ils comprennent bien les différents enjeux de ce projet, les apports de cette nouvelle technologie et qu'ils se sentent le plus impliqués possible.

4.5 Analyse économique

Cette partie est une estimation comparée du coût de revient de la récolte de données utiles à l'élaboration d'aménagements entre le processus habituel et le processus assisté par LiDAR.

4.5.1 Scénario habituel sans le LiDAR

Afin de chiffrer le coût d'obtention des données nécessaires à la révision des différents aménagements de la zone d'étude, je me suis basé sur l'expérience et la façon de faire des aménagistes de l'agence de Metz. Il est ressorti qu'en une journée, ils pouvaient faire en moyenne 25 placettes relascopiques ou parcourir environ 75 ha, en description à l'avancement.

Les inventaires relascopiques sont réalisés dans les peuplements adultes hétérogènes ou à gros bois et les descriptions à l'avancement sont plutôt réalisés dans les jeunes peuplements ou dans les jeunes futaies homogènes.

Ces informations couplées à la surface des différents types de peuplements nous donnent donc un ordre de grandeur quant au temps de travail nécessaire pour inventorier l'ensemble de la zone d'étude.

Par soucis de simplification, j'ai donc regroupé les peuplements classés en structure 3.1, 3.2, 3.3, 2.3, 5.1, 5.2, 5.3 ce qui nous donne une surface totale de 5108 ha qui seraient alors plutôt décrit par inventaire relascopique à 1 point/ ha soit :

5108 / 25 = 205 jours de travail.

Notons tout de même que cela reste une approximation puisqu'en fonction de l'homogénéité des parcelles, l'échantillonnage peut être plus ou moins important qu'un point par hectare et qu'une partie de cette surface a été inventorié en plein. Pour avoir un ordre de grandeur, une équipe de 4 personnes peut inventorier en plein environ 25 ha par jour, ce qui entraîne donc une augmentation du coût de la récolte de données.

J'ai aussi regroupé les peuplements classés en structure 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, SEM, FOU, GAU, PER, FUT ce qui nous donne une surface totale de 5198 ha qui seraient donc habituellement décris à l'avancement soit :

5198 / 75 = 70 jours de travail.

En se basant sur le barème 2018 des coûts de main d'œuvre en fonction des grades (A, B, C) on obtient donc une estimation du coût relatif à l'acquisition de données pour l'EAM sur la zone d'étude selon le processus habituel.

275 × 2 × 208.63 = 114 746 €

275 : nombre de jours de travail

2 : travail par binôme

208.63 : coût à la journée d'un technicien grade B ou C fonctionnaire

Interventions	*Coût*
Inventaire relascopique	205 × 2 × 208.63 = 85 538 €
Description l'avancement	70 × 2 × 208.63 = 29 208 €
Coût total	114 746 €

4.5.2 Scénario avec le LiDAR

Pour ce qui est du processus de récolte de données avec LiDAR, l'estimation est la suivante.

L'acquisition des données LiDAR par un prestataire est estimée à environ 4 € / ha, prix assez élevé dû au morcellement de la zone d'étude. Ce qui nous amène à une estimation de 10 915 × 4 = 43 660 €.

L'investissement dans du matériel sera également nécessaire. Il faudra investir dans un nouveau GPS Trimble GEO 7 X afin de pouvoir faire tourner 3 équipes lors de la calibration, pour un coût d'environ 8 990 €. Il faudra aussi acheter 400 piquets métalliques pour repérer le centre des placettes de calibration pour un prix approximatif de 4 € pièces, ce qui représente donc une somme de 4 × 400 = 1 600 €.

Il faudra également tenir compte du coût lié à la mise en place des placettes de calibration, soit 17 jours de travail pour chacune des trois équipes (voir *partie 4.4.2*) :

17 × (331.54 + 208.63) + 17 × (219.69 + 208.63) + 17 × (208.63 + 208.63) = 23 557 €

Les équipes ne seront pas formées par des personnels de même grade, c'est pourquoi le coût à la journée diffère en fonction des équipes. (208.63 : Coût à la journée personnel technique grade B ou C fonctionnaire ; 219.69 : administratif de grade A ; 331.54 : technique grade A)

La journée de formation est aussi à prendre en compte : les 3 chefs d'équipe seront certainement formés sur une journée, soit :

331.54 + 331.54 + 219.69 + 208.63 = 1 091 €

Enfin il faudra repasser l'ensemble des forêts en descriptions à l'avancement. En estimant qu'on peut parcourir environ 75 ha par jour, on obtient donc :

10915 / 75 × 2 × 208.63 = 60 725 €

OPERATIONS	**COUT**
ACQUISITION LIDAR	43 660 €
PLACETTES DE CALIBRATION	23 557 + 1 091 = 24 648 €
MATERIEL : *TRIMBLE* GEO 7X + PIQUETS METALLIQUES	10 590 €
DESCRIPTION L'AVANCEMENTS	60 725 €
COUT TOTAL	139 623 €

Nous pouvons donc voir que l'ordre de grandeur du coût d'acquisition de ces données est le même. Ce qui confirme les différentes études menées par la RDI expliquant que le coût d'un projet LiDAR n'était pas astronomique et se rapprochait fortement du coup du processus habituel.

4.6 Calendrier prévisionnel du projet

De mars à aout 2019	Travail sous forme de stage sur **l'étude de faisabilité et mise au point du projet LiDAR** jusqu'à élaboration du **CCTP**
De septembre à octobre 2019	**Lancement du marché**, attribution de celui-ci et **formation des équipes de terrain** pour la récolte de données sur les placettes de calibrations
De novembre 2019 à février 2020	**Mesure des placettes de calibration**
Entre Novembre 2019 et mars 2020	**Campagne d'acquisition LiDAR** sur une journée en conditions optimales
Courant 2020	**Remise définitive du dossier complet** par le prestataire et **traitement « dendrométrique »** des données LiDAR

4.7 Partenariat et mutualisation

4.7.1 Coût du LiDAR, pourquoi mutualiser ?

Le coût d'acquisition de la donnée LiDAR est le principal frein à la valorisation des données. Il contient tout d'abord le coût fixe (matériel LiDAR, avion ou hélicoptère). Il est d'environ 7 000 à 8 000 euros (le prestataire d'acquisition LiDAR achète son matériel LiDAR qui coûte environ 800 000 euros). Ce coût fixe peut être plus facilement amorti lorsque le vol se réalise sur une grande surface ; ce qui réduit donc le coût unitaire à l'hectare.

Le coût variable est fonction des heures de vol de l'avion, qui sont, elles-mêmes liées à la surface survolée, au relief et à la densité de points sélectionnés.

Pour donner un ordre de grandeur, dans les conditions d'acquisition les plus faciles (surface plane, très grande superficie à survoler, faible densité de points) la fourchette varie entre 30 et 50 euros au km2 soit entre 0,3 et 0,5 ct d'euros à l'hectare.

Au contraire, la présence de relief important fait exploser les coûts. En effet le laser arrive parfois en bout de course et n'atteint plus le sol ; il faut alors voler plus bas, voire faire appel à un hélicoptère. De plus, la présence d'obstacles demande de réduire la longueur des bandes de vols, ce qui fait faire plus de virages à l'avion et donc perdre du temps. Les conséquences sont les mêmes pour une zone d'étude très morcelée, ce qui explique qu'il peut être parfois plus rentable de survoler un territoire dans sa totalité plutôt que quelques zones isolées de ce territoire.

La densité de points est un facteur également important, en effet le passage de 2 à 10 points au m2 n'influe pas spécialement sur le prix (grâce à la nouvelle technologie des lasers à haute fréquence) mais pour des densités plus élevées, le prix va forcément augmenter, puisqu'il faudra voler plus bas, à une vitesse réduite, et augmenter le recouvrement entre les bandes de vol.

C'est pourquoi les vols LiDAR nécessitent, en amont, d'établir un plan de vol optimisé ; un travail qu'il faut également rémunérer.

Enfin, après l'acquisition, il y a un travail de classification des points qui coûte également cher (3 à 10 km2 classifiable par jour et par personne), c'est pourquoi de nos jours la classification se fait de plus en plus par des entreprises étrangères.

Le coût d'acquisition de données LiDAR peut donc être très important et au vu des différentes applications de la donnée LiDAR et de la pluralité d'acteurs potentiellement intéressés (*partie 3.5*), il est intéressant de penser à mutualiser son coût d'acquisition. D'une part, en vérifiant si la zone qui nous intéresse a déjà été survolée par un LiDAR, si cela est le cas, il pourrait donc être opportun de récupérer ces données à un prix réduit. D'autre part, si la zone n'a jamais été survolée, il pourrait être financièrement intéressant de trouver des partenaires pour l'acquisition.

4.7.2 Freins à la mutualisation

La mutualisation des coûts d'acquisition de la donnée LiDAR est une très bonne chose, mais elle est difficile à mettre en place.

En effet, plusieurs paramètres peuvent freiner un projet de mutualisation.

Dans un premier temps**, les attentes des acteurs ne sont pas toujours les mêmes**. En effet, ils ne sont pas toujours intéressés par la même zone d'étude et même si intéressés par la même zone, ils peuvent ne pas vouloir la survoler au même moment. Cela pour différentes raisons : certains préfèreront un survol en feuille, d'autres hors feuille, les acteurs n'ont pas toujours un budget dédié à un projet LiDAR en même temps… Les caractéristiques de vol peuvent également freiner la mutualisation d'acquisition, puisque les acteurs n'ont pas la même utilisation de la donnée, certains se contenteront d'une densité de quelques points au m^2 alors que d'autres auront besoin d'une densité bien plus importante, par exemple.

Deuxièmement, le **partage des coûts** est également un paramètre bloquant. Il peut s'avérer parfois compliqué, surtout lorsque les acteurs sont nombreux, de s'accorder sur la façon de se partager les coûts d'acquisition.

Enfin, se pose alors la **question technique du partage de la donnée** une fois acquise. Les données issues de la télédétection sont assez lourdes à stocker, au moins un des acteurs participant doit avoir la capacité de stockage nécessaire. Une fois stockée, ces données devront être alors partagées entre les différents acteurs. C'est également une étape bloquante, puisque tous les acteurs n'ont pas vocation à être gestionnaire de données. De plus, le mode de diffusion de la donnée doit également être actée et normalisée entre des différentes structures. Le passage par une structure gestionnaire de données comme le Centre Régional Auvergnat d'Information Géographique (CRAIG) ou la Régie de Gestion des Données des Pays de Savoie (RGD 73-74) peut être une solution à ce problème.

