

ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES

Description fine de la morphologie forestière dans le cadre de la propagation des incendies

Rapport de stage de terrain à Forcalquier

Commanditaire : Christophe Bouillon, IRSTEA Encadrant : Marc Poupée, ENSG

Alexis Jean - Elie-Alban Lescout - Samuel Mermet - Florent Thebault - Nathan Wolff

 $8 \ juillet \ 2019 \ - \ 27 \ juillet \ 2019$

Rermerciements

Nous tenons à remercier les chercheurs de l'IRSTEA du Tholonet qui se sont rendus disponibles le mardi 9 juillet pour nous accueillir dans leurs locaux. Les présentations de leurs travaux et des protocoles mis en place, ainsi que la discussion autour de leurs attentes et des données à notre disposition nous ont permis d'enrichir nos premières pistes exploratoires, ainsi que de pleinement motiver la réalisation de ce travail commandité. Merci en particulier à Éric Maillé et Fabien Guerra d'avoir organisé cette journée, ainsi qu'aux chercheurs et stagiaires qui feront le déplacement vendredi 26 juillet 2019 à Forcalquier pour assister à notre soutenance.

Nous devons également de francs remerciements à l'équipe de photogrammétrie, encadrée par Antoine Pinte et composée des deux Arthur, Dujardin et Genêt, de Cédric Perion, Florentin Brisebard et Armand Drugeon. Sans eux, point de vol de drone, du plan de vol au traitement des données!

Jacques Beilin a pris le temps, entre moult sollicitations, de nous expliquer le paramétrage des absconses manettes GNSS, pourtant dénuées d'un "vrai" système d'exploitation. Merci surtout pour le débogage du plugin QGIS et les explications qui nous ont permis d'obtenir une précision spatiale digne du matériel déployé sur le terrain.

D'ailleurs, point d'utilisation du matériel sans remerciements à Christian Lepage, dont on aura été jusqu'à emprunter la fameuse combinaison bleue. Ce fût un honneur de la vêtir pour affronter les sous-bois dauphinois, quelque soient leurs continuités horizontales et verticales !

Merci enfin à Marc Poupée d'avoir proposé ce stage pluri-disciplinaire, nous permettant de nous confronter à des sources de données que l'on pourrait presque qualifier d'hétéroclites. Nous avons pu, dans un environnement de confiance, développer des méthodes très variées tout en bénéficiant de ses conseils bienvenus.

Table des matières

| 1 | Intr | oducti | io | n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 |
|----------|---|-------------------|---------------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|------------|----|-----|----|-----|----|---|----|----|----|-----------|
| 2 | Etu | de et a | ac | qu | isit | tio | որ | pré | elin | nin | nair | es | | | | | | | | | | | | | | | | 4 |
| | 2.1 | 1 État de l'art | | | | | | | | | | | | | 4 | | | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | Choix | c d | u t | err | ain | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 5 |
| | 2.3 | Données utilisées | | | | | | | | | | | | | 7 | | | | | | | | | | | | | |
| | 2.4 | | | | | | | | | | | | | | 7 | | | | | | | | | | | | | |
| | 2.5 | Méthodologie | | | | | | | | | | | 8 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 2.5.1 | I | Pro | toc | ole | de | e re | elev | vé t | erra | ain | ι. | | | | | | | | | | | | | | | 8 |
| | | 2.5.2 | Ι | LiD | AF | { | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 9 |
| | | 2.5.3 | Ι | Dor | ıné | es s | sat | elli | ites | m | ulti | -te | m | oor | ell | les | | | | | | | | | | | | 11 |
| | | 2.5.4 | ł | Pho | otos | grai | mn | nét | rie | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 12 |
| | | | | | | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Trai | temen | nts | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 14 |
| | 3.1 | Relevé | é t | err | ain | ι. | | | | | | | | | | | • | | | | | | • | | | | | 14 |
| | 3.2 | LiDAR | R | | | • | | | | | | | | | | | • | | | | | | • | | | | | 16 |
| | 3.3 | Photog | ogr | am | mé | etrie | е. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 |
| | 3.4 | Donné | ées | s sa | tel | lite | s n | nul | lti-t | tem | ipo | rel | les | | | | | | | | | | | | | • | | 21 |
| | 3.5 | Repéra | ag | ge a | uto | oma | atio | que | e de | es c | eime | es | | | | | | | | • | | • | • | • | | | | 22 |
| 4 | Svn | thèse | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 27 |
| | 4.1 | Résult | tat | ts | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 27 |
| | 4.2 | Discus | ssi | on | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 30 |
| | 4.3 | Perspe | ect | tive | es. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 30 |
| | | P - | | | | - | | - | | | | | | | - | - | - | | - | | - | - | - | | | - | - | |
| Α | A Extrait du protocole fourni par l'IRSTEA | | | | | | | | | | | 32 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| В | B Schéma de quelques placettes dessinées lors de l'acquisition ter- rain | | | | | | | | | | 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| a | C | | • | | | | , | | | | | | | | | | | , . | | | | | | | | | | . |
| C | Camèra Sequoia embarquée lors de l'acquisition drone3 | | | | | | | | 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | Scri | pt Pyt | \mathbf{th} | on | ut | ilis | śé j | po | ur | cré | éer | le | s v | ol | un | ne | \mathbf{s} | de | la | 1 1 | /é | rit | té | t | er | ra | in | 34 |

1 Introduction

Durant la période estivale, les feux de forêts sont un enjeu majeur, notamment pour la zone méditerranéenne. De fait, leurs conséquences sont paysagères, écologiques, socio-économiques mais également humaines. La base de données Prométhée recense ainsi plus de 1600 incendies de forêts en moyenne annuelle dans la zone méditerranéenne française sur la période 2014-2018. Pour le seul département des Alpes-de-Haute-Provence, 546 feux de forêts ont brûlé près de 1500 hectares depuis dix ans (Prométhée 2009/2019).

Au sein de l'unité tholonétienne (13) Risques, Écosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience (RECOVER) de l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA), l'équipe Écosystèmes méditerranéens et risques traite en particulier de l'aléa des incendies forestiers, de son évolution dans la perspective du changement climatique et de l'écologie du feu. Les modèles de propagation des feux de forêts sont développés à plusieurs échelles, de la région à celle, très fine, de la feuille. Au-delà des critères sur-déterminants (relief et météo), ils s'appuient sur des critères de combustibilité des matériaux, d'aléas et de vulnérabilité des Hommes et de leurs infrastructures.

Les critères d'aléas s'appuient sur la morphologie d'une forêt, à travers sa densité de biomasse et ses continuités verticale et horizontale. Or, aujourd'hui, si les outils de télédétection permettent d'identifier la structure externe d'un couvert forestier, à savoir la canopée, la littérature scientifique offre peu de pistes pour obtenir des informations sur les strates inférieures. De fait, les photographies aériennes ou satellites ne permettent pas d'observer le sous-bois.

Cependant, il existe aujourd'hui plusieurs moyens techniques qui pourrait nous permettre d'obtenir des informations sur la structure interne d'une forêt. Ainsi, le LiDAR (Light Detection And Ranging) est un instrument permettant de numériser un environnement en trois dimensions sous forme d'un ensemble de points, appelé nuage de points. S'il a été développé dans les années 80, il s'est démocratisé ces dernières années, offrant de nouvelles opportunités techniques.

