



HAL
open science

Développement d'une solution combinant des données Lidar et multispectrales pour l'identification de variables environnementales clés caractérisant les services écosystémiques des cours d'eau de tête de bassin

Laudéa Chignol

► To cite this version:

Laudéa Chignol. Développement d'une solution combinant des données Lidar et multispectrales pour l'identification de variables environnementales clés caractérisant les services écosystémiques des cours d'eau de tête de bassin. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04782636

HAL Id: dumas-04782636

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04782636v1>

Submitted on 14 Nov 2024

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

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

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Laudéa CHIGNOL

Développement d'une solution combinant des données Lidar et
multispectrales pour l'identification de variables environnementales clés
caractérisant les services écosystémiques des cours d'eau de tête de bassin

Soutenu le 04 septembre 2024

JURY

Monsieur Stéphane DURAND Président du jury

Monsieur Mathieu BONNEFOND Maître de stage

Madame Elisabeth SIMONETTO Maître de stage

Monsieur Jérôme VERDUN Enseignant référent

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier toutes les personnes ayant contribué à la bonne réalisation de mon stage et ainsi joué un rôle dans la réussite de ce Travail de Fin d'Etudes (TFE).

J'exprime ma profonde gratitude à Mathieu Bonnefond, mon maître de stage, et Élisabeth Simonetto, seconde encadrante, pour leur disponibilité, leurs conseils avisés et leur accompagnement lors des missions de drones.

Je tiens à remercier Jérôme Verdun, mon enseignant référent, pour le temps consacré à mon suivi, ainsi que pour son soutien tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je souhaite également remercier l'ensemble des membres du projet STRANGE, pour la découverte de leurs protocoles scientifiques, l'entraide et la bonne ambiance sur le terrain. Merci à Thomas Houet et Thibaut Peres pour leur retour d'expérience et leurs précieux conseils.

Merci à l'ensemble du personnel du Laboratoire Géomatique et Foncier (GeF) et de l'École Supérieure d'Ingénieurs Géomètres et Topographes (ESGT) pour m'avoir accueilli et prodigué de nombreux conseils au cours de ce stage. Notamment à Germain Jouanneau, du service informatique, et Frédéric Durand, ingénieur calcul, qui se sont démenés pour améliorer la capacité de calcul de mon poste de travail afin de rendre réalisable l'ensemble des traitements effectués. Mais aussi aux autres stagiaires au sein du laboratoire, pour l'ambiance chaleureuse de la salle T0 et les nombreux échanges pertinents.

Enfin, merci à Baptiste Jouhannet, pour son appui précieux au quotidien lors des manipulations mais aussi lors de la rédaction ce mémoire, ainsi qu'à nos familles pour leur soutien tout au long de notre scolarité.

Liste des abréviations

2D / 3D – 2 Dimensions (X, Y) / 3 Dimensions (X, Y, Z)

ANR - Agence Nationale de Recherche

BI - Brightness Index

CNRS - Centre National de la Recherche Scientifique

CRP – Calibrated Reflectance Pannel

DLS2 - Downwelling Light Sensor 2

EBV – Essential Biodiversity Variable

FOV - Field Of View

GCP - Ground Control Point

GNSS - Global Navigation Satellite System

IGN - Institut National de l'information Géographique et forestière

IMU - Unité de Mesure Inertielle

Lidar - Ligh detection and ranging

MNS/MNT/MNH - Modèle Numérique de Surface/Terrain/Hauteur

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NIR - Near InfraRed

PPK - Post Processing Kinematic

RAM - Random Access Memory

RGP - Réseau GNSS Permanent

RTK/NRTK – (Network) Real Time Kinematic

RVB - Rouge Vert Bleu

STRANGE - ecosystem Services provided by sTReams to AdjaceNt aGricultural tErrestrial ecosystems

VIF – Variance Inflation Factor

WGS84 - World Geodetic System 1984

Glossaire

Echelle : en cartographie une échelle indique la relation entre une distance réelle et une distance sur une carte. Une petite échelle fait référence à une grande zone avec peu de détails, tandis qu'une grande échelle fait référence à une petite zone avec beaucoup de détails.

Géoréférencement : le géoréférencement consiste à attribuer un système de coordonnées à des données (nuage de points, rasters, etc.). Cette étape permet d'aligner les données provenant de différentes sources et de les situer dans l'espace.