4.7.3 Scénarios pour l'acquisition par l'agence ONF de Metz

Comme expliqué précédemment, plus la surface survolée est importante, plus le prix unitaire au km^2 ou à l'hectare sera faible. Le cas du survol total du sud de l'agence serait donc intéressant au niveau du prix unitaire. Toutefois, le budget total serait très important au vu de la surface de la zone, alors que les forêts qui intéressent l'ONF ne représentent, en surface, qu'un peu plus du dixième du sud de l'agence. Si l'ONF et plus particulièrement l'agence de Metz, se retrouve seule sur ce projet, il est quasiment certain que le budget nécessaire au relevé LiDAR de tout le sud de l'agence dépassera de loin les moyens financiers actuels dédiés à ce projet. Cette façon de procéder ne semble donc pas être la plus judicieuse sauf dans le cas d'une mutualisation de données. Il faudrait alors qu'un grand nombre d'acteurs du territoire soit intéressés par la donnée et se partagent donc les coûts d'acquisition ou qu'un acteur, comme une collectivité publique par exemple, finance l'ensemble de l'acquisition et redistribue les données moyennant une rémunération.

L'autre solution serait donc que l'ONF se charge du pilotage et du financement du projet sur la zone d'étude réduite définie précédemment, ce qui réduirait fortement le coût total de l'acquisition. Une fois les données réceptionnées, elles pourront être proposées et transmises à d'autres acteurs sous forme brutes ou traitées, moyennant rémunération ou non.

Dans le cadre de ce projet, j'ai donc cherché à contacter différents acteurs ou structures pouvant être intéressés par cette donnée LiDAR.

Mon premier réflexe a été de me tourner vers le conseil général de la Moselle afin de voir si une acquisition à grande échelle était possible. Malheureusement, le conseil de la Moselle avait déjà réalisé un vol LiDAR en 2011, il n'est donc pas, pour le moment, intéressé par une nouvelle couverture. Cette couverture LiDAR n'a pas pu être utilisée pour notre projet à cause d'une densité de points bien trop faible, rendant donc les données inexploitables pour un projet forestier. J'ai également contacté les acteurs de la forêt privée comme le CRPF ou la plus importante coopérative de la région Forêt et Bois de l'EST. Ils sont très intéressés pour voir les progrès de la télédétection et voir à partir des résultats obtenus, s'il serait possible pour eux d'en faire usage. Toutefois, les forêts privées n'étant pas très nombreuses sur notre zone d'étude, ils ne participeront certainement pas financièrement à ce projet. La chambre d'agriculture n'a pas vu d'intérêt direct dans ce projet pour leur activité. La région Grand Est qui actuellement est en train de recenser les différentes données de télédétection disponibles sur le territoire afin de créer une couche SIG contenant toutes ces données ne peuvent pas participer à notre projet, puisque l'acquisition de données ne fait pas partie de leur mission actuellement.

D'autres acteurs rencontrés semblent disposés à participer financièrement, à leur hauteur, à ce projet d'acquisition LiDAR. Le pôle archéologie de la DRAC Grand-Est situé à Metz serait très intéressé par l'acquisition de ces données, afin de les utiliser pour la recherche de vestiges en forêt. J'ai également rencontré Monsieur Robin, chercheur à l'université de Lorraine, qui serait également intéressé par les données LiDAR qui seraient acquises par l'agence de Metz. De son coté, il pourrait fournir à l'agence de Metz des données LiDAR concernant la forêt de Guessling se trouvant dans le sud de l'agence, mais pas dans la zone d'étude restreinte et il collabore déjà avec l'agence ONF de Sarrebourg sur la forêt de Mouterhouse. Il cherche également à former un noyau dur d'acteurs collaborant pour la future acquisition de données LiDAR puisque son projet de recherche devrait être rapidement financé par la région, il aurait donc une enveloppe monétaire assez conséquente pour de prochaines acquisitions.

5 Pistes d'avenir en télédétection

5.1 Une nouvelle technologie de télédétection : la photogrammétrie

La photogrammétrie, tout comme le LiDAR, fait partie des technologies sur lesquelles l'ONF a beaucoup investi. En effet, l'acquisition de photographies aériennes avec un fort recouvrement (80 % entre les photos et 60% entre les bandes de vol) permet l'obtention d'ortho photo. Toutefois, en recherchant les points homologues sur les différentes photos et en triangulant, il est également possible d'obtenir un MNS en trois dimensions (3D). En effet, la superposition stéréoscopique de ces photographies va donc permettre de reconstituer la sensation de 3D et ainsi de modéliser un MNS et des variables dendrométriques comme cela serait fait avec le LiDAR. Ceci dit, il faut tout de même garder en tête que, contrairement au LiDAR, la photogrammétrie n'apportera pas d'informations sous la canopée et les données dendrométriques seront donc obtenues à partir des caractéristiques du houppier des arbres. Le MNS apporté par la photogrammétrie auquel on soustrait un MNT précis permettra alors d'obtenir un MNH. Suite au projet LiDAR, l'agence de Metz devrait récupérer un MNT de bonne qualité, donc potentiellement utilisable par la suite en photogrammétrie. Notons tout de même qu'un algorithme est également en cours de recherche, afin de détecter directement les houppiers dans le MNS issus de la photogrammétrie sans besoin de MNT préalable.

Actuellement, le modèle standard ortho photo de l'IGN n'est pas utilisable en photogrammétrie c'est pourquoi, l'IGN travaille en coopération avec L'ONF, en fournissant des données qui sont ensuite testées par le pole RDI de l'ONF pour voir si elles sont utilisables pour des projets forestiers. La stratégie repose sur le fait que l'IGN survole l'ensemble du territoire tous les 3 à 5 ans ; il serait alors intéressant de créer une chaîne de traitement avec eux, afin d'obtenir un MNS photogrammétrique à l'échelle de la France. Une convention est en train d'être mise en place entre ces deux structures. Les images satellitaires pourraient également être utilisables en photogrammétrie, toutefois, la résolution spatiale sera moins importante et la donnée sera donc moins précise, hormis s'il y a utilisation d'images satellitaires « pléiades ». Cette technologie permettrait donc l'obtention d'informations proches de celles apportées par le LIDAR, mais à moindres coûts. Ce serait donc un outil potentiellement intéressant dans notre cas, pour la mise à jour de la donnée LiDAR.

5.2 Un matériel de plus en plus performant

Il faut savoir qu'en télédétection, il est bien plus difficile d'identifier la nature d'un objet que de caractériser sont emplacement. Une des pistes d'amélioration pour ce qui est de l'identification des différentes essences forestières, est l'utilisation de la phénologie (étude de l'apparition d'événements périodiques dans le monde vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat). En effet, bien comprendre le comportement des arbres permettrait de mieux les cartographier.

L'arrivée du satellite « Sentinel 2 » équipé d'un capteur optique multispectral, apporte des informations dans le proche infrarouge et l'infrarouge (5 bandes spectrales) permettant de caractériser l'activité de la végétation par l'appréciation de la structure cellulaire des feuilles. Cette information, croisée à l'activité des pigments détectables dans le visible et la teneur en eau des feuilles évaluable dans le moyen infrarouge (2 bandes), permettrait alors possiblement de différencier les essences forestières. Ces nouvelles informations, gratuites et acquises régulièrement (tous les 5 jours) semblent plutôt prometteuses. Toutefois, il faut garder à l'esprit que ces données doivent être corrigées, ortho rectification et correction de l'effet de l'atmosphère, ce qui demande déjà certaines compétences.

Le couplage de ces données satellitaires avec la phénologie (période de défeuillaison, de floraison, de fructification des différentes essences) par intelligence artificielle permettrait donc de cartographier les différentes espèces. Encore une fois, la calibration des différents algorithmes nécessaires à l'automatisation de

la détection des essences demande des compétences particulières qui doivent encore être développées. De plus, la calibration de ces algorithmes exige d'avoir des références de terrain en grande quantité et de qualité homogène ; ce qui n'est pas toujours le cas et peut s'avérer coûteux.

Autres matériels :

L'utilisation des drones est en plein essor dans grand nombre de secteurs d'activité. Les drones peuvent en effet être utilisés en tant que vecteur en télédétection. Actuellement, ils ne sont pas très utilisés lors d'acquisition LiDAR puisque la base inertielle enregistrant l'altitude du capteur est d'autant plus précise qu'elle est lourde. Un drone ne pouvant pas supporter des charges trop importantes (pour le moment) la précision sur l'altitude sera donc moins bonne. De plus, son altitude de vol et son temps d'autonomie ne permettent pas le survol de grandes surfaces. Toutefois, la prise de photo par drone apporte une précision intéressante, qui pourra s'avérer être utile à l'avenir sur de petites surfaces. En clair, les drones peuvent représenter l'avenir de la télédétection, toutefois quelques avancées technologiques doivent encore être trouvées.

Le LiDAR terrestre pourrait également être une piste d'avenir pour la télédétection et surtout pour des utilisations sporadiques, comme par exemple l'utiliser pour la mesure des placettes de calibration LiDAR ou pour la récupération de données terrains nécessaires à toute calibration de modèles mathématiques utilisés dans les différentes approches de télédétection.

Figure 15 : Image obtenue avec LiDAR terrestre

De nouveaux capteurs LiDAR font également leur apparition. C'est le cas de la technologie Single Photon LiDAR (SPL), cet émetteur permet d'envoyer une densité de points bien plus importante que la normale, ce qui permettrait alors, de diminuer le coût d'acquisition en volant plus haut en altitude et donc en survolant la zone d'étude beaucoup plus rapidement tout en conservant tout de même une densité de points au sol importante. Cette technologie pourrait à l'avenir permettre d'obtenir de la donnée LiDAR au prix de la photographie. Pour le moment, cela reste utopique ou seulement réalisable à l'échelle de très grandes surfaces comme celle d'un pays. En effet, pour le moment seuls deux prestataires ont investi dans cet appareillage très coûteux, dont un aux Etats-Unis, qui se déplace uniquement pour des acquisitions de grandes envergures.