Le projet suivant consiste donc à explorer de nouvelles méthodes d'acquisition et de traitement de données, dans le but d'acquérir une connaissance plus approfondie de la morphologie d'un massif forestier. Une détection automatisée de la densité de biomasse et des continuités verticale et horizontale d'une forêt constituerait un apport conséquent en vue d'améliorer les modèles de propagation de feux de forêt, et in fine de faciliter la prise en compte de cette vulnérabilité dans le cadre de l'aménagement du territoire.

Cette recherche couvre ainsi plusieurs techniques. Outre l'exploitation des données LiDAR précédemment évoquées, ce rapport présente une analyse multitemporelle basée sur des images satellites, ainsi qu'un traitement photogrammétrique faisant suite à une acquisition par drone. Pour pouvoir qualifier et comparer ces méthodes combinant modélisation 3D, étude de densité et cartographie en 2D, nous avons réalisé une vérité terrain sur un espace forestier hétérogène. Le protocole, compatible avec celui utilisé par l'IRSTEA, se veut réplicable dans un processus à plus grande échelle.

Ce projet de télédétection, traité par un groupe de cinq élèves-ingénieurs de l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) vient conclure, sur un temps de trois semaines, le stage "terrain" de Forcalquier (04).

2 Etude et acquisition préliminaires

2.1 État de l'art

En premier lieu, la rencontre avec l'équipe de recherche de l'IRSTEA au Tholonet nous a offert une première idée de l'avancée de la recherche sur les feux de forêts.

Si historiquement on observait une séparation entre aléa et présence d'enjeux, les méthodes indiciaires ont montré leurs limites dans la zone méditerranéenne. En particulier, l'indice forêt/météo ne fonctionne que dans un temps très court. Aujourd'hui, les modèles de propagation sont très efficaces pour traiter des milieux homogènes, mais ils peinent à prendre en compte des écosystèmes hétérogènes tels que ceux rencontrés en Méditerranée. Ainsi, les travaux actuels se concentrent principalement sur les zones d'interface, via des approches globales basées sur l'analyse spatiale. Pour affiner ces modèles, les chercheurs de l'IRSTEA, entre autres, travaillent sur différentes composantes de ces derniers, dont la combustibilité, c'est-à-dire la faculté d'un matériau à propager le feu. Cette composante comprend des facteurs biologiques (espèce, cycle de vie, etc), météorologiques (vent, température, hygrométrie), topographiques (relief) et morphologiques (proximité des arbres entre eux, présence de coupures).

Les travaux de l'IRSTEA portant sur l'extraction de la végétation utilisent comme indicateurs les continuités verticale et horizontale de la biomasse. Dans cet objectif, les données SPOT apparaissent idéales en matière de résolution (1,5m), mais elles ne sont pas suffisamment disponibles en temporalité pour suivre chaque feu. De plus, si la différence entre un résineux et un feuillu est aisée à relever sur une image satellite ou aérienne, il est complexe de distinguer les différentes espèces des habitats hétérogènes de Méditerranée. Cette distinction ne fait d'ailleurs pas encore sens, tant les études sur la combustibilité des différentes espèces constituent un travail en cours.

Les images satellites permettent également de mesurer les dégâts occasionnés par les feux, en faisant appel à différents indices, tel que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Ces indices ont pu être illustrés sur des images Landsat 4, 5 et 8 par le rapport de stage de première année de géomètre à l'ENSG produit par Aymeric Dutremble et Clément Helstroffer [2019].

Fabien Guerra a également présenté ses premiers essais d'utilisation d'un drone, grand public, dans le cadre de l'étude des feux de forêts. Si le matériel usité ne semble pas pouvoir améliorer sensiblement les produits fournis par l'IGN en matière de Modèle Numérique de Terrain, il présente un intérêt pour extrapoler les indices et classifications calculés à partir d'images SPOT. Le LiDAR n'est pas directement utilisé par l'unité de recherche du Tholonet; mais il fait l'objet d'une littérature riche sur son utilisation en forêt comme le rapporte Sylvain Jourdana (Jourdana [2017]) dans son rapport de stage de troisième année du cycle ingénieur à l'ENSG en 2017. Nous avons retenu, en particulier, le manuscrit de thèse (2018) de Sahar Ben Hmida (Hmida [2018]) sur les données brutes d'une onde LiDAR. L'intéret de cette donnée brute réside dans le fait qu'elle permet d'avoir une information très fine sur le type de matériaux que rencontre l'onde (Mansour [2014]).

Dans les écosystèmes forestiers tempérés, les professionnels de la forêt se réfèrent généralement à cinq strates générales. La première strate, dite muscinale, correspond aux premiers centimètres de hauteur, où l'on trouve des mousses et des lichens terrestres. La strate herbacée prend le relais avec des graminées, des plantes à fleurs et des fougères jusqu'à 80 cm, 1 m voire 1,5 m à maturité. La strate arbustive, s'étalant jusqu'à 8 m ou 10 m, est constituée d'arbustes ou de buissons. Au-delà de 10 mètres de hauteur, les végétaux appartiennent à la strate arborescente ou arborée. Pour notre étude, et en accord avec les pratiques de l'IRSTEA, nous fusionnerons les deux premières strates (en omettant, dans les faits, la première) et subdiviserons la troisième pour obtenir les strates A (0-1m), B (1-4m), C (4-10m) et D (10m+).

2.2 Choix du terrain

Le choix de la zone d'étude a reposé sur plusieurs critères, parmi lesquels, en premier lieu, étant donnée la durée limitée du stage, l'accessibilité en voiture depuis le centre IGN de Forcalquier. En second lieu, en adéquation avec les attentes de notre commanditaire, nous avons ciblé des zones d'interface Homme/Nature composées d'espèces végétales hétérogènes. Cette première recherche, effectuée par photo-interprétation depuis le Géoportail, nous a permis d'identifier 7 zones potentielles qui ont fait l'objet d'un repérage par plusieurs membres de notre équipe.



FIGURE 1: Situation des zones exploratoires

Notre choix s'est finalement porté sur un terrain d'environ 2,6 hectares situé sur la commune de Dauphin (04), à la limite entre le Lubéron oriental et les collines de Forcalquier ("Massif forestier du L. 321-6 du code forestier", DDT04). Selon la BD Forêts V2, la formation végétale correspondante est majoritairement constituée d'une forêt de pin sylvestre pur, bordée à l'Est par une forêt fermée de chênes décidus purs. A l'épreuve du terrain, les espèces sont plus entrelacées, même si nous identifions visuellement une coupure entre résineux et feuillus sur l'orthophoto 2015 de l'IGN.



FIGURE 2: Délimitations de la zone d'étude

A noter que ce terrain ne se situe pas sur une zone soumise au risque incendie de forêts, selon le Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN) établi par la Direction Départementale des Territoires des Alpes-de-Haute-Provence. Il est toutefois situé sur un carreau qui a été estimé au niveau 7 (sur une échelle de 9 grades) lors de l'étude sur "l'aléa incendie de forêt subi" commandée par la DDT04 à l'Office National des Forêts en 2000. Cette dernière information reste néanmoins à nuancer du fait de la date et de la résolution spatiale de l'étude.