Image multispectrale : une image multispectrale est une image qui contient des valeurs de réflectance dans plusieurs bandes du spectre électromagnétique. Elle permet de capturer la signature spectrale des objets.

Indices spectraux : les indices spectraux sont des rasters obtenus par un calcul sur une ou plusieurs bandes spectrales d'une image multispectrale. Ces indices permettent de synthétiser les informations contenues dans ces bandes pour faciliter les analyses en ciblant certains aspects de la couverture terrestre (teneur en chlorophylle, en eau ...)

Métriques Lidar : les métriques Lidar sont des mesures dérivées d'un nuage de points Lidar. Elles sont calculées à partir des attributs du nuage (X,Y,Z, intensité, nombre de retours, etc.). Par exemple l'attribut Z peut être utilisé pour calculer la hauteur des arbres.

Réflectance : la réflectance est la capacité d'une surface à réfléchir la lumière incidente, sa valeur varie notamment en fonction de la nature de cette surface.

Résolution spatiale : taille du plus petit élément qu'il est possible de distinguer . Pour un nuage de point, elle est étroitement liée au pas d'échantillonnage de celui-ci, (la distance moyenne entre les points) et pour une photographie à la taille pixel sol (la taille réelle du terrain que chaque pixel représente).

Services écosystémiques : les services écosystémiques sont des bénéfices fournis par un écosystème naturel qui profitent directement ou indirectement aux activités humaines ou à un autre écosystème. Ces avantages peuvent être des services de soutien (processus écologiques tel que le cycle de l'eau, etc.), des services d'approvisionnement (extraction à but de consommation : eau, minéraux, etc.), services de régulation (lutte contre les parasites, contrôle de l'érosion, pollinisation, etc.) ou encore services culturels (écotourisme, éducation, etc.). (Camacho Valdez et Ruiz Luna, 2011)

RTK : le RTK est une méthode de positionnement GNSS (Global Navigation Satellite System) en temps réel utilisant des corrections pour améliorer la précision de la position.

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
LISTE DES ABREVIATIONS	3
GLOSSAIRE	4
TABLE DES MATIÈRES	5
INTRODUCTION	7
I CONTEXTE D'APPLICATION DE LA TELEDETECTION	9
I.1 LE PROJET STRANGE	9
I.1.1 Un projet interdisciplinaire à vocation environnementale	9
I.1.2 Solutions de télédétection envisagées face aux contraintes du projet	10
I.2 ETAT DE L'ART DE LA TELEDETECTION DANS DES DOMAINES SIMILAIRES.....	10
I.2.1 Applications en sciences de l'environnement	10
I.2.2 La télédétection dans les écosystèmes agricoles	11
I.3 MATERIEL UTILISE	12
I.3.1 Les drones	12
I.3.1.1 <i>Le drone DJI Matrice 300 RTK</i>	12
I.3.1.2 <i>Le drone Trinity F90+</i>	12
I.3.2 Les capteurs Lidar.....	13
I.3.2.1 <i>Le DJI Zenmuse L1</i>	13
I.3.2.2 <i>Le Cube 240</i>	13
I.3.3 Les capteurs multispectraux.....	14
I.3.3.1 <i>La Micasense RedEdge-P Dual</i>	14
I.3.3.2 <i>La Micasense RedEdge-MX dual</i>	14
I.3.4 La nacelle double de la Matrice 300 RTK	14
II MISE EN PLACE DES SOLUTIONS D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT	15
II.1 PRESENTATION DES SITES ET DES PRINCIPALES CONTRAINTES	15
II.2 PREPARATION DE L'ACQUISITION DES DONNEES LIDAR	16
II.2.1 Tests de sensibilité	16
II.2.1.1 <i>Paramètres de vols et d'acquisitions</i>	16
II.2.1.2 <i>Méthode de géoréférencement</i>	21
II.2.2 Protocole de traitement des données Lidar	22
II.2.2.1 <i>Reconstruction des nuages de points</i>	22
II.2.2.2 <i>Classification du nuage de points</i>	23