5.3 Amélioration des modèles et des approches en télédétection

Une amélioration de la modélisation de la surface terrière ou de la structure en diamètre d'un peuplement reste possible avec le LiDAR. En effet, cette amélioration serait possible par la méthode déjà citée précédemment : la détection de troncs qui consiste à repérer des alignements de points dans le nuage 3D représentatif des troncs des arbres. Une fois ces troncs détectés, il suffirait alors d'utiliser de simples relations géométriques pour obtenir leur diamètre qui deviendrait alors la seule variable explicative dans la modélisation de la surface terrière, ainsi que dans la modélisation de la répartition des arbres, par classe de diamètre. Cette méthode permettrait de s'affranchir des relations allométriques utilisées actuellement à l'ONF dans la méthode d'individualisation des houppiers et donc de supprimer les erreurs dues à ces relations. Cette méthode de détection de tronc a déjà été utilisée dans le cadre d'un projet « démonstrateur » sur la forêt de Saint-Gobain. Les résultats obtenus n'étaient pas à la hauteur des attentes. Les erreurs provenaient du fait que les petits bois n'étaient pas toujours repérés et que parfois, une cépée de plusieurs brins pouvait être détectée comme un arbre de gros diamètre. Cependant, le fait de s'affranchir des relations allométriques qui ne peuvent pas beaucoup être améliorées, permet de dire que cette méthode de détection a encore un fort potentiel de progression. D'ailleurs, un travail de recherche sur cette approche a lieu actuellement, sous forme de stage, au sein du département RDI de l'ONF.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons constaté que le moyen d'acquisition choisi pour la récolte de données de télédétection et surtout le vecteur utilisé dépendaient fortement de l'emprise de la zone d'étude et de la résolution spatiale désirée. Un drone par exemple, sera plutôt utilisé sur de petites emprises pour obtenir une forte résolution spatiale. Au contraire, une très grande surface sera plutôt observée par satellite avec des disponibilités en résolution spatiale plus au moins importantes en fonction des différents capteurs disponibles.

La disponibilité des données dépend quant à elle également de la technologie de télédétection choisie : les données satellitaires à haute résolution (10à 20 m) sont disponibles au moins une fois par mois (« Sentinel 2 », données disponibles tous les 5 jours), les photographies aériennes standards de l'IGN sont disponibles tous les 3 à 5 ans sur l'ensemble du territoire français, pour ce qui est de photographies aériennes sur mesure, de données satellitaires à très haute résolution ou d'acquisition LiDAR, cela se fait sur commande.

Comme vu tout au long de ce mémoire, il n'existe pour le moment pas de technologie de télédétection apportant toutes les données nécessaires à l'élaboration d'aménagement forestier. Chaque technologie de télédétection a ses avantages et ses inconvénients. Dans le cadre du projet de l'agence de Metz, c'est le LiDAR qui a été retenu, de par les connaissances en interne concernant cette technologie, par son apport sur ce qui se passe sous la canopée et pour sa capacité à fournir des données dendrométriques spatialisées et en continu. Certaines données seront donc manquantes pour l'aménagiste telles que la composition en essence, la structure en diamètre ou d'autres informations qualitatives. Il faudra alors récupérer ses données manquantes en retournant sur le terrain mais également optimiser les nouvelles données apportées par le LiDAR de façon à utiliser tout le potentiel.

En plus de ne pas pouvoir apporter toutes les données nécessaires au forestier, la télédétection ne sait pas encore se passer de la donnée terrain. En effet, afin d'automatiser des détections grâce à l'intelligence artificielle et aux algorithmes mathématiques, les données brutes de télédétection ne suffisent pas et ont besoin d'être combinées avec des références de terrain qu'il faut aller relever sur le terrain le plus précisément possible et de façon homogène. Ce qui signifie bien, pour les sceptiques, que la télédétection ne signe pas la fin des phases de terrain. Au contraire, les données terrain sont complémentaires, voire indispensables à la télédétection. En outre, le traitement des données de télédétection et la confection des différents modèles de calcul nécessitent une expertise métier importante, que ce soit dans l'analyse, la validation ou l'interprétation des résultats.

Enfin, nous avons également vu que de belles pistes d'avenir s'ouvraient en télédétection, que ce soit par de nouvelles technologies comme la photogrammétrie, par l'amélioration et la fabrication de nouveaux modèles de calcul et de nouvelles approches, comme la détection des troncs avec le LiDAR ou par l'arrivée de nouveaux matériels plus performant comme le SPL ou les capteurs optiques multi, voire hyper spectrales. C'est finalement en combinant ces différentes technologies que nous pourrons profiter de toutes les possibilités offertes par la télédétection.

BIBLIOGRAPHIE

Bock, J. « Modélisation dendrométrique à partir de LIDAR- FD la Commanderie », s. d., 11.

Bock, J, A Imami, et A Munoz. « Bilan de la modélisation de variables dendrométriques par détection d'arbres sur Orléans - Les Bordes », s. d., 22.

« Dossier : La télédétection au service de la gestion forestière ». *Forêt entreprise*, nº 247 (juillet 2019).

Dubourdieu, Jean. *Manuel d'aménagement forestier*. Paris: Technique & Documentation - Lavoisier, 1997.

Durand, Charlotte. « Utilisation du LiDAR aérien pour l'élaboration et le suivi des aménagements forestiers », 2019, 29.

« Gérer les forêts ». Office national des forêts, 20 février 2019. https://www.onf.fr/onf/lonf-agit/+/15::gerer-les-forets.html.

Jolly, Anne. « UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LA GESTION FORESTIÈRE », s. d., 6.

Jolly, Anne, et Catherine Riond. « Les démonstrateurs : une étape importante entre R&D et application opérationnelle ». *RDV techniques*, nº 50 (hiver 2016): 6.

LAROUSSINIE (Olivier), et Bergonzini (J.C.). « Pour une nouvelle définition de l'aménagement forestier en tant que discipline d'ingénieur. » *Revue Forestière Française*, nº sp (1999): 117. https://doi.org/10.4267/2042/5488.

Lepoutre, D., C. Leprieur, et J.L. Peyron. « Télédétection et forêts : situation actuelle en Suède et perspectives pour la France ». *Revue Forestière Française*, nº 4 (1986): 385. https://doi.org/10.4267/2042/25665.

« Les documents de gestion durable des forêts privées : SRGS, PSG, CBPS, RTG - Forêt Privée Française ». Consulté le 21 mars 2019. https://www.foretpriveefrancaise.com/n/les-documents-de-gestion-durable-des-forets-privees-srgs-psg-cbps-rtg/n:146.

« Les techniques d'observation à distance : quels usages pour la forêt ? », 9 octobre 2017.

Maltamo, Matti, Erik Næsset, et Jari Vauhkonen, éd. *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies*. Managing Forest Ecosystems 27. Dordrecht: Springer, 2014.

« Modélisation des paramètres forestiers à l'aide de données LiDAR aéroporté - Projet démonstrateur sur les forêts domaniales de Saint-Gobain et Coucy-Basse », 17 décembre 2015.

Morogues, Francis de. « Note d'opportunité sur une couverture Lidar du département de l'Isère. », s. d., 11.

Munoz, A. « Modélisation des paramètres forestiers à l'aide de LiDAR aéroporté sur la Forêt Domaniale de Tronçais (03) », 15 mars 2018.

Munoz, A, J Bock, Anne Jolly, Catherine Riond, et L Descroix. « Notice méthodologique de rédaction d'un cahier des clauses techniques particulières (CCTP) », 19 avril 2017.

Peyron, J.L., Catherine Leprieur, et J.M. Durand. « Application de la télédétection à l'aménagement des forêts tempérées ». *Revue Forestière Française*, nº S (1988): 85. https://doi.org/10.4267/2042/25939.

Sanchez, Nuria. « VALIDATION DE L'ESTIMATION DE LA HAUTEUR DES JEUNES PEUPLEMENTS FORESTIERS A PARTIR DE DONNEES LIDAR AERIEN », 2013.

LISTE DES CONTACTS

Pierre-Jean MOREL, Directeur agence territoriale ONF de Metz

Alain LARCHER, Responsable du service forêt, agence de Metz

Francis STUMPF, Responsable SIG, agence de Metz

Thierry BRAUSSEN, Géomaticien, agence de Metz

Michel BLANCHET, Responsable de production aménagement, agence de Metz

Francois LUKAS, Chef de projet aménagement, agence de Metz

Irène BEE, Chef du service forêt, agence de Sarrebourg

Lilian DUBAND, Chef de projets complexes, agence de Verdun

Marine ROUSSEL, Responsable de la cellule aménagement, DT Seine Nord

Anne JOLLY, Chef de pole, Chargée de R&D Télédétection, pole Nancy

Alexandre PIBOULE, Chargé de R&D, pole Nancy

Jerome BOCK, Chargé de R&D Géomatique Lidar, pole Chambéry

Alain MUNOZ, Chargé de R&D télédétection, pole Chambéry

Maxime ROUSSEAU, Chef de projet chez SINTEGRA

Jean-Matthieu MONNET, Ingénieur de recherche à l'IRSTEA

Pauline WERNERT, Cheffe de projet SIG et géomatique pour la région Grand Est

Vincent ROBIN, Chercheur à l'Université de Lorraine

Xavier MARGARIT, Responsable service régional de l'archéologie, site de Metz

Stéphanie JACQUEMOT, Archéologue service régional de l'archéologie, site de Metz

TABLES DES ANNEXES

Annexe 1 : CCTP vol LiDAR 55

Annexe 2 : Protocole de relevé de données sur les placettes de calibration 62

Annexe 3 : Fiche de projet à l'intention de la DT Grand-Est 70

Office National des Forêts

Service forêt de l'agence de Metz

CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES (CCTP) POUR UNE PRESTATION D'ACQUISITION DE DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION AÉRIENNE PAR LASER DITE « LIDAR »

Forêts du sud de la Moselle

Objet du marché

Les prestations objet de la présente consultation portent sur l'acquisition de données de télédétection aérienne par « LIDAR » sur une zone constituée de plusieurs massifs forestiers situés dans le sud de la Moselle.

Pouvoir adjudicateur

La personne publique est l'Office national des forêts (ONF), établissement public à caractère industriel et commercial, immatriculé sous le numéro unique d'identification SIREN 662 043 116 Paris RCS dont le siège est situé 2, avenue de Saint-Mandé à PARIS 12ème, ci-après désigné l'ONF.

Personne signataire du marché

1. OBJET - OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Le présent marché porte sur l'acquisition de données LIDAR aéroporté multi-échos (semis de points 3D), sur leurs post-traitements et leurs dérivations sous forme de modèle numérique de terrain (MNT), de modèle numérique de surface (MNS) et de modèle numérique de hauteur (MNH).

Le secteur concerné est situé sur le sud de l'agence de Metz en Moselle sur une surface 10 915 ha. Il s'agit d'une zone constituée d'une quinzaine de forêts éparpillées sur le sud du département mosellan et gérée par l'ONF. Elles sont localisées en zone de plaine, sur le plateau Lorrain avec un relief peu marqué. Les peuplements forestiers sont composés quasi exclusivement de feuillus (chêne et hêtre) dans un contexte de gestion en futaie régulière.

La mission de LiDAR aéroporté doit permettre l'acquisition de données topographiques et forestières, avec notamment l'estimation et la localisation de la ressource forestière ; la cartographie des hauteurs, de la surface terrière et du diamètre dominant des peuplements forestiers ; la détection de la desserte forestière existante (routes et pistes forestières) ; la détection d'éventuels vestiges archéologiques.

2. CARACTERISTIQUES DE LA PRESTATION DEMANDEE

Mission aérienne avec prise de données LiDAR multi-échos et restitution de données devant respecter au minimum les spécifications listées ci-après.