2.3 Données utilisées

Pour réaliser ce projet, nous avions différentes données à notre disposition :

- Acquisition LIDAR faites par l'IGN en 2017, à 1 mètre de résolution
- Données du satellite Sentinel à 10 mètre de résolution
- Données des satellites Spots à 1.5 mètre de résolution

Avec l'aide du groupe P3 travaillant sur la photogrammétrie multispectrale, nous avons effectué une acquisition par drone doté d'une caméra Séquoia 4 bandes, offrant une résolution entre 5 et 10 cm selon l'altitude de vol.

2.4 Organisation interne

Afin d'optimiser notre temps de travail, somme toute assez réduit, nous nous sommes chargés d'établir un GANTT prévisionnel. Compte tenu de la quantité de pistes à découvrir, il était vital de ne pas s'éterniser dans l'une d'elles et de confronter plusieurs méthodes. Evidemment celui-ci n'a pas été respecté à la lettre, notamment par manque de temps, bien que nous ayons réalisé une grande partie de nos envies dans ce projet.



FIGURE 3: Diagramme de GANT

Un journal de bord collaboratif était mis à jour constamment afin de mettre tout le groupe au courant des avancées des autres. Ceci a également l'avantage de tout consigner, évitant d'éventuels oublis lors d'un traitement ultérieur (par exemple croire que l'on est bloqué sur un processus alors que l'élément débloquant a été fourni par un autre membre à un autre emplacement).

Une page framapad ainsi qu'un Drive ont facilité nos échanges de liens, de documentations et de fichiers tout au long de ces trois semaines.

Un archivage des résultats intermédiaires a également été réalisé en vue de faciliter les traitements finaux et de prendre de l'avance sur l'archivage définitif.

2.5 Méthodologie

2.5.1 Protocole de relevé terrain

Lors de notre visite à l'IRSTEA, l'ingénieur d'études Pierre Castex nous a présenté le protocole de relevé terrain sur la végétation naturelle et ornementale que l'unité a mis en place pour l'étude de zones post-incendie.

Leur protocole repose sur la définition de placettes, c'est-à-dire une petite entité spatiale s'appliquant à un ensemble végétal considéré comme homogène. La taille de ces placettes dépend de l'échelle spatiale de travail. Elles sont détourées à l'aide d'un capteur GNSS et associées à une table attributaire. Il raisonne tout d'abord en étage, c'est à dire jusqu'à quelle hauteur pousse le végétal. Il y en a quatre : de zéro à un mètre, de un mètre à quatre mètre, de quatre mètre à dix mètres, et enfin au-dessus de dix mètres. Puis, il s'intéresse aux différentes strates : le végétal monte jusqu'à une certaine hauteur, mais peut-être a-t-il de la biomasse sur d'autres niveaux. Il y en a quatre également, ayant les mêmes amplitudes que les étages.

Il faut donc tout d'abord indiquer l'étage de la placette et l'espèce dominante s'y trouvant, puis pour chaque strate présente, on indique les caractéristiques des troncs, des branches, des rameaux, des feuilles et des fruits. Puis on indique à quel point la zone est couverte par les cimes des arbres, on appelle cela le recouvrement. Il est exprimé en pourcentage. La pente, l'orientation et la situation topographique sont également renseignées. (Voir annexe : A)

Cependant, nous nous intéressons, pour notre part, à la végétation avant l'incendie. Nous devons donc soit adapter leur protocole, soit en créer un nouveau. Nous nous sommes donc renseignés sur l'existence d'autres protocoles utilisés par d'autres équipes. Finalement, notre choix s'est porté sur la première option, à savoir adapter leur protocole. [1]

Nous avons décidé d'effectuer notre vérité terrain sur toute une zone de plus de deux hectares, et de continuer de travailler en étage et en strate. Nous renseignions l'étage et l'espèce dominante, puis pour chacune des strates présentes, nous indiquons différentes caractéristiques sur le feuillage (s'il est compact, moyen, aéré, ou absent), le branchage (s'il est absent ou présent), et la présence de trouées (importantes, légères ou absentes). Pour améliorer l'efficacité de ce protocole nous rédigions cela sous forme d'une combinaison de lettres et de chiffres, et nous faisions un plan avec la localisation de chacune de nos placettes. (Voir annexe : B)



FIGURE 4: Illustration horizontale et verticale du protocole

Nous avons également géolocalisé chacune de nos placettes par relevé de trace GPS (en mode RTK). Cela nous permet de créer des polygones 2D directement géolocalisés, correspondant à nos placettes. Nous pouvons ainsi les charger dans un logiciel tel que QGIS afin de les comparer avec d'autres données. Par la suite, nous avons extrapolé ces polygones en volumes tridimensionnels afin de modéliser au mieux notre vérité terrain.

2.5.2 LiDAR

Le LiDAR émet une impulsion laser. Lorsque cette impulsion rencontre un obstacle, une partie de l'onde est réfléchie (on parle alors d'écho). En fonction de la puissance de l'impulsion initiale, il peut y avoir plusieurs échos ce qui permet alors d'effectuer un scan en trois dimensions de la zone. Lorsque le LiDAR est aéroporté, sa position précise est relevée par un GNSS différentiel et une station inertielle, ce qui permet de connaître la position de tous les échos et ainsi géoréférencer l'ensemble du nuage de points.

L'un de nos objectifs est de pouvoir qualifier cette technique, utilisée par beaucoup comme une vérité. Notre protocole de relevé terrain permettra ainsi de comparer nos résultats avec ce qu'on a pu observer sur le terrain, et donc vérifier que cela correspond à la réalité terrain.

Cette technologie nous intéresse particulièrement car même si une forêt peut avoir un couvert végétal dense, plusieurs échos peuvent subsister. Cela peut donc nous donner une information inédite sur la morphologie interne de la forêt. Nous comptons donc analyser ces différents échos. Pour cela, nous aurons deux approches : une première analysant globalement l'ensemble du nuage de point, et une deuxième plus fine, où l'on étudiera chacune des différentes strates. Notre but est d'obtenir en finalité une information sur la continuité tant verticale que horizontale. Pour obtenir cette information de continuité, nous allons donc étudier la densité volumique du nuage de points. Ces informations de continuité pourraient à terme permettre de recréer des structures en trois dimensions de notre nuage et donc d'éventuellement isoler et recréer des arbres, des bosquets, ou d'autres structures végétales.

Lorsque nous avons commencé à travailler sur les données LiDAR de notre zone, parmi l'ensemble des données en notre possession, nous avons remarqué qu'elle se situait à «l'inter-bande».



FIGURE 5: Inter-bande LiDAR

Comme on peut l'observer sur l'image ci-dessus, la zone de recouvrement possède une densité de point bien supérieure. Cela rend la densité de point de la surface non-homogène sur l'ensemble de la zone et donc biaise les calculs de densité. Nous avons alors décidé de travailler sur une seule bande, à savoir, celle recouvrant complètement notre zone, bien que cela baisse notre résolution :





FIGURE 6: Inter-bande LiDAR

Une fois les informations de densité extraites, nous les comparerons avec les relevés terrain lors de la phase d'analyse. Cela permettra de qualifier l'apport des données LiDAR dans le cadre de notre étude, et notamment de se rendre compte de leur pertinence.