II.3	PREPARATION DE L'ACQUISITION DES DONNEES MULTISPECTRALES.....	24
II.3.1	Intégration du capteur à la solution d'acquisition.....	24
	II.3.1.1 Installation sur la Matrice 300 RTK.....	24
	II.3.1.2 Configuration du capteur.....	24
II.3.2	Test du capteur.....	25
	II.3.2.1 Paramètres de vols et d'acquisitions.....	25
	II.3.2.2 Méthode de géoréférencement.....	25
	II.3.2.3 Contrôle des données.....	26
II.3.3	Protocole de traitement des données multispectrales.....	26
II.4	REALISATION DES ACQUISITIONS SUR LES SITES D'ETUDES.....	26
II.4.1	Acquisitions avec la Matrice 300 RTK et les capteurs L1 et RedEdge-P dual.....	27
II.4.2	Acquisitions avec le Trinity f90+ et les capteurs Cube 240 et RedEdge-MX Dual.....	27
II.4.3	Contrôle des résultats et comparaison des données.....	28
III	COMBINAISON DES DONNEES.....	30
III.1	EXTRACTION DES INFORMATIONS GEOMETRIQUES.....	30
III.1.1	Calcul de modèles numériques.....	30
III.1.2	Calcul de métriques Lidar.....	31
III.2	EXTRACTION DES INFORMATIONS RADIOMETRIQUES.....	32
III.2.1	Intensité Lidar.....	32
III.2.2	Calcul d'indices spectraux.....	32
III.3	ANALYSE EXPLORATOIRE POUR LA SELECTION DES VARIABLES CONTRIBUTIVES.....	33
III.3.1	Mise en œuvre de la sélection.....	33
III.3.2	Analyse des résultats.....	34
III.4	ETUDE DE LA POSSIBILITE D'UN CHANGEMENT D'ECHELLE.....	36
III.4.1	Données pouvant être mobilisées pour une étude à plus petite échelle.....	36
	III.4.1.1 Le Lidar HD de l'IGN.....	36
	III.4.1.2 Données Multispectrales de Sentinel-2.....	36
III.4.2	Aspects des données et attentes.....	36
	CONCLUSION.....	38
	BIBLIOGRAPHIE.....	39
	TABLE DES ANNEXES.....	42
	Liste des figures.....	54
	Liste des tableaux.....	54

Introduction

Face à l'intérêt croissant porté à l'étude des écosystèmes, marqués par les changements environnementaux et les pressions anthropiques, la surveillance précise et détaillée de leur évolution et de leurs relations est devenue cruciale.

Les têtes de bassins versants sont riches en petits cours d'eau, mares et zones humides. Ce sont des territoires essentiels dans le cycle de l'eau, en tant que point de départ du flux d'eau, ils participent à la régulation des crues, jouent un rôle d'épuration physico-chimique et abritent une grande biodiversité (Kagan, 2017). Contrairement aux cours d'eau des têtes de bassins situés en montagne, ceux situés en plaine subissent de nombreuses pressions anthropiques liées à l'agriculture intensive, à la sylviculture, etc. Ce sont des écosystèmes très fragiles. En raison des nombreuses interactions entre les milieux, la santé et le bon fonctionnement de ces écosystèmes aquatiques impactent directement les écosystèmes agricoles situés à proximité et en aval en raison des services écosystémiques qu'ils fournissent. Les études scientifiques considèrent généralement ces cours d'eau comme des réceptacles d'énergie, mais ils peuvent également être considérés comme des sources d'énergie, notamment grâce aux insectes émergents¹. Le projet « Ecosystem Services provided by sTReams to AdjaceNt aGricultural tErrestrial ecosystems » (STRANGE) dans lequel s'inscrit le présent travail, a pour objectif d'évaluer certains services écosystémiques fournis par les écosystèmes aquatiques, et plus particulièrement par les insectes aquatiques émergents, aux écosystèmes terrestres agricoles environnants.

Les services écosystémiques sont liés à l'équilibre et à la stabilité de l'écosystème mais aussi à sa structure et à sa composition. Pour étudier la répartition et l'évolution de ces services, il est alors intéressant d'identifier et de caractériser des variables environnementales telles que la température, la qualité de l'eau, l'humidité et la fertilité du sol ou encore la structure de la végétation. Les Variables Essentielles de Biodiversité (EBV)² correspondent ainsi au jeu de variables environnementales le plus pertinent vis-à-vis de l'étude menée sur les services écosystémiques. Elles sont étroitement liées à la dispersion des insectes aquatiques émergents. Les principaux éléments influençant celles-ci étant les

¹ Les insectes émergents aquatiques sont des insectes dont le cycle de vie comprend un stade larvaire aquatique. Une fois adulte, ils quittent le milieu aquatique pour rejoindre le milieu terrestre. C'est, par exemple, le cas des libellules.