2.1 Emprise concernée

Tranche ferme :

Les levés et la restitution des données devront couvrir au minimum la zone décrite par la carte jointe en annexe au CCTP et correspondant au fichier numérique ([massif_zone_final] format Shapefile en Lambert 93) fourni avec le présent CCTP. Cette zone représente une surface d'environ 10 915 ha.

Deuxième option :

Les levés et la restitution des données devront couvrir au minimum la zone décrite par la carte jointe en annexe au CCTP et correspondant au fichier numérique ([massif_zone_final2] format Shapefile en Lambert 93) fourni avec le présent CCTP. Cette zone représente une surface d'environ 15 165 ha.

2.2 Conditions et période d'acquisition

- Conditions météorologiques favorables avec sol sec, sans brouillard, et aucune couverture neigeuse sur l'ensemble de la zone levée.
- Période d'acquisition située entre le 01/12/2019 et le 31/03/2020 correspondant à une période d'acquisition hors feuille.

2.3 Caractéristiques du levé Lidar

2.3.1 Densité d'émission

- La densité minimale d'émission devra être de 10 impulsions par mètre carré (recouvrement entre bandes de vol compris).
- La validité de cette densité sera calculée par la moyenne des densités émises (premiers retours) sur chaque cellule élémentaire de 100 m^2 (soit 10 x 10 m).

- La surface cumulée des cellules élémentaires de 100 m² (10 x 10 m) sur lesquelles la densité émise est inférieure à 10 points par m^2 ne devra pas dépasser 5% de la surface de l'emprise levée.
- Le prestataire devra s'assurer d'une bonne isotropie de la répartition des points en XY – RECOUVREMENTS COMPRIS. Pour cela il devra notamment s'assurer d'un recouvrement suffisant entre les bandes de vol (d'au moins 50% entre 2 bandes de vol).

2.3.2 Densité de points sols

- La surface unitaire maximale sans point au sol est fixée à 25 m^2 (5 x 5 m).
- La surface cumulée des cellules élémentaires de 25 m² (5 x 5 m) sans points sols ne devra pas dépasser 2.5% de la surface de l'emprise levée.

2.3.3 Taille de l'empreinte au sol

La taille de l'empreinte au sol devra être inférieure à 50 cm.

2.3.4 Précision

La précision minimale des points (pour chaque écho du signal LiDAR) devra être de :

- 40 cm en planimétrie (XY)
- 20 cm en altimétrie (Z)

2.3.5 Angle de fauchée

L'angle de fauchée d'acquisition du nuage LiDAR ne devra pas excéder ± 30° par rapport au nadir.

2.4 Traitement des données brutes

2.4.1 Nuage de points bruts

Différentes opérations techniques seront réalisées par le prestataire, afin d'aboutir à la mise en géométrie du nuage de points lidar, au recalage relatif des différentes bandes d'acquisition et à la classification du nuage de points bruts au minimum en quatre catégories : sol (classe 2), sursol (classe 4), eau (classe 9), pylônes et câbles (classe 10) ou en classes détaillées : sol (2), végétation (3 à 5), bâtiment (6), eau (9), pylônes et câbles (10).

2.4.2 MNT, MNS, MNH

Calcul du modèle numérique de terrain (MNT), d'un modèle numérique de surface (MNS) et d'un modèle numérique de hauteur (MNH ou CHM : Canopy height model) au pas de 1 m (cellules ou pixels carrés de 1 x 1 m) :

- Le MNT correspond aux valeurs d'altitude du sol
- Le MNS correspond aux valeurs d'altitude des points les plus élevés (canopée, bâtiment … ou du sol dans les zones dégagées)
- Le MNH correspond au MNS soustrait du MNT

Pour le calcul, il conviendra de tenir compte et corriger les éventuels décalages des altitudes entre bandes de vols (soit en utilisant l'option TerraMatch de Terrascan ou d'une application similaire ; soit en réalisant une classification sol / sursol par bande de vol puis en ajustant l'ensemble du nuage de point).

3. DONNEES ET DOCUMENTS A LIVRER

3.1 Caractéristiques générales

3.1.2 Support de livraison

L'ensemble des données sera livré sur un disque dur externe (ou clef USB) fourni par le prestataire et conservé comme archive par le maître d'ouvrage.

3.1.3 Système de projection

Toutes les données géographiques seront fournies en système géodésique RGF 93 Lambert 93 métrique avec une altitude exprimée dans le système NGF/IGN69.

3.2 Nuage de points bruts

3.2.1 Découpage des données

Les données seront fournies découpées :

- en dalles carrées jointives de 500 x 500 m (cotés parallèles aux axes X et Y du référentiel géographique)
- et en dalles carrées de 500 x 500 m (cotés parallèles aux axes X et Y du référentiel géographique) avec un tampon supplémentaire (recouvrement entre dalles) de 25 m.

3.2.2 Format de données

Le nuage de points bruts sera fourni au format binaire LAS (version 1.1 à 1.3) et en respectant les spécifications de l'ASPRS, dans un fichier unique par dalle.

Le nom des dalles (et donc des fichiers correspondants) ne devra pas dépasser 12 caractères et excluant tous les espaces ou caractères spéciaux (« , », « . », « / », « \ », « - », etc).

3.2.3 Métadonnées et informations du nuage de points

Pour chaque fichier les métadonnées (blocs « PUBLIC HEADER BLOCK » et « VARIABLE LENGTH RECORDS ») seront renseignées.

Pour chaque point (écho du signal LiDAR) les informations suivantes devront être renseignées en concordance avec la spécification de l'ASPRS :

- X, et Y et Z (coordonnées planes Est, Nord et Altitude)
- Intensité (Intensity)
- Numéro de retour (Return Number) et Nombre de retours (Number of Returns (given pulse)) en respectant les normes de l'ASPRS et permettant d'identifier clairement le type de retour (premier, dernier, intermédiaire)
- Classification (Classification) :
    - le nuage de points sera classifié au minimum en 4 classes permettant de distinguer les points sol (classe 2), sursol (classe 4), eau (classe 9), pylônes et câbles (classe 10).
    - OU en classes détaillées : sol (2), végétation (3 à 5), bâtiment (6), eau (9), pylônes et câbles (10).
    - les points aberrants (tel que « Low Point » ou « noise ») seront filtrés (exclus) du nuage livré.
- Angle de scan (Scan Angle Rank)
- Temps GPS (GPS Time)
- Numéro de la bande de vol (dans le champ point_source_ID)

- ***3.2.4 Livraison complémentaire en hauteur / sol***

Une livraison complémentaire du nuage de points bruts sera réalisée, avec les mêmes spécifications, en remplaçant la valeur Z (altitude) de chaque point par sa hauteur par rapport au sol. Le calcul est réalisé par la différence d'altitude de chaque point LiDAR et du TIN (Réseau de Triangles Irréguliers) créé à partir des points classés sol.

Au final, le nuage de points est donc à fournir en 4 lots : dalles jointives avec altitude, dalles jointives avec hauteur, dalles avec tampon de 25 m et altitude, dalles avec tampon de 25 m et hauteur.

• 3.3 Modèle numérique de terrain (MNT), Modèle numérique de surface (MNS), Modèle numérique de hauteur (MNH)

- ***3.3.1 Découpage des données***

Les données seront fournies pour chaque modèle (MNT, MNS, MNH) découpées en dalles carrées (parallèles aux axes X et Y du référentiel géographique) jointives de 1 x 1 km.

- ***3.3.2 Format de données***

Chaque modèle (MNT, MNS, MNH) sera fourni au pas de 1 m (cellules ou pixels carrés de 1 x 1 m) au format Esri Grid Ascii (.asc) dans un fichier unique par dalle.

Le nom des dalles (et donc des fichiers correspondants) ne devra pas dépasser 12 caractères et excluant tous les espaces ou caractères spéciaux (« , », « . », « / », « \ », « - », etc).

• 3.4 Plan d'assemblage des fichiers fournis

Les plans d'assemblage des données livrées (nuage de points bruts, MNT, MNS et MNH) seront fournis au format PDF et Shapefile (comportant un attribut spécifique indiquant le numéro de dalle).

• 3.5 Plan de vol

Le plan de vol ainsi que les axes (bandes ou lignes de vol) seront fournis sous forme de carte (au format PDF) et de fichiers géoréférencés (au format Shapefile contenant le numéro de la bande de vol).

• 3.6 Trajectographie

Afin de corriger l'atténuation géométrique pour les valeurs d'intensité, la trajectoire du vecteur (avion, hélicoptère, etc.) sera fournie sous forme de fichier texte contenant :

- La position X, Y, Z du vecteur
- Le temps GPS, compatible avec les informations contenues dans les fichiers Las du nuage de points brut (notamment avec un nombre de décimal compatible)
- Le Pitch (tangage), Yaw (lacet) et Roll (roulis)

• 3.7 Surfaces de contrôles

Des surfaces permettant de contrôler et valider la précision du nuage de points bruts (notamment en altimétrie) devront être mises en place.

Un rapport détaillé avec description du protocole de vérification, localisation des surfaces de contrôle, les résultats précis obtenus et le cas échéant mesures correctrices mises en œuvre sera fourni.

• 3.8 Rapport de mission

Le prestataire remettra lors de la livraison des données un rapport de mission (au format papier et numérique PDF) contenant au minimum les informations suivantes :

- Rapport et plan de vol : dates de vol, type d'aéronef, conditions météo lors de la mission et dans les heures précédant la mission, …
- Spécifications techniques de l'acquisition : matériel LiDAR utilisé, paramétrages, altitude de vol, contrôles GPS sol éventuels, etc…
- Traitement des données : systèmes mis en œuvre (notamment logiciels) méthodes utilisées pour le prétraitement des données, l'ajustement entre bandes de vol, le calcul du MNT et du MNS (mode d'interpolation, traitement des « trous » sans données, etc…)
- Tous les éléments utilisés pour le contrôle qualité (en particulier le bilan des surfaces de contrôle dont la localisation et les mesures de terrain)

• 4. RENSEIGNEMENTS TECHNIQUES A FOURNIR AVEC L'OFFRE

Le prestataire intégrera dans son offre une note technique et méthodologique, comprenant toutes les informations utiles à l'analyse de l'offre. **Au minimum** :

- Les moyens mis en œuvre pour arriver à obtenir les spécifications du présent CCTP.
  - Le type de vecteur retenu (avion, hélicoptère, ULM …).
  - Le type de scanner et ses caractéristiques techniques (fréquence de scan, fréquences impulsions, nombre d'échos enregistré par impulsion).
  - Le plan de vol prévisionnel avec la hauteur par rapport au sol, la vitesse, l'angle de fauchée, la largeur des bandes de vol, le recouvrement latéral (entre 2 bandes), la distances inter-bandes, la cartographie des bandes de vols (ou lignes de vol) prévues.
  - Le nombre de points émis attendu par m² (par bande de vol et au total avec le recouvrement compris) ainsi que le nombre de points au sol attendus au m².
  - La précision altimétrique et planimétrique des points ainsi que la taille de de l'empreinte au sol.
  - La méthode de classification du nuage de points utilisée (algorithme, logiciels, classes distinguées, vérification de la classification).
  - Les surfaces de contrôle et de calibration mises en œuvre (nombre de surfaces et nombre de points de contrôle).
  - La période d'intervention prévue
- Des références d'autres prestations réalisées sur ce type de mission : client, lieu des missions réalisées, objectif des missions, nombre de km² d'acquisition LIDAR réalisée sur zone forestière pour chaque mission, qualité des données, ...