2.5.3 Données satellites multi-temporelles

Chaque végétal possède un cycle phénologique différent. Si les feuillus perdent leurs feuilles en hiver, ce n'est pas le cas de la plupart des résineux. De même, en général, le sous-bois est relativement persistant.

Nous aimerions exploiter ce phénomène naturel en jouant sur la multitemporalité, en comparant des images satellites à différentes dates. Par exemple, comparer une zone de forêt de feuillus en été, à cette même zone mais en hiver. Les arbres ayant perdu leurs feuilles, nous pourrions visualiser ce qu'il y a sous la canopée et ainsi observer le sous-bois.

Pour cela, nous avons accès aux images de Sentinel et de Spot. Le premier possède une résolution de dix mètres rendant son exploitation compliquée pour notre cas. Et le second possède une résolution d'un mètre cinquante mais une colorimétrie inexploitable toujours dans notre cas.

Nous avons alors effectué un pan-sharpening. Cette opération consiste à fusionner nos deux données en appliquant la colorimétrie d'une couche à la résolution de l'autre. Dans notre étude, l'objectif serait de faire bénéficier de la résolution des images Spot aux images Sentinel, plus disponibles dans le temps et plus riches d'informations colorimétriques.

2.5.4 Photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique utilisant des photographies et trouvant des points de liaison (c'est à dire homologues, identiques sur plusieurs images) entre celles-ci. Pour trouver ces points, elle a besoin de surfaces relativement stables et dont les détails sont clairement identifiables. Or, la végétation l'est rarement à cause de ses feuilles et du vent. En photogrammétrie, les objets stables sont mieux corrélés que les objets mouvants. Nous avons donc émis plusieurs hypothèses : plus la végétation est dense, moins elle est stable car chaque frondaison se confondant l'une avec l'autre, il semble difficile pour la photogrammétrie d'identifier efficacement un détail reconnaissable sur deux (ou plusieurs) images, compte tenu de la forte ressemblance des pixels entre eux. Puis nous nous sommes dits qu'en cas de canopée peu dense, il serait possible, puisque notre résolution est bonne, d'obtenir des détails d'un éventuel sous-bois, de réussir à percer les canopées les moins touffues. Cependant nous avons assez rapidement invalidé la seconde hypothèse (voir plus bas) et avons concentré nos efforts sur la première.

Une acquisition par drone avec une caméra Sequoia aéroportée (permettant une résolution de l'odre de la dizaine de centimètres) nous a donc semblé la plus propice à ce type de travaux.

Nous avons donc planifié un relevé de notre zone par drone avec une caméra Sequoia embarquée. Celui-ci suivait un plan de vol préparé à l'avance par un autre groupe d'étudiants travaillant en parallèle sur un sujet de photogrammétrie, et plus particulièrement de qualification de la caméra Sequoia. Cette acquisition s'est donc révélée doublement utile.



FIGURE 7: Plan de vol lors de l'acquisition par drone

En assurant un recouvrement inter-bande autant qu'intra-bande, on obtient une stéréoscopie de bonne qualité, qui aboutit ensuite via plusieurs traitements

à la détection de ces fameux points de liaisons. L'étude de la densité de ces points dans l'espace constituait donc une étape importante de notre projet. La comparaison avec la densité de points LiDAR et, évidemment, avec la vérité terrain, était susceptible de nous apporter beaucoup d'information sur la qualité de cette méthode.

3 Traitements

3.1 Relevé terrain

Nos journées sur le terrain effectuées les vendredi 12 juillet et mardi 16 juillet 2019 ont permis de décrire la morphologie de la végétation présente sur notre zone d'étude. Cette information a été collectée suivant un protocole qui s'inspire de celui fourni par les chercheurs de l'IRSTEA (cf. section 2.5.1). L'objectif était de qualifier les nuages de point LiDAR et photogrammétrique, i.e. de voir dans quelle mesure l'information fournie par ces deux sources de données correspond à la réalité observée sur le terrain.

Pour effectuer cette comparaison, nous avons trouvé opportun de traiter les données relevées afin d'en déduire un modèle 3D.

La particule élémentaire de notre relevé est une placette. Il s'agit d'une zone bien délimitée que nous entourions à l'aide du GPS et pour laquelle nous notions la densité du feuillage, du branchage, la présence de trouée et la continuité horizontale. Ainsi pour chaque placette, nous avons deux type de données :

- des données géographiques correspondant à la couverture de la placette
- des données numérique relatives à la densité de la biomasse

Le traitement de l'information géographique consistait, dans un premier temps, à recaler l'ensemble des points GPS. La mesure de point en RTK implique l'utilisation de deux GNSS : un fixe qui joue le rôle de la base, et un autre mobile qui est employé pour les mesures. La base émet sa position qui est captée par le GNSS mobile. Ce lien entre les deux terminaux permet d'accroître la précision en appliquant une correction sur les mesures. La position de la base s'affinant au cours du temps, on récupère sa position la plus précise possible pour recaler toutes les mesures.

Un fois cette phase de calage achevée, les points d'une même placette sont reliés pour former une polyligne à l'aide du logiciel QGIS. Puis de la polyligne on passe à un polygone (voir figure ??).



FIGURE 8: Processus de transformation de l'information géographique relevée sur notre zone d'étude.

Cet ensemble de polygones est déjà tout à fait exploitable pour qualifier en 2D nos données en raisonnant par couches; mais nous désirions aller plus loin en modélisant nos placettes en 3D. Pour ce faire, plusieurs pistes logicielles s'offraient à nous : SketchUp, AutoCAD, Blender et ArcGIS Pro. Après quelques essais peu concluants sous SketchUp (prisé pour sa facilité de prise en main) et quelques recherches sur AutoCAD et ArcGIS Pro, nous avons finalement opté pour Blender, logiciel libre de modélsation 3D réputé pour sa complexité.



FIGURE 9: Strate C dans le logiciel Blender après création des volumes

Malgré la difficulté de prise en main, nous avons réussi à faire les traitements souhaités :

- 1. importer un fichier shapefile tout en conservant son géoréférencement
- 2. modifier la position verticale des placettes en fonction de leur altitude
- 3. extruder chaque placette pour former des volumes
- 4. exporter le résultat pour comparaison avec les nuages de points

L'import des fichier *shapefile* a été rendu possible grâce à l'*addon* Blender-GIS¹ qui permet d'importer différents formats couramment employés en SIG.

 $^{1. \} https://github.com/domlysz/BlenderGIS$

L'installation est simple et l'import fluide : il suffit de préciser le système de coordonnées de référence utilisé ainsi que quelques détails.

La modification de l'altitude et l'extrusion de chacune des placettes ont été automatisées grâce à un script Python utilisant l'API de Blender. L'un des avantages de ce logiciel (parmi tant d'autres) est de proposer une interface de développement intégrée qui facilitait le débuggage et le codage sur des opérations de manipulation d'objets 3D. Le script est disponible en annexe D.

L'export en format Stanford (.ply), Collada (.dae), ou Wavefront (.obj) permet par la suite de comparer les volumes créés aux nuages LiDAR et photogrammétriques. Pour effectuer la comparaison, le logiciel ArGIS Pro semble une bonne piste que nous n'avons malheureusement pas pu creuser par manque de temps.