² Les EBV sont « *un ensemble minimal de variables d'état biologique, complémentaires les unes des autres, qui sont nécessaires pour détecter les changements de biodiversité.* » (Pereira et al., 2013)

zones humides (fossés, mares, etc.), mais aussi les éléments du paysage tels que les haies et les bois qui peuvent attirer les insectes ou au contraire jouer un rôle de barrière.

Des informations précises et détaillées des écosystèmes peuvent être obtenues par télédétection. L'évolution de la technologie dans ce domaine, notamment avec le développement de capteurs Lidar (Light detection and ranging) et de caméras multispectrales adaptés aux drones, permet de collecter des données sur les écosystèmes à des résolutions spatiales très fines avec une précision remarquable. Ces deux technologies permettent de représenter la structure 3D du paysage, mais sont différentes en certains points. Contrairement à la photogrammétrie, le Lidar est une technologie de télédétection active, c'est-à-dire que le capteur émet un signal électromagnétique, puis enregistre un ou plusieurs retours d'ondes. L'enregistrement de retours multiples permet de pénétrer la végétation afin de représenter à la fois le couvert végétal et la structure sous-jacente (sol ou sous-bois), tandis que la structure 3D obtenue avec un capteur multispectral est issue de la correspondance des points entre les différentes images et dépend donc de ce qui est visible par le capteur (aucune information du sol n'est disponible dès lors qu'il y a de la végétation). En revanche, le capteur multispectral permet d'obtenir des informations de réflectance dans différentes bandes du spectre électromagnétique, ce qui permet d'analyser l'état de santé, l'humidité ou encore la composition chimique de l'environnement. Ces deux technologies sont ainsi complémentaires.

Dès lors, dans quelle mesure une approche de télédétection reposant sur la combinaison des données Lidar et multispectrales peut-elle satisfaire les besoins d'un projet de recherche visant à la caractérisation des variables essentielles de biodiversité ?

Il est proposé d'aborder cette problématique au travers d'un calcul d'indices spectraux et de métriques obtenus à partir des données issues des deux capteurs. Pour cela, la présentation du contexte d'application de la solution de télédétection envisagée (I) sera suivie par une approche technique de sa mise en place (II). Viendra ensuite la combinaison des données et les perspectives d'évolution de cette étude (III).

I Contexte d'application de la télédétection

La solution de télédétection présentée s'inscrit dans le cadre du projet de recherche STRANGE et s'inspire des applications actuelles de télédétection dans le domaine de l'environnement et de l'agriculture.

I.1 Le projet STRANGE

I.1.1 Un projet interdisciplinaire à vocation environnementale

Le projet STRANGE est un projet de recherche novateur et interdisciplinaire à forte dimension environnementale qui a débuté en novembre 2023 pour une durée de quatre ans. Il a été retenu par l'Agence Nationale de Recherche (ANR) dans le cadre de son appel à projet 2023. Face à la nécessité de répondre à des défis environnementaux complexes, ce projet rassemble des chercheurs de différents domaines tels que l'écologie, l'étude du paysage, la géographie et les sciences sociales. Cette diversité de compétences ainsi que la collaboration et la coordination des scientifiques permettent d'avoir une approche globale des problématiques environnementales examinées.

L'objectif général du projet est d'évaluer trois services écosystémiques fournis par les écosystèmes aquatiques dans les écosystèmes agricoles adjacents suivant un gradient d'intensification de l'agriculture et d'analyser leurs impacts quant à l'intégration dans les politiques de gestion des territoires. Dans ce cadre, six sites des Zones Ateliers³ du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) seront étudiés. Plus en détail, ce projet s'articule autour de trois volets principaux ayant des objectifs spécifiques pour mieux comprendre et gérer les écosystèmes aquatiques et leurs zones riveraines⁴. Les deux premiers se concentrent sur l'étude des services écosystémiques fournis par les insectes émergents (fertilisation du sol, pollinisation, etc.) et sur la gestion des zones riveraines aux travers de leur histoire et des pratiques actuelles. Le troisième volet, qui fait le lien entre les deux premiers, vise à cartographier les EBV des cours d'eau et des plaines inondables à partir de données à haute résolution et de techniques de télédétection. C'est dans le cadre de ce dernier volet que s'inscrit le présent mémoire dans le but de proposer une première approche.

³ Les Zones Ateliers du CNRS sont des dispositifs de recherche pluridisciplinaire. Elles visent à étudier les interactions entre les sociétés humaines et les écosystèmes naturels sur le long terme.