• 5. CALENDRIER, CONTROLE ET PROPRIETE DES DONNEES

• 5.1 Réception des données, contrôle qualité par le commanditaire

Le maître d'ouvrage se réserve le droit d'effectuer un contrôle qualité après la livraison des travaux. En cas de non concordance avec les spécifications du présent CCTP, le maître d'ouvrage se réserve le droit de refuser les travaux. Le prestataire devra alors prévoir à sa charge la correction des erreurs relevées.

Une nouvelle acquisition LIDAR (de toute ou partie de la zone, selon la nature des problèmes rencontrés), à la charge du prestataire (sans frais supplémentaire pour l'acquéreur), pourra être demandée si l'une des conditions suivantes n'est pas respectée :

- <u>données manquantes sur l'emprise demandée</u>
- <u>densité minimum de points requise non atteinte</u>

• 5.2 Délai de réalisation

Le délai maximum pour la réalisation du vol est fixé au 31/03/2020.

Le délai maximum pour la livraison des données traitées est fixé au 30/04/2020.

Le délai maximum pour la vérification des données par le maître d'ouvrage est fixé au 31/05/2020.

Le délai maximum pour la remise du dossier complet est fixé au 30/06/2020.

• 5.3 Chronologie – balises et réunions

Date / période prévisionnelle	***Evènement***
Du 01/09/2019 au 15/11/2019	Réunion pour valider le vol planifié
Du 01/12/2019 au 31/03/2020	Acquisition *(bilan du vol et validation par l'ONF suite au rapport de vol)*
DU 01/12/2019 au 30/04/2020	Traitement des données
DU 01/12/2019 au 30/04/2020	Livraison données en concordance avec les spécifications du CCTP
DU 01/12/2019 au 31/05/2020	Vérification des données par le maître d'ouvrage
DU 01/12/2019 au 30/06/2020	Remise définitive du dossier complet (dossier technique et données corrigées)

• 5.4 Pénalités pour retard

Si pour quelque raison que ce soit, les livraisons n'étaient pas effectuées dans les délais prévus, le titulaire se verrait appliquer des pénalités de retard calculées suivant la formule suivante :

$$P = (V \times R) /300$$

Dans laquelle : P = montant des pénalités

V = valeur de l'ensemble des données non livrées dans les délais prévus

R = nombre de jours de retard

• 5.5. Propriété des données

Les données et documents produits dans le cadre du présent marché seront la propriété exclusive du maitre d'ouvrage.

Agence de Metz

Acquisition LIDAR 2019/2020

Protocole de relevé de données sur les placettes de calibration LiDAR

Matériel par binôme :

- *1 Trimble GEO 7X et son trépied*
- *1 atlas contenant les cartes de localisation des placettes*
- *1 protocole version papier*
- *1 compas forestier de 100 cm*
- *1 vertex avec piles chargées et pied (**Penser à le calibrer à chaque demie journée et ne pas le mettre dans sa poche « voir annexe A2 : fig 7 et 8**)*
- *1 décamètre*
- *1 boussole Sunto*
- *1 crayon à papier*
- *1 bombe de peinture*
- *1 marteau avec des plaquettes*

Cheminement et matérialisation de la placette :

Le cheminement est une étape chronophage lors de ce genre d'opération il faut donc optimiser les déplacements.
Utiliser l'atlas de localisation des placettes afin de se rapprocher le plus possible en véhicule de la placette choisie. Ensuite, se déplacer jusqu'à la placette, en utilisant le Trimble dans lequel les coordonnées du centre des placettes sont enregistrées (*voir annexe A1 : fig 5*). Une fois proche du centre de la placette (moins de 2m) tenter de s'en approcher encore pendant 1 minute.

Si le centre de la placette tombe à moins de 2 m d'un arbre, se diriger systématiquement de 3 pas vers le Nord de façon à s'écarter du tronc.

Matérialiser le centre de la placette à l'aide d'un piquet métallique planté jusqu'au ras du sol.

Placettes non réalisables :

Plusieurs cas se présentent :
- lorsque le centre est inaccessible (clôturée, falaise, mare…)
- lorsqu'une partie de la placette ne se situe pas dans le domaine d'inventaire (route revêtue, route forestière, zone non boisée…)

En général, on cherchera à décaler la placette sur le terrain, selon les règles précisées ci-après.

Lorsque le centre se situe dans le domaine d'inventaire mais à une distance de la limite inférieure au rayon (R) de la placette, le principe retenu est de déplacer le centre perpendiculairement à la limite afin qu'il se situe à une distance de la limite au moins égale au rayon. Si la nouvelle position est valide, cela devient la nouvelle position pour le centre de la placette. Indiquer alors dans « placette modif » que la placette a été déplacée et expliquer la raison du déplacement dans « raison modif ».

Lorsque le centre de la placette se situe en dehors du domaine d'inventaire, sur une strate différente de celle prévue ou s'il est simplement inaccessible, on ne décale pas la placette. Elle n'est pas réalisée et on indique dans « placette modif » hors inventaire.

Attention, la présence d'une piste ou d'un cloisonnement sur la placette ne justifie pas de supprimer la placette ou de la décaler, tout comme la présence de 2 peuplements distincts.

Pour les placettes non réalisées sur le terrain, il faut les remplacer par des placettes de la liste complémentaire (placettes systématiques).

Géoréférencement de la placette :

Créer un nouveau fichier par journée de travail en utilisant le dictionnaire d'attributs créé pour le projet.
Positionner le trépied au-dessus du centre de la placette, puis poser le récepteur GNSS Trimble de façon stable sur le trépied. **Ne pas poser le GNSS au sol**
Après démarrage, un temps d'initialisation est nécessaire afin que le GNSS utilise le maximum de satellites (sur le plan du ciel, ceux sur fond noir) pour garantir un bon niveau de précision. Pour être certain que l'initialisation est terminée, il faut avoir le moins de satellites sur fond blanc (non utilisés).
Créer un fichier et lancer la mesure de position (*voir annexe A1 : fig 6*). **Bien noter le numéro de la placette.**

Poursuivre la mesure jusqu'à l'obtention du nombre de 300 enregistrements (5 mn). Durant la mesure, éviter de se positionner ou de se déplacer à proximité du GNSS.

Inventaire dendrométrique de la placette dans les peuplements adultes :

Tous les arbres vivants dans un **rayon de 15 m** avec un **diamètre supérieur ou égal à 17,5 cm** sont inventoriés. Les arbres morts avec un diamètre supérieur à 17,5 cm et ayant encore une bonne partie de leur houppier en place sont également inventoriés. Pour les arbres limites, c'est la moyenne des deux diamètres qui fait foi.

Les informations à prendre pour chaque arbre dont le centre se situe dans le rayon de la placette sont **le numéro de l'arbre, l'essence, le diamètre, la position et parfois la hauteur**. Pour un **arbre fourchu** à moins d'1 m 30 de hauteur, ses tiges sont relevées séparément si elles font plus de 17,5 cm de diamètre. Dans ce cas, relever normalement la première tige puis pour son autre tige ajouter **en observation qu'elle est jumelée à la tige précédente.**
Afin de ne pas oublier ou compter deux fois des arbres, penser à mettre un numéro à la peinture sur chaque arbre inventorié.

L'équipe de mesure est constituée de 2 personnes :

- La 1ère, équipée du ruban ou du compas, et du vertex, est chargée des inventaires des tiges et des mesures de distance horizontale.
- La 2ème, équipée de l'outil de saisie, du transpondeur du vertex et de la boussole, est chargée de la saisie des données et des mesures d'azimut. Elle reste au centre de la placette.

Consignes pour les mesures de distance

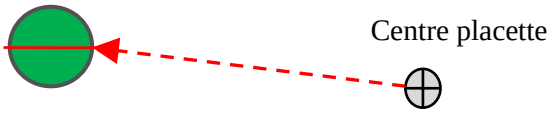
Pour la mesure de la distance d'une tige par rapport au centre de la placette : positionner le vertex sur le bord de l'arbre **correspondant au milieu de la tige**, et mesurer la distance horizontale en visant le transpondeur situé au centre de la placette. Cas des arbres penchés : c'est le centre de l'arbre à 1 m 30 qui détermine si l'arbre est compté et sa distance par rapport au centre de la placette.

Figure 1 : Principe de la mesure de distance entre le centre de l'arbre et le centre de la placette.

Il convient de prendre la distance horizontale (*voir annexe A2 : fig 9*). Si la pente moyenne de la placette est inférieure à 10 %, il n'est pas nécessaire de mesurer la distance horizontale, prendre la DME (*voir annexe A2 : fig 10*).

La distance est exprimée en m, précision au décimètre.

Consignes pour les mesures d'azimut



Pour la mesure de l'azimut d'une tige, positionner la boussole au-dessus du centre de la placette et viser le centre de l'arbre. Prendre un peu de recul pour éviter les interférences magnétiques

Figure 2 : Principe de la mesure d'azimut entre le centre de la placette et le centre de l'arbre.

Prendre toujours l'azimut en grades

Consignes pour les mesures de circonférence ou de diamètre

Pour la prise du diamètre à 1 ,30m, réaliser la mesure au cm couvert, au compas, en **effectuant une double mesure en croix.**

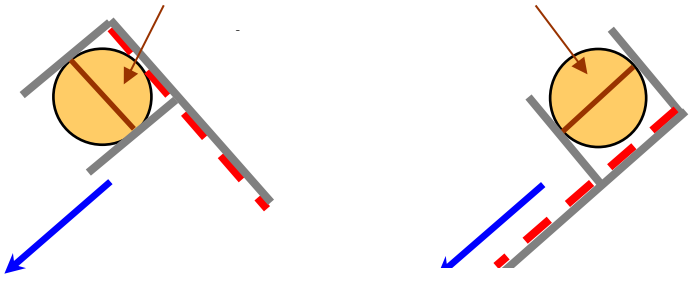


Figure 3 : Principe de la mesure des diamètres au compas.