3.2 LiDAR

Nous voulons dans un premier temps isoler chaque strate de la forêt afin de pouvoir les confronter à notre vérité terrain. Nous aurons donc une strate herbacée allant de 0 à 1 mètres, une strate arbustive allant de 1 à 4 mètres, une strate arborée de 4 à 10 mètres, et enfin une strate pour les végétaux dépassant 10 mètres.

Pour effectuer cet isolement, nous devons traiter le nuage de points en trois dimensions, c'est à dire classer les échos par hauteur par rapport au modèle numérique de terrain (MNT fourni par l'IGN). Pour cela nous effectuons sous CloudCompare la différence entre les altitudes des points LiDAR et celle du MNT.

A présent, nous pouvons raisonner par hauteur par rapport au sol. Nous pouvons isoler chacune des strates de notre zone afin d'en étudier la continuité verticale et horizontale. Pour cela, nous nous sommes intéressés à une fonction permettant de déterminer la densité volumique de points dans une zone 3D de l'espace. Celle-ci calcule dans une boule d'un rayon arbitraire, centrée sur chacun des points du nuage, le nombre de points voisins sur le volume de la boule. Il en ressort un coefficient de densité : $\frac{N}{\frac{4}{3}.Pi.R^3}$ avec N : le nombre de plus proche voisin, et R : le rayon choisi. Cela permet de mettre en évidence les zones denses.

Nous avons appliqué ce traitement à chacune des strates de notre zone. Comme nous pouvons l'observer sur l'image ci-dessous, nous avons ainsi une information de la continuité de la végétation tant verticale que horizontale.



FIGURE 10: Densité volumique

Nous avons également exploré une autre piste pour mettre en évidence les continuités verticales et horizontales séparément. Pour cela, nous pensions utiliser les octree, une méthode proposée par CloudCompare. Cette méthode créé des cubes englobant notre nuage de points. Ces cubes peuvent ensuite se subdiviser autant de fois que voulu en huit cubes plus petits. Les volumes vides seront alors supprimés et le modèle sera plus proche de la réalité. En répétant cette opération successivement, nous avons obtenu un modèle qui nous convenait.



FIGURE 11: Traitement du nuage par octree

Lorsqu'un nuage de point est converti en octree, chacune des cellules contenues dans l'octree contient nécessairement un ou plusieurs points. Donc, si nous avions pu trouver une subdivision d'octree adaptée, les relations d'adjacence inter-cellule auraient mis en évidence à la fois une continuité horizontale mais également verticale. Nous n'avons pas trouvé de fonctions dans le logiciel permettant cela. Il aurait peut-être fallu coder un plugin dans CloudCompare implémentant cette fonctionnalité. Cependant, le logiciel étant codé en C++, langage que nous ne connaissons pas, nous n'avons pas approfondi nos recherches dans cette voie. Les premiers résultats restant satisfaisant, nous avons préférés poursuivre d'autres axes de travail.

Finalement, nous avons une information de densité dans le nuage de point. Cela nous donne ainsi une piste très crédible pour détecter le sous bois. Il faut maintenant comparer nos résultats avec la vérité terrain que nous avons effectuer. Nous allons la comparer aussi bien en trois dimensions qu'en deux dimensions. Ceci sera détaillé ultérieurement dans la partie "Synthèse".

3.3 Photogrammétrie

Une fois l'acquisition réalisée sur le terrain, nous nous sommes attelés au traitement des données brutes, à savoir des nombreuses photographies recouvrant la zone.

Nous nous sommes tournés vers le logiciel MicMac développé, entre autres, par l'IGN, et auquel nous étions un peu familiarisés.

Toutefois, l'autre groupe de photogrammétrie traitant également notre acquisition, nous avons pu éviter quelques étapes du processus, à savoir la mise en place relative des images les unes par rapport aux autres.

Nous souhaitions travailler avec la caméra interne du drone, qui posséde une excellente résolution (aux alentours du centimètre avec notre hauteur de vol qui ne dépassait pas 50m). Cependant un problème de format de fichier nous en a empêché. Pour être plus précis, la caméra du drone recale les images et les corrige automatiquement de la distorsion, ce qui n'est pas compatible avec les traitements MicMac qui s'occupent de l'intégralité de la modification des images, ce qui fait d'ailleurs sa force.

A l'instar de notre groupe partenaire, c'est donc sur la caméra Sequoia de Parrot que nous nous sommes concentrés. (Voir annexe : C)

Nous avons choisi d'étudier le canal Proche Infrarouge (NIR - Near-Infrared) aux dépends des canaux Rouge, Vert et Bleu. Bien que dans l'immédiat seule l'information spatiale nous importait, et non l'information radiométrique, d'éventuels traitements à venir (par exemple un calcul de NDVI ou une classification par espèces) ont motivé notre choix.

Il ne faut pas oublier que la totalité de nos travaux s'effectue sur une parcelle parfaitement située à la surface du globe. Pour que nous puissions superposer par la suite nos résultats avec tous les autres, et donc en tirer des conclusions, il est à chaque fois nécessaire de géoréférencer nos données. Les données brutes l'étaient déjà puisque provenant de l'IGN. En revanche ce n'était pas le cas pour ces photographies drone.

Rapport de stage



FIGURE 12: 3 nuages de points non géoréférencés : un nuage LiDAR en bleu, et deux fois le même nuage drone, l'un ayant subi un traitement de plus que l'autre. On se rend bien compte de l'absolue nécessité de parfaitement aligner ces nuages pour pouvoir en tirer quelque chose

Pour remédier à cela s'exécute l'étape de la mise en place absolue. Ayant placé des ciblettes photogrammétriques tout autour de notre zone (10 au total), nous avons déterminé leurs coordonnées par RTK, de la même manière que pour le contour de nos placettes. En pointant alors ces ciblettes sur les photographies où elles sont discernables en post-traitement et connaissant leurs coordonnées en RGF 93, une similtude 3D faite par MicMac aboutit au placement exact de nos images dans le référentiel français.



FIGURE 13: A gauche, une image prise par le canal NIR de la Sequoia, à droite, la ciblette photogrammétrique vaguement discernable sur cette même image

Nous avons alors extrait trois informations principales de cette acquisition : la densité de points de liaison trouvés par MicMac dans l'espace, une reconstitution 3D en nuances de gris de la zone et enfin une carte des profondeurs, que l'on peut assimiler à un MNS très précis.



FIGURE 14: De gauche à droite : le nuage de points de liaison (les sommets de prises de vues sont en rouge), le nuage dense reconstitué et enfin la carte des profondeurs

De la première donnée nous souhaitions extraire une carte de densité, permettant de valider ou non notre hypothèse présentée dans la partie "Méthodologie" : aurons-nous effectivement une densité de points de liaison plus faible dans les zones réellement plus denses sur le terrain?

Par manque de temps, nous avons pu aboutir à la donnée finale, mais sans réellement pouvoir en produire une analyse. En effet celle-ci semble assez décorrélée de la donnée LiDAR étudiée précédemment. Nous n'avons donc pas de réel résultat concernant un éventuel lien entre la densité de points photogrammétriques, la densité de points LiDAR et donc la vérité terrain.