Prendre toujours la mesure à l'amont de l'arbre, à 1 m 30 et en étant attentif à positionner le compas bien horizontalement en l'enfonçant au maximum. Si le compas est trop petit, utiliser alors le décamètre pour relever la circonférence du tronc que vous diviserez par π pour obtenir le diamètre.

Consignes pour les mesures de hauteur : (voir annexe A2 : fig11)

La mesure de hauteur dominante nécessite de repérer les (n-1 plus) gros arbres sur une placette de surface n. Cette mesure est à récolter seulement sur 60 des placettes en peuplements adultes (elles sont identifiées sur la carte SIG) et sur toutes les placettes jeunes peuplements.

Dans le cas des placettes de rayon 15 m, sélectionner **les 6 plus gros arbres de la placette**, en vous aidant des numéros que vous avez inscrits dessus, quel que soit leur statut (dominant, co-dominant, dominé), **en écartant cependant les arbres cassés, fortement penchés ou morts.**

En cas d'hétérogénéité des strates des arbres mesurés (par exemple présence d'une sur-réserve ou d'un « loup » en dessus d'un jeune peuplement), noter cette information en observation pour les arbres concernés.

Cas des forêts non pentues (pente < 30 %) :

- Déterminer l'apex semblant être le plus haut et installer, « à dire d'expert », le transpondeur à l'aplomb de ce bourgeon à l'aide de la canne du transpondeur. Dirigez-vous là où on a la meilleure visibilité du bourgeon terminal à une distance à peu près égale à la hauteur de l'arbre.
- Hauteur 1 (H1) : mesurer la hauteur de ce bourgeon terminal selon la direction choisie. Bien repérer la branche charpentière portant ce bourgeon terminal.
- Se déplacer à l'opposé, pour mesurer la hauteur **de ce même bourgeon**. Tacher de garder en visuel la branche charpentière et le bourgeon terminal, afin de mesurer exactement le même bourgeon (même s'il apparait plus bas selon ce nouveau point de vue).
- Hauteur 2 (H2) : mesurer la hauteur du même bourgeon (à l'opposé de la mesure H1).

Noter ces deux mesures. Si la différence entre les deux prises de hauteur est supérieure à 1 m, le couple de mesure est pris une seconde fois en déplaçant légèrement le transpondeur en direction de la mesure la plus élevée.

Si au bout de 2 couples de mesures, le différentiel reste supérieur à 1 m, la mesure avec le delta le moins important est enregistrée. **Noter la valeur des hauteurs au décimètre près avec un séparateur point, exemple : « 22.6 ».**

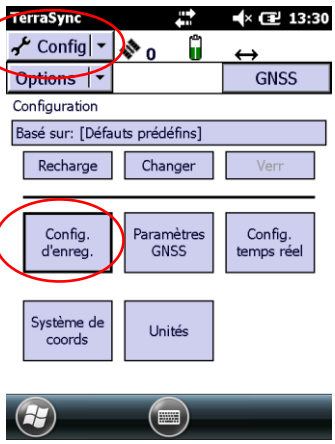
Pour les forêts pentues (>30%) une seule hauteur (H1) par arbre est à prendre, de préférence à l'amont de l'arbre. Dans ces conditions escarpées, une seule mesure est prise afin de gagner du temps.

Inventaire dans placettes jeunes peuplements :

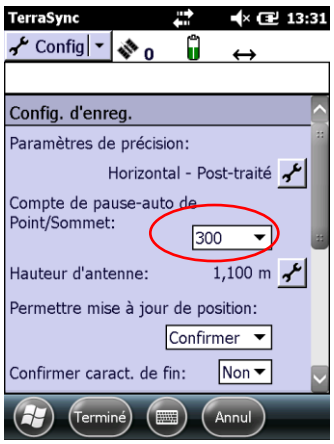
Le rayon des placettes dans ces types de peuplements est de **8 m**, **seule la hauteur de l'arbre le plus gros appartenant à l'essence objectif** (à l'œil) est à relever selon le même protocole que dans les peuplements adultes.

ANNEXES

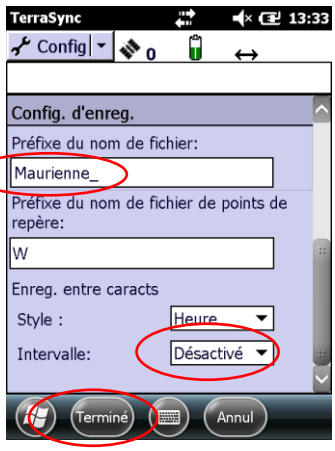
A.1. Utilisation du récepteur GNSS Trimble



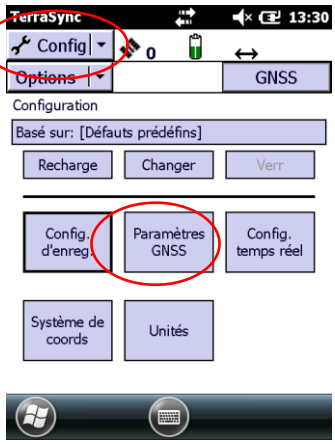
Configuration d'enregistrement



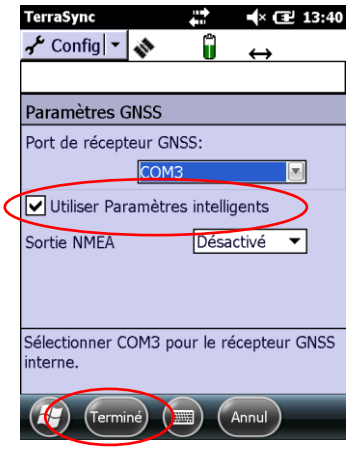
Page 1/2



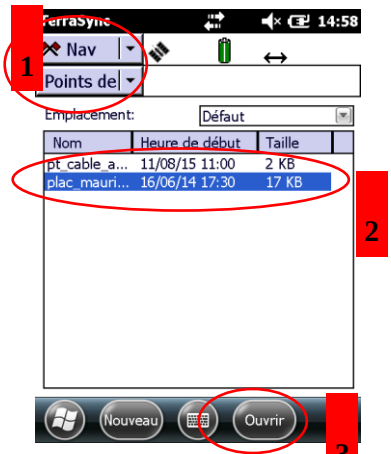
Page 2/2



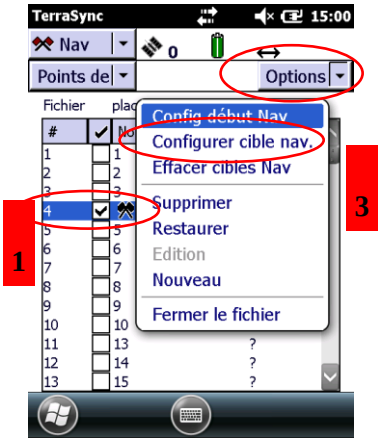
Paramètres GNSS



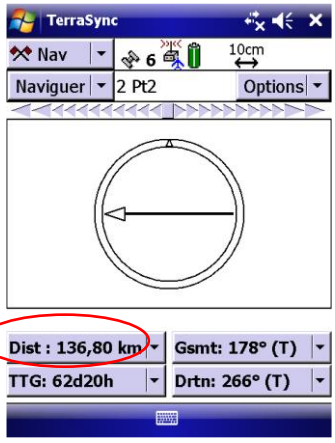
La configuration n'est à faire qu'une fois (les paramètres sont conservés)
Figure 4 : Configuration GNSS



Ouvrir le fichier de points de repère (« plac_XXX)

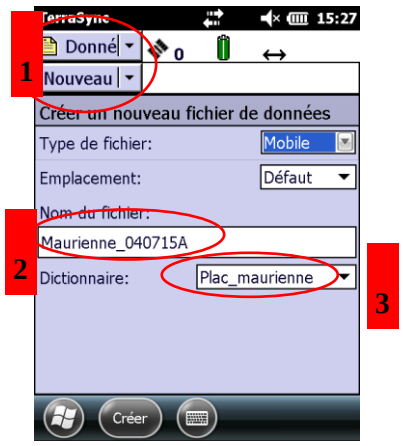


Sélectionner la placette (ex. 4) et la configurer comme « cible »

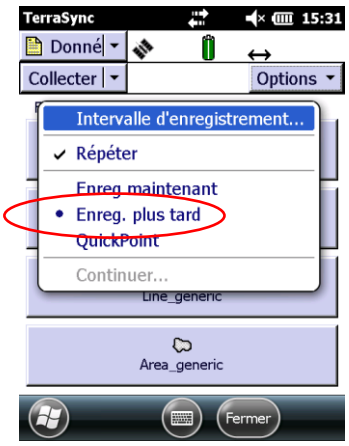


Commencer le déplacement puis suivre la direction de la flèche jusqu'à une distance inférieure à 2 m

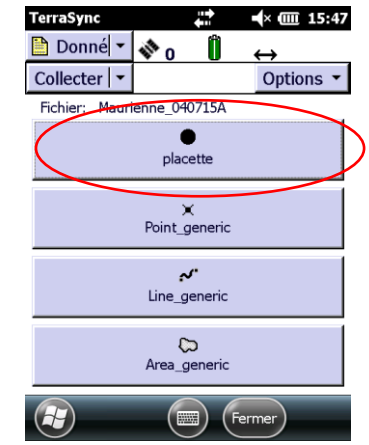
Figure 5 : Navigation vers un point de repère à l'aide du GNSS



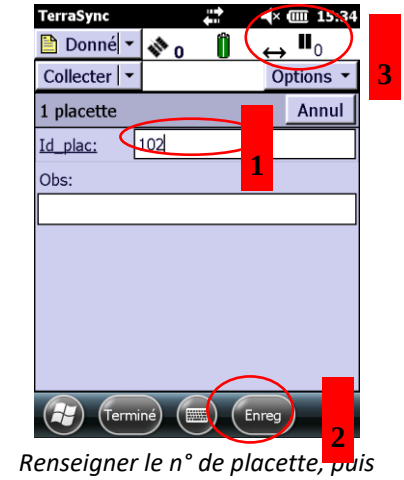
Créer un nouveau fichier (1 par jour de travail) en utilisant le dictionnaire d'attributs du site



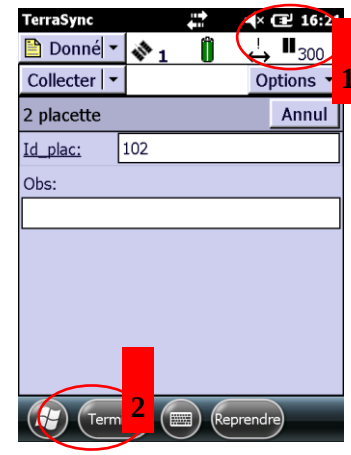
Définir l'option « Enreg. Plus tard » (à faire une seule fois – le paramètre est conservé)



Choisir le type d'objet à lever : « placette »



Renseigner le n° de placette, puis lancer l'enregistrement (le compteur (3) s'incrémente).



Une fois le nombre d'enregistrement atteint (300), enregistrer le point.

Figure 6 : Relevé du centre de la placette à l'aide du GNSS

A.2. Utilisation du vertex IV Haglof

Paramétrage à vérifier : à ne faire qu'une fois

Allumer le vertex en appuyant sur la touche **ON**

Sélectionnez SETUP dans le menu par **DME ou IR**

Faire défiler les paramètres en appuyant sur **ON** plusieurs fois jusqu'à faire apparaître

P.OFFSET *(Pivot Offset)* → sa valeur correspond à l'angle d'inclinaison de la tête. Elle doit être égale à **0.3**

Si ce n'est pas le cas, appuyer sur **<DME** ou **IR> POUR** obtenir les bonnes valeurs et valider en appuyant sur **ON**

T.HEIGHT → sa valeur correspond à la hauteur de la mire placée sur l'arbre soit 1,30 m. Elle doit être égale à **1.3**. Modifier si nécessaire comme pour le précédent.

Appuyer plusieurs fois sur ON pour sortir du menu SETUP

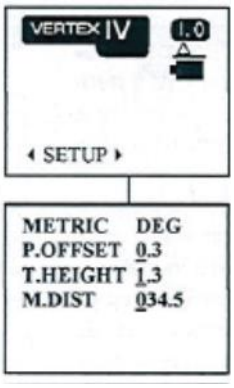


Figure 7 : Paramétrage du vertex à vérifier

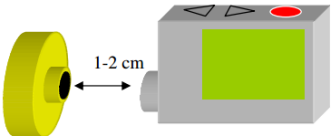
Mise en température chaque début de journée

Laisser le Vertex à température ambiante (≈ 10 mn)

Activer le transpondeur

Appuyer sur **<** jusqu'aux 2 signaux sonores

Même manipulation pour l'éteindre

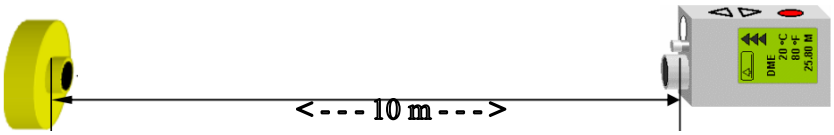


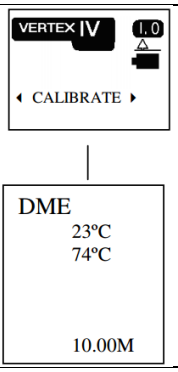
Calibration

Allumer le vertex en appuyant sur la touche ON

Sélectionnez CALIBRATE dans le menu (**<**)

Postionner l'instrument à 10 m et appuyez sur ON.





Il est nécessaire de le calibrer chaque matin et en début d'après-midi (après la pause repas)

Figure 8 : Calibration du vertex

Mesure de la distance horizontale

Allumer le vertex en appuyant sur la touche ON et sélectionner ANGLE dans le menu. Appuyer sur ON jusqu´à ce que la croix de visée apparaisse

Viser le transpondeur et appuyer sur ON jusqu´à ce que la croix de visée disparaisse : l'angle est mesuré

Viser le transpondeur et appuyer sur DME : la distance horizontale est mesurée.

Réinitialiser en appuyant sur ON

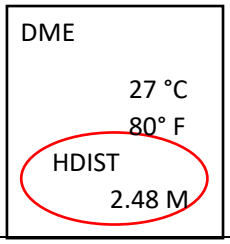


*Figure 9 : Mesure d'une distance horizontale avec le **Vertex IV***

Mesure de la distance réelle (DME)

En terrain plat (pente < 10 %), on peut utiliser directement la DME, par un appui prolongé sur **< DME**

Réinitialiser en appuyant sur ON

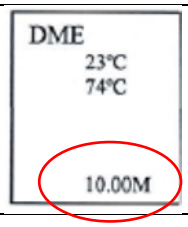


*Figure 10 : Mesure d'une distance réelle avec le **Vertex IV***

Mesure de la hauteur

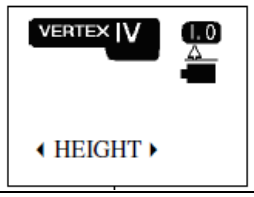
Positionner le transpondeur sur le tronc à 1.30 m et orienté vers l'amont (A)

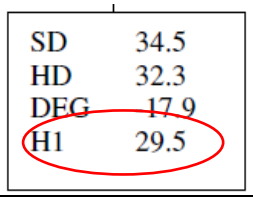
Allumer le vertex en appuyant sur la touche ON et sélectionner HEIGHT (par défaut) dans le menu

Viser le transpondeur (B) et appuyer sur ON jusqu´à ce que la croix de visée clignote (le Vertex a pris la distance, l´angle et la distance horizontal)

Viser l'apex de l'arbre (C) et maintenir ON enfoncé jusqu´à ce que la croix de visée disparaisse : la hauteur (H1) s'affiche

Réinitialiser en appuyant simultanément sur **<** et **>**





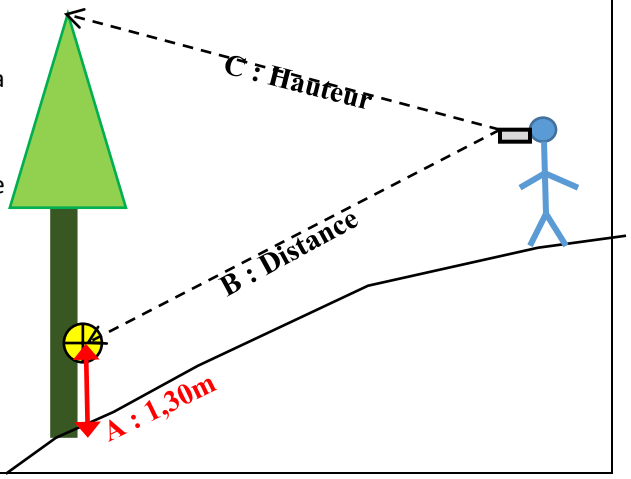


*Figure 11 : Mesure d'une hauteur avec le **Vertex IV***

Annexe 3 : Fiche de projet à l'intention de la DT Grand-Est

Projet : Campagne LIDAR sur le sud de l'agence de Metz

Objectifs :

➔**La programmation de plus de 10 000 ha de révision d'aménagements forestiers de 2021 à 2025 dans le sud de l'agence de Metz a déclenché la prévision de ce vol.**

- ✓ Obtenir des données dendrométriques spatialisées afin de réviser les aménagements forestiers arrivant à terme dans les années à venir.
- ✓ Améliorer le suivi des aménagements forestiers : programmation des travaux et des coupes, support d'information pour les martelages…
- ✓ Améliorer l'état des lieux et la connaissance concernant la ressource forestière sur le sud de l'agence.
- ✓ Affiner la connaissance du micro relief.
- ✓ Recaler le parcellaire forestier et la desserte.
- ✓ Détecter des vestiges en forêt.

Apports du LIDAR :

Le LiDAR est un outil de télédétection utilisé depuis plusieurs années dans de nombreux pays. Il permet de générer un nuage de points 3D, représentatif de l'environnement qu'il a survolé, à partir de l'émission d'un faisceau laser. Ce nuage de points sera ensuite traité informatiquement afin d'obtenir des données directement utilisables sous forme d'images ou de cartes.

Exemples :

- MNT : pour la description du sol, localisation de la desserte forestière
- MNS : vue sur la canopée permettant de délimiter des UED
- Cartes de données dendrométriques : H0, G, D0 …

Le LIDAR apporte une donnée qui n'existait pas encore : une **donnée cartographiée en continue** et **utilisable à des échelles plus fines** comme UED ou l'UG.

Dans un contexte de transition vers une gestion forestière assistée par de nouvelles technologies, il semble donc opportun et important de se lancer dans un tel projet afin de rester au contact des dernières nouveautés disponibles tout en répondant à des objectifs opérationnels tels que la rédaction d'aménagements forestiers.

Contexte :

La zone d'étude est située sur le plateau lorrain, le relief n'est donc pas très marqué. La mise en place de placettes de calibration ne devrait donc pas être trop difficile. De plus, la topographie ne sera pas un problème lors du survol et de l'acquisition des données, elle n'entraînera donc pas de surcoût.

Concernant les peuplements forestiers, la quasi-totalité se trouve sous forme de futaie régulière ou de TSF en conversion et, pour la plupart, bien enrichis. Très peu de peuplements sont gérés en irrégulier et l'avenir ne semble pas s'inscrire vers une telle gestion dans cette zone. Le LIDAR ne devrait donc pas rencontrer de difficulté à distinguer les différents arbres.

C'est une zone essentiellement composée de feuillus, représentés par le hêtre et surtout le chêne, qui sont les essences majoritaires. Les résineux sont très peu présents, une petite centaine d'hectares seulement.

Zone d'étude :

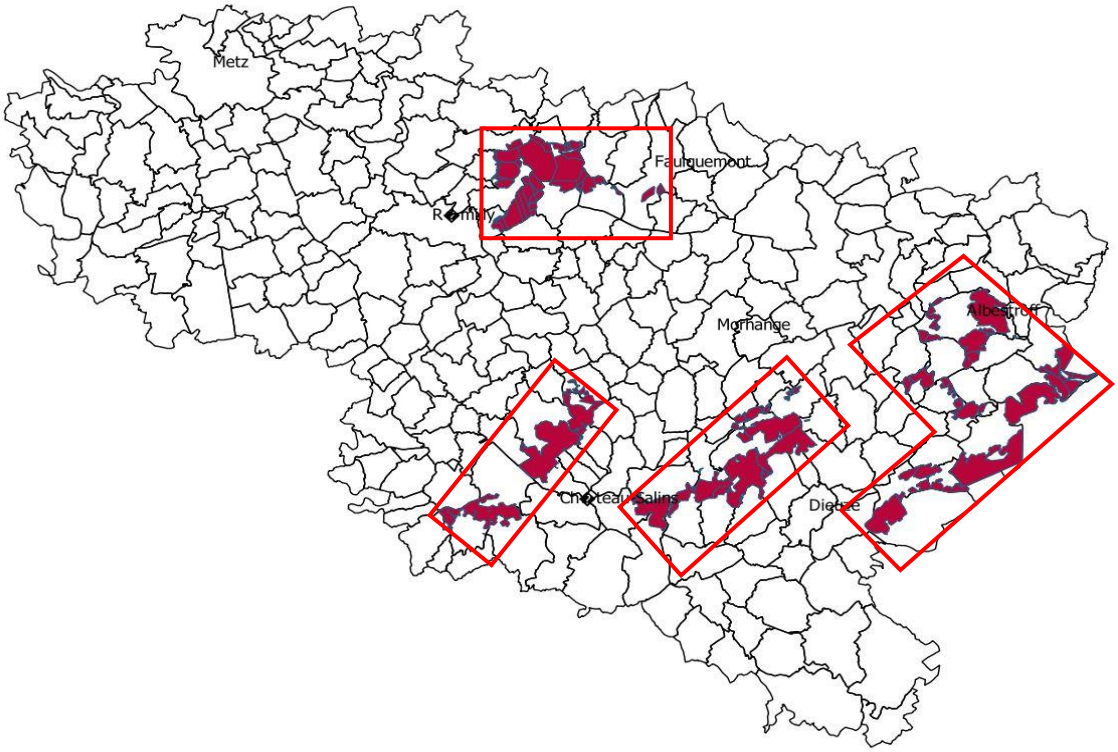
C'est un projet quelques peu atypique qui est présenté ici. En effet si la plupart des précédents projets LIDAR ont été réalisés sur des grands massifs forestiers, il n'est pas ici question d'un seul très grand massif mais d'une multitude de forêts morcelées. Un travail important a donc été réalisé sur l'optimisation de la zone d'étude.