FIGURE 15: A gauche la carte de densité de points photgrammétriques, à droite la même carte avec les points LiDAR. On distingue très clairement de grosses différences sur les deux

Malgré tout, nous avons pu tirer deux autres informations extrêmement intéressantes (et imprévues) de ces résultats.

Premièrement, la carte des profondeurs nous a offert l'opportunité de réaliser une détection automatique des cimes d'arbres, et donc de leur position, ce qui constitue un élément fondamental pour une étude morphologique. Ce point est plus amplement détaillée dans la sous-partie "Repérage automatique des cimes" située plus loin.

En second lieu, la superposition des nuages LiDAR et Drone ont fourni une autre information concernant la hauteur des arbres. Effectivement, on constate au sol un écart entre les nuages d'en moyenne cinquante centimètres, soit la précision de notre RTK en zone arborée, il n'y a donc rien d'étonnant à cela. En revanche au niveau des cimes des arbres, on constate parfois des écarts s'étendant jusqu'à trois mètres. C'est une différence colossale, une simple imprécision de positionnement ne peut expliquer ce phénomène. Nous avancerons donc une explication dans la partie "Synthèse" de ce rapport.

3.4 Données satellites multi-temporelles

L'image Spot mise à notre disposition a déjà été l'objet d'un traitement en pan-sharpening. Sans accès à la donnée d'origine, nous devons donc paradoxalement effectuer l'opération inverse afin d'obtenir une image panchromatique. Cette opération a été effectuée en moyennant les valeurs RVB de l'image obtenue. Une alternative envisagée aurait été d'effectuer une analyse par composante principale Préparation des données Spot ou Pléiades 1 Découpage de l'image par l'emprise de la zone pour alléger les calculs Les étapes suivantes sont nécessaires pour le seul cas où nous n'ayons pas accès à la bande d'information pan-chromatique. Nous devons donc la recréer, soit en prenant la moyenne des bandes rouge-vert-bleu du produit final, soit en affinant leur combinaison avec une ACP, dont la première variable, la plus explicative, correspond à la luminance 2 Calcul d'une ACP sur les canaux bleu-vert-rouge 3 Calcul d'une image en noir et blanc en fonction des résultats de l'ACP

Préparation des données Sentinel

1. Combinaison des bandes utiles à l'analyse dans un même fichier

- Bande 2 : Bleu
- Bande 3 : Vert
- Bande 4 : Rouge
- Bande 8 : Proche Infra-rouge
- 2. Découpage de l'image obtenue par l'emprise de la zone
- 3. Superposition de l'image avec celle de Spot/Pléiades (même position spatiale et même résolution)
- 4. Pan-sharpening



"Spotinel"



FIGURE 16: Illustration du pan-sharpening appliqué à deux sources de données

En répétant l'opération sur des images Sentinel prises à plusieurs dates de l'année, on obtient des données multi-temporelles dont la résolution est compatible avec notre échelle de travail.

3.5 Repérage automatique des cimes

En parallèle de nos trois axes prioritaires, nous souhaitions également parvenir à identifier de manière automatique la cime du plus grand nombre d'arbre d'une zone. Cet outil possède deux atouts majeurs pour notre projet. Tout d'abord, il permettra de connaître avec une grande précision la présence de biomasse : en effet, connaissant l'emplacement exact d'un arbre, il est possible d'apporter une description fine de la morphologie de la forêt, ce qui est exactement notre problématique. C'est donc un apport important aux données LiDAR qui fournissent une densité d'échos. Cette densité peut d'ailleurs être mise en relation avec la détection des cimes pour vérifier la cohérence des deux résultats (y a-t-il effectivement un arbre là ou nous captons un écho d'une strate arborée). Deuxièmement, à terme dans un projet futur il serait optimal de réussir à cartographier complètement en trois dimensions une zone forestière, à l'arbre près. En connaissant la position des arbres, on peut donc les dessiner exactement à leur emplacement réel dans un espace à trois dimensions. Cela dépasse le cadre de notre projet mais c'est une piste à explorer pour les futurs travaux qui nous suivront.

Parmi toutes les données à disposition, nous supposions que le MNS ou le Sursol (aussi appelé MNH ou MNE) seraient les plus à mêmes de faciliter un découpage suivant la hauteur des éléments présents dans les environs.



FIGURE 17: MNS à 1m (à gauche) et donnée de Sursol à 1m (à droite)

Cependant, il s'est rapidement avéré que malgré leur bonne résolution, ces images étaient trop peu contrastées, et ce même après un premier étalement linéaire. Une perte d'information importante, puisque nous travaillions à l'échelle de l'arbre, était inévitable en se cantonnant à ces deux données.

Notre choix s'est donc porté sur le MNS reconstitué sous MicMac à partir du nuage de points photogrammétriques. En effet sa densité est telle que de nombreuses variations d'intensité étaient nettement mieux visibles.



FIGURE 18: Carte des profondeurs ou MNS calculé à partir du nuage de points photogrammétriques

Les formes géométriques entourant la zone correspondent au bord des photographies prises par le drone. Celles-ci ne sont pas prises en compte dans le traitement. Elles ne constituaient qu'un résidu des calculs ayant abouti à la carte des profondeurs.

La totalité du traitement s'est déroulée sur QGIS. Ceci en utilisant l'extension Orfeo ToolBox (OTB) incluse dans le logiciel qui propose une collection d'outils de traitements d'image. Différentes étapes de smoothing et de segmentation ont été testées, afin d'arriver au meilleur résultat possible. Nous nous inspirions des travaux de Sylvain Jourdana qui explique dans son rapport avoir préférentiellement utilisé un algorithme de Watershed, qui semble plus adapté à une différenciation selon la hauteur. De plus, que ce soit le MNS ou le Sursol, les données sources étaient des images en nuances de gris, parfaites pour appliquer l'algorithme des bassins-versants.

Ce sera cependant une segmentation par Mean-Shift qui sera retenue. Celleci, avec des paramètres adaptés, découpe la zone avec une succession de "lignes de niveau", qui isolent suffisamment précisément la partie supérieure de la corolle pour identifier aisément les cimes.



FIGURE 19: Segments ombragés et colorisés dans un but graphique uniquement



FIGURE 20: Vue plus précise des segments vectorisés

Une fois la segmentation terminée, la sélection de ces petites zones ellipsoïdales, correctement situées dans le RGF 93, constitue la dernière étape.

Cette sélection s'est elle-même subdivisée en plusieurs sous-sélections. Il fallait pour cela définir au mieux les critères géométriques propres aux zones de cime. En plus de l'aire seule du segment, qui ne devait pas être élevée puisqu'une cime est fine, le rapport aire/périmètre s'est avéré un premier filtre efficace. En effet, si celui-ci est trop élevé, c'est que le segment est de forme trop allongée. Suite à cela, nous avons observé, de par la forme concentrique des segments, qu'en majorité les centroïdes des formes géométriques étaient contenus dans les polygones centraux, c'est à dire au plus proche, si ce n'est à l'intérieur, des cimes.

FIGURE 21: Améliorations successives de la sélection

Ce stade franchi, la plupart des segments erronés encore présents se résumait aux formes diverses et allongées entourant parfois les cimes que la première étape n'avait pas supprimé.