Finalement la zone sélectionnée pour l'acquisition LIDAR représente 10 900 ha de forêts dont 9 200 ha de forêts domaniales. La liste des forêts concernées se trouve ci-dessous :

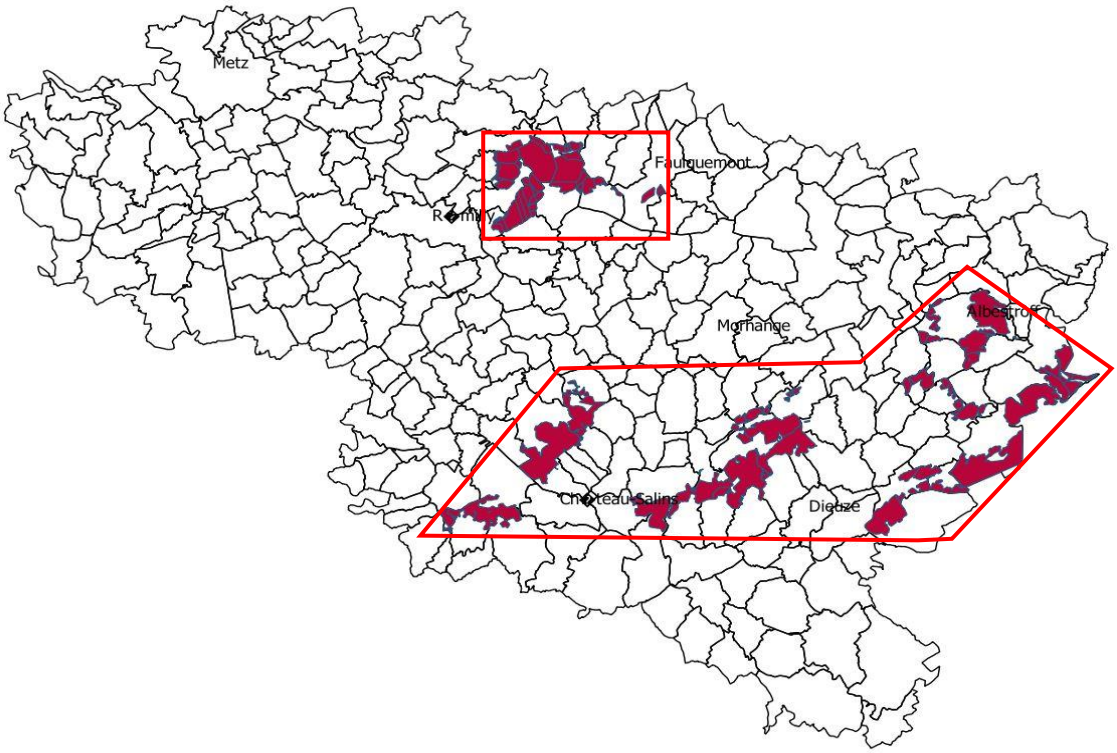
Type de forêt		Nom de la forêt	Surface	Date de révision d'aménagement
Communale		Albestroff	102,13	2023
		Bermering	107,19	2023
		Bréhain	21,19	2023
		Chateau Bréhain	37,04	2023
		Château-voué	3,19	**pas d'amgt**
		Guinzeling	95,86	2023
		Hestroff	53,35	2021
		Zarbeling	9,91	2025
Domaniale		Albestroff (mittershein)	3263,19	2022
		Albestroff (albestroff)		2025
		Amelecourt	1245,85	2021
		Bride	2451,02	2023
		Gremecey	485,91	2025
		Hémilly	1164,32	2024
		Romersberg	597,32	2024
Syndicale	LAVIERGE	La Vierge	1 269,27	2021
Total général			**10 915,89**	

Deux options ont été imaginées afin d'optimiser le plan de vol :

- Option 1 : survol de 4 zones distinctes



- Option 2 : survol de 2 zones distinctes



Le choix sera réalisé suite à l'étude des réponses des différents prestataires au marché.

Nous avions pensé à étendre la zone d'étude à l'agence de Sarrebourg. D'une part, en y intégrant les forêts domaniales de Fénétrange et de Languimbert, ce qui n'a pas été retenu puisque la révision d'aménagement de ces forêts n'est pas à l'ordre du jour. D'autre part, par l'ajout des forêts d'Abreschviller et de Saint-Quirin, ce qui a également été rejeté dû à une trop forte différence de caractéristiques entre les peuplements de ces forêts et de ceux de la zone d'étude de l'agence de Metz.

Calibration de la donnée :

La combinaison de différentes sources de données est quasi obligatoire pour l'application de la télédétection en forêt.

Le cas le plus commun est la combinaison des données LiDAR avec des données récoltées sur le terrain. Ces données vont permettre de calibrer les modèles mathématiques exploitant les données issues du liDAR. En effet, les modèles de calcul doivent être calibrés pour chaque projet puisque les configurations et les conditions d'acquisition diffèrent d'un vol à l'autre. Les données terrain permettant de calibrer ces modèles sont donc acquises sur ce qu'on appelle des placettes de « calibration ».

Afin de mettre en place ces placettes, nous avons considéré la zone d'étude comme un massif d'un seul tenant, que nous avons ensuite stratifié afin que les peuplements les moins représentés sur le terrain soient également pris en compte dans la construction du modèle mathématique. Seul les peuplements résineux ont été retirés de la calibration à cause de leur surface trop faible.

Trois chefs d'équipe seront formés pour récolter les données sur les 400 placettes de calibrations, réparties sur les différentes strates.

Peuplements pré comptables ➔ 280 PI	
Chêne en croissance active **1 200 ha** 70 placettes	Chêne en maturation et mur **4 100 ha** 70 placettes
Autres feuillus en croisse active **1 000 ha** 70 placettes	Autres feuillus en maturation et mur **1 000 ha** 70 placettes

Jeunes peuplements ➔ 120 PI	
Chêne en régénération **1500 ha** *30 placettes*	Chêne en sortie de compression **780 ha** *30 placettes*
Autres feuillus en régénération **500 ha** *30 placettes*	Autres feuillus en sortie de compression **130 ha** *30 placettes*

Adaptation des diagnostics et inventaires de terrain en EAM :

Suite aux discussions entretenues avec le pôle aménagement de l'agence de Metz et des besoins qui en sont ressortis, nous avons réfléchi à une nouvelle façon d'appréhender l'EAM.

Les MNS et MNH issus du LIDAR seront utilisés comme l'est actuellement la photo-aérienne, c'est-à-dire en amont de l'EAM afin de repérer les différentes UED. Les informations dendrométriques fournies par le LIDAR remplaceront les données issues des inventaires relascopiques à 1 point / ha et des inventaires en plein réalisés jusque-là.

Les informations complémentaires mais importantes, comme la proportion des essences, la structure par classe de diamètre ou toutes autres informations permettant de valider les parcelles candidates au groupe de régénération, seront obtenues lors de **descriptions à l'avancement et à dire d'expert.** C'est une étape importante qu'il ne faut pas négliger car en plus de l'obtention d'informations supplémentaires, cette étape permettra de valider les dires du LIDAR et bien sûr de s'imprégner de la forêt avant rédaction de l'aménagement.

Calendrier prévisionnel :

De mars à aout 2019	Travail sous forme de stage sur l'étude de faisabilité et mise au point du projet LiDAR jusqu'à élaboration du CCTP
De septembre à octobre 2019	Lancement du marché et attribution de celui-ci
De novembre 2019 à février 2020	Mise en place des placettes de calibration
Entre Novembre 2019 et mars 2020	Campagne d'acquisition LiDAR sur une journée en conditions optimales
Courant 2020	Traitement « dendrométrique » des données LiDAR

Suivi du projet :

Céline MANGIN prendra poste en tant que responsable de projet aménagement sur l'agence de Metz à partir de septembre 2019. Elle a suivi la formation « socle de connaissances pour la gestion et le pilotage d'un projet LIDAR » prodiguée par la RDI au mois de juin 2019, ce qui lui permettra de poursuivre ce projet.

Trois personnes vont être formées au relevé de données sur les placettes de calibration, ce qui permettra de constituer 3 équipes différentes afin d'obtenir les données de calibration plus rapidement et de façon homogène.

Enfin, nous attendons une personne dédiée au traitement de la donnée LIDAR à l'échelle de la DT. Il devra valider les données livrées par le prestataire (qualité du nuage de point brut, MNT, MNS et MNH) et utiliser les modèles mathématiques fournis par la RDI afin de délivrer aux personnes ciblées les données dendrométriques spatialisées (G, H0, D0) à partir du LIDAR.

Partenariat et Budget :

Différents partenaires ont été approchés :

- Le département de la Moselle
- La chambre d'agriculture
- Forêt et Bois de l'Est
- L'université de lorraine
- La DRAC

La service archéologie de la DRAC est intéressé par ce projet, tout comme un chercheur de l'université de Lorraine. Toutefois, seule la DRAC pourrait contribuer financièrement à ce projet à hauteur de 1000 euros. M. Robin chercheur à l'université de Lorraine, ne peut pas financer ce projet actuellement. Cependant, il peut nous fournir des données LIDAR récentes et de bonne qualité sur le secteur de la plaine du Bischwald (forêt de Guessling).

Le principal financeur serait donc l'ONF pour un projet d'acquisition de l'ordre de 40 000 euros sur le budget 2020.

Récapitulatif des principaux coûts liés au projet LIDAR :

Coût estimé de l'acquisition LIDAR	40 000 €
Coût lié aux placettes de calibration	23 350 €
Matériel : *Trimble* géo 7X	8 000 €
Coût total	71 350 €