En raison de leur géométrie assez aléatoire, un calcul de cercles englobant nous a semblé le plus propice à leur élimination. En réalisant le rapport : <u>Aire du Cercle Englobant la Géométrie</u>, les formes les plus éloignes d'un cercle/d'une ellipse sont rapidement écartées. De ce fait nous avons abouti à une isolation loin d'être parfaite mais tout à fait satisfaisante. Plus précisément, les arbres isolés sont très fréquemment sélectionnés par l'algorithme, en revanche les arbres de plus grands rayons ou dont la cime se confond dans la frondaison d'autres arbres sont moins bien représentés. Cependant cette piste est à approfondir et d'autres travaux pourront s'atteler, si besoin est, à affiner cette sélection.

4 Synthèse

4.1 Résultats

Notre étude, dense en matière de données, n'a logiquement pas abouti sur toutes les méthodes envisagées. Le diagramme suivant illustre notre avancement du projet, en vert ce qui a donné des résultats intéressants, en rouge, les pistes à explorer.



FIGURE 22: Diagramme de synthèse des traitements.

La technique du LiDAR a débouché sur une information de continuité verticale et horizontale. Cependant, si nous avons réussi à la mettre en évidence visuellement, nous n'avons pas réussi à la quantifier. Nous avons également abandonné la piste des octree qui se limitait, à notre connaissance, à la visualisation.

Le processus photogrammétrique a abouti sur un nuage de points en trois dimensions offrant une meilleure résolution que le LiDAR aéroporté. Cela nous a permis d'obtenir un Modèle Numérique de Surface (MNS) de très bonne résolution permettant de déterminer les cimes des arbres par un algorithme de MeanShift, puis de déterminer les troncs. Cette partie de l'arbre représente une forte densité de biomasse et apporte donc une information non négligeable. Le nuage de points issu du processus photogrammétrique est ainsi 30 fois plus dense que celui du LiDAR. En faisant la différence de hauteur entre ces deux nuages de point nous obtenons un résultat très intéressant :



FIGURE 23: Différence entre les hauteurs du nuages de point LiDAR et photogrammétrique

Cette illustration montre les lacunes du LiDAR aéroporté, on voit assez nettement que la cime des arbres n'est généralement pas prise en compte par les faisceaux du LiDAR. Ceci peut être expliqué d'une part par la résolution terrain, de l'ordre du mètre, du LiDAR, ainsi susceptible de manquer une cime, un point culminant. A l'inverse le drone, bien qu'ayant une imprécision de placement atteignant le demi-mètre en moyenne, nous a fourni un nuage recouvrant parfaitement les surfaces et donc les cimes des arbres. Cette comparaison montre l'apport d'une capture par drone, économiquement plus accessible, pour juger de la qualité des données LiDAR. Dans le cadre de notre étude, nous aurions ainsi apprécié travailler sur des données LiDAR dotée d'une meilleure résolution, permettant ainsi d'identifier individuellement les arbres, voire leurs troncs.

La technique de pan-sharpening a débouché sur la création de couches en deux dimensions multi-temporelles. Toutefois, parmi les choix à opérer nous avons finalement jugé qu'elle n'était pas prioritaire, notamment du fait que nous n'avions pas identifié comment ajouter une troisième dimension aux informations produites.

Enfin, le protocole pour le relevé terrain est certainement la tâche la plus aboutie. Cela se justifie par le fait qu'il nous paraissait primordial car permettant de valider ou non les autres techniques et procédés. Nous avons d'abord créé des couches en deux dimensions correspondant à nos placettes et nous apportant une information de continuité horizontale, puis par la suite des couches en trois dimensions nous donnant cette fois-ci, une information tant sur la continuité horizontale que verticale.

Finalement, nous avons fourni le maximum de données et d'informations afin

finaliser ce projet très dense pour un stage de trois semaines.

Nous avons croisé nos données de vérité terrain en deux dimensions avec nos données du nuage de point du LiDAR projeté orthogonalement en deux dimensions. Du coté de la vérité terrain, un code couleur indique la continuité horizontale relevée sur le terrain. Et de l'autre coté, la densité de points LiDAR par mètre cube dans chaque placette.



FIGURE 24: Comparaison de la continuité horizontale observée avec la densité volumique de points LiDAR par strate

Le processus d'analyse mis en place permet de comparer la densité des points LiDAR au regard de nos relevés de terrain, en les croisant en deux dimensions sous format raster, strate par strate. Une carence de valeurs dans les strates inférieures aurait invalidé l'utilisation de cette source de données. Or nous obtenons bien des valeurs sur les strates A et B sur l'ensemble de notre terrain, y compris dans les zones les plus boisées.

Au-delà de ce simple constat, encourageant, nous espérions retrouver un lien statistique entre la densité de points LiDAR dans une parcelle et sa qualification en densité de feuillage, de branches ou en continuité horizontale. Les premiers traitements ne permettent pas de mettre en avant un tel lien. Ainsi, la quasiabsence de données LiDAR dans la strate supérieure est vraisemblablement due à une sur-estimation de la hauteur des arbres enquêtés, plus qu'à une non capture des éléments supérieurs de la canopée. A l'inverse, nous n'avons pas qualifié la première strate, en particulier lorsqu'il n'y avait pas de continuité verticale avec les strates supérieures, là où le LiDAR présente une information.

4.2 Discussion

Ce projet a été l'occasion de démontrer la possibilité et l'intérêt de travailler sur la forêt avec une approche tridimensionnelle. Ce choix, encore rare dans la littérature scientifique, permet d'intégrer visuellement et analytiquement les différentes strates de végétation, et pas uniquement la canopée.

Notre protocole de terrain a ainsi permis de générer un modèle 3D de la zone étudiée, qui pourra être croisé avec le nuage de points du LiDAR. Dans cette idée, le LiDAR n'est plus un outil de contrôle mais une donnée qualifiable parmi d'autres. Nous avons ainsi pu mettre en avant les différences entre les hauteurs de cimes, que le LiDAR aréoporté n'avait pas été capable de relever, contrairement aux données photogrammétriques issues du drone.

Ce travail exploratoire, réalisé en moins de trois semaines, a permis de constituer un éventail de données et d'outils sur une même parcelle. Ces productions, mises à disposition de la communauté scientifique et éducative, pourront être reprises et augmentées.

4.3 Perspectives

Si nous avions eu plus de temps, nous aurions souhaité aller au bout de l'analyse dite "Spotinel", afin d'explorer cette exploration diachronique.

Concernant les données LiDAR, il serait intéressant de se pencher sur la donnée brute : pour chaque impulsion on n'aurait pas seulement accès à un certain nombre d'échos (comme c'est le cas dans les nuages étudiés) mais aussi à une onde de forme qui permettrait de mieux caractériser la morphologie visée (cf. figure 25).



FIGURE 25: Signal LiDAR à forme d'onde en rouge sur le graphe (Hancock [2017]). La largeur de la réponse n'est pas la même pour des branches ou des feuilles par exemple.

Concernant la qualification des différents nuages à l'aide de nos relevés terrain, il aurait été intéressant de pouvoir utiliser l'octree, car ce procédé, en plus d'être extrêmement visuel, crée immédiatement des structures en trois dimensions. Il serait alors facile d'intercepter ces structures avec nos volumes de vérité terrain. D'autre part, cette technique permet d'obtenir des informations de continuité.

Nous pensons également que la photogrammétrie peut fournir d'autres informations, au-delà du nuage de points que nous avons obtenu. Ainsi, notre hypothèse reste à vérifier : plus la végétation est dense moins les logiciels trouvent de points de liaisons.

Avec davantage de temps, nous aurions pu comparer les différentes techniques entre elles, et avec notre vérité terrain. Cela aurait pu permettre de les critiquer, de les approuver, ou de rejeter leur intérêt dans le cadre de notre projet.

Enfin la confrontation des données photogrammétriques et LiDAR a démontrer l'apport d'un LiDAR porté par drone.

Références

- Aymeric Dutremble et Clément Helstroffer. Suivi de la végétation suite aux principaux incendies dans le luberon. page 18, 2019.
- Sylvain Jourdana. Traitement de données lidar pour la modélisation d'indicateurs de biodiversité forestière. page 71, 2017.
- Sahar Ben Hmida. Inversion des formes d'ondes LiDAR pour l'estimation des caractéristiques des cultures et des forêts par des techniques probabilistes et variationnelles. PhD thesis, 2018.
- Mounir Aït Mansour. Extraction d'éléments géométriques dans un nuage de points lidar terrestre : application aux relevés de façades. page 141, 2014.
- Steven Hancock. Measurement of fine-spatial-resolution 3d vegetation structure with airborne waveform lidar : Calibration and validation with voxelised terrestrial lidar. 2017.

Annexes

| Description des dommages après le feu | | | | | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|--|--|--|--|--|--|
| Zone d'arrivée du feu : Indéterminé / Haut / Bas / SO | | | | | | | | | | | |
| Etage A : 0 - 1 m. | | | | | | | | | | | |
| Espèce dominante (plusieurs si haie ou bosquet mixte à parts égales) : | | | | | | | | | | | |
| Troncs (niv ramification 0) 0 : non noircis 1 : partiellement noircis 2 : complètement noircis 3 : dommages profonds, chicots SO Remarques (ex : écorce absence) : | Branches (niv ramification 1) 0 : non noircies (ou élagage nat) 1 : partiellement noircies 2 : complètement noircies 3 : dommages profonds, chicots SO | Rameaux (niv ramification ≥2) 0 : non noircis 1 : noircis 2 : disparition des derniers niveaux de ramification 3 : disparition totale SO | Feuilles : 0 : vertes 1 : roussies 2 : partiellement absentes (présentes au sol) 3 : absentes SO | Fruits : 0 : non noircis 1 : noircis 2 : absents SO | | | | | | | |
| Etage B : 1 - 4 m So | | | | | | | | | | | |
| Espèce dominante (plusieurs si haie ou bosquet mixte à parts égales) : | | | | | | | | | | | |
| Strate 0 - 1 m | | | | | | | | | | | |
| Troncs (niv ramification 0) | Branches (niv ramification 1) | Rameaux (niv_ramification ≥2) | Feuilles : | Fruits : | | | | | | | |
| 0 : non noircis | 0 : non noircies (ou élagage nat) | 0 : non noircis | 0 : vertes | 0 : non noircis | | | | | | | |
| 1 : partiellement noircis | 1 : partiellement noircies | 1 : noircis | 1 : roussies | 1 : noircis | | | | | | | |
| 2 : complètement noircis | 2 : complètement noircies | 2 : disparition des derniers niveaux de ramification | 2 : partiellement absentes (présentes au sol) | 2 : absents | | | | | | | |
| 3 : dommages profonds, chicots | 3 : dommages profonds, chicots | 3 : disparition totale | 3 : absentes | SO | | | | | | | |
| SO | SO | SO | SO | | | | | | | | |
| Remarques (ex : écorce absence) : | | | | | | | | | | | |
| Strate 1 - 4 m | | | | | | | | | | | |
| Troncs (niv ramification 0) | Branches (niv ramification 1) | Rameaux (niv ramification ≥2) | Feuilles : | Fruits : | | | | | | | |
| 0 : non noircis | 0 : non noircies (ou élagage nat) | 0 : non noircis | 0 : vertes | 0 : non noircis | | | | | | | |
| 1 : partiellement noircis | 1 : partiellement noircies | 1 : noircis | 1 : roussies | 1 : noircis | | | | | | | |
| 2 : complètement noircis | 2 : complètement noircies | 2 : disparition des derniers niveaux de ramification | 2 : partiellement absentes (présentes au sol) | 2 : absents | | | | | | | |
| 3 : dommages profonds, chicots | 3 : dommages profonds, chicots | 3 : disparition totale | 3 : absentes | so | | | | | | | |
| SO | so | so | SO | | | | | | | | |
| Remarques (ex : écorce absence) : | | | - | | | | | | | | |

A Extrait du protocole fourni par l'IRSTEA

B Schéma de quelques placettes dessinées lors de l'acquisition terrain



C Caméra Sequoia embarquée lors de l'acquisition drone



D Script Python utilisé pour créer les volumes de la vérité terrain

```
\# -*- coding: utf-8 -*-
 1
    .....
 \mathbf{2}
 3
    @author: EAL (elie-alban.lescout@ensg.eu)
    0.0.0
 4
 5
 6
    import numpy as np
    import bmesh
 7
8
    import bpy
    from mathutils import Vector
9
10
11
```

```
12
13
   def shiftAltitude():
14
15
    #importing altitude data
       16
            , <sup>7</sup>i8 ')])
17
18
    \#creating convenient link between object name and its altitude
    data_dict = \{ data[i][0] : data[i][1] \text{ for } i \text{ in } range(0, len(data)) \}
19
20
    #Changing altitude for every object
21
22
     for obj in bpy.context.selected_objects:
23
         print(obj.location.z)
24
         print(obj.name, data_dict[int(obj.name)])
25
         obj.location.z += data dict[int(obj.name)]
26
27
28
29
   def extrudeStrates(z_start, z_span):
30
    for obj in bpy.context.selected objects:
31
32
            #Making the current objet the active one
33
34
            bpy.context.scene.objects.active = obj
35
36
            #Shift upward as indicated
37
            obj.location.z += z_start
38
            #Get mesh from object
39
40
            mesh = obj.data
41
42
            #Entering edit mode to extrude
43
            bpy.ops.object.mode_set(mode='EDIT')
44
45
            #Needed
46
            bm = bmesh.from edit mesh(mesh)
47
            \#Duplicate face and create intermediate faces
48
49
            bmesh.ops.extrude face region(bm, geom=bm.faces,
                use_select_history=True)
50
            print('extrude_face_region done')
51
            #Translate created face to form volume
52
            bm.faces.ensure lookup table()
53
54
            bmesh.ops.translate(bm, vec = Vector((0, 0, z_span)), verts
                = bm. faces [1]. verts)
55
56
            \# Show the updates in the viewport
            bmesh.update_edit_mesh(mesh, False, False)
57
58
59
     #Switch back to object mode
     bpy.ops.object.mode_set(mode='OBJECT')
60
61
62
```

63 64 if __name__ == "__main__": 65 shiftAltitude() 66 extrudeStrates(4,6)