⁴ Les zones riveraines désignent les zones de terre adjacentes aux cours d'eau, rivières, lacs ou autres étendues d'eau.

Le passage des données de télédétection aux EBV est structuré au sein de ce troisième volet. Dans un premier temps, un protocole pour homogénéiser les levés sur les différents sites doit être établi. Une fois les acquisitions réalisées, des variables dérivées seront extraites des données brutes. Ensuite, une approche exploratoire sera mise en place pour identifier des variables contributives, c'est-à-dire celles apportant le plus d'informations sur l'environnement étudié. Enfin, une sélection sera effectuée parmi ces variables en fonction de la répartition des insectes observés *in-situ*. Elles seront alors utilisées pour caractériser des EBV permettant de prédire la répartition spatiale des espèces et des services écosystémiques. De là, sera explorée la possibilité de réaliser un changement d'échelle pour extrapoler l'analyse sur de plus vastes territoires.

I.1.2 Solutions de télédétection envisagées face aux contraintes du projet

La télédétection, utilisée depuis des années pour l'observation de la Terre, semble être le moyen le plus efficace pour étudier les éléments du paysage influençant la dispersion des insectes émergents à différentes échelles, tels que le réseau hydrographique et les zones boisées. La durée du projet ainsi que l'étude des insectes et de la végétation présents sur les sites impliquent plusieurs contraintes. Tout d'abord, les observations doivent pouvoir être réalisées plusieurs fois au cours du projet et dans les mêmes conditions sur chaque site. Les acquisitions doivent être coordonnées avec la pose des dispositifs de collecte par les autres scientifiques afin que les données puissent être croisées, ce qui implique une flexibilité temporelle assez conséquente. De plus, la résolution spatiale doit être assez fine pour permettre l'observation de certains détails tels que la structure 3D de la végétation ou encore l'identification de certaines espèces végétales.

La solution de télédétection envisagée dans le projet STRANGE est dans un premier temps d'utiliser des drones avec divers capteurs (multispectraux et Lidar). Par la suite, si les résultats sont favorables, des sources de données de télédétection couvrant de plus vastes territoires (données satellitaires ou aéroportées) pourront être mobilisées pour effectuer un changement d'échelle. La combinaison de ces deux types de capteurs a pour objectif la réalisation d'une caractérisation exhaustive et objective de l'environnement de chaque site.

I.2 Etat de l'art de la télédétection dans des domaines similaires

I.2.1 Applications en sciences de l'environnement

La télédétection est un outil couramment utilisé dans le domaine de l'écologie car elle permet l'observation et l'analyse des écosystèmes à l'échelle du paysage et des

individus. Dès les années 1980 apparaissent les premières classifications paysagères obtenues à partir d'images satellitaires.

Ces dernières années, beaucoup d'études scientifiques traitent des données de télédétection obtenues par drone. L'imagerie multispectrale est, entre autres, utilisée pour la cartographie des zones humides, afin d'identifier les espèces végétales (Martínez Prentice et al., 2021) ou encore d'estimer la biomasse des marais salants (Doughty et Cavanaugh, 2019). Bon nombre d'études utilisant des données Lidar ont pour objet l'étude des forêts avec la caractérisation des essences ou encore la segmentation individuelle des arbres (Ferraz, 2012). D'une façon plus indirecte, ces capteurs sont également utilisés pour étudier la répartition de la faune comme Sweaney et al. (2021) qui étudient l'influence de la végétation (haies, forêts, etc.) sur le déplacement des papillons ou encore Gerbier et al. (2022) s'intéressant à l'impact du réseau hydrographique (fossés, ruisseaux, etc.) sur la répartition des insectes émergents. Aussi, certaines études se concentrent sur la dispersion des sources de nourriture avec, par exemple, la cartographie des espèces végétales nectarifères à l'aide d'images multispectrales (Barnsley et al., 2022). D'autres utilisent l'identification d'habitats convenables à une espèce afin de prédire sa présence ou non. La présence d'espèces d'oiseaux peut ainsi être prédite grâce à des données multispectrales satellitaires et Lidar (Koma et al., 2022).

En revanche, peu d'études combinent les données aéroportées très haute résolution des capteurs multispectraux et Lidar pour tirer profit de l'ensemble. L'étude de Koma et al. (2022), citée précédemment, propose une solution utilisant des données à la fois acquises par satellites (Sentinel-1, Sentinel-2) et par avion (Lidar), ayant toutes une résolution spatiale de 10 m. L'utilisation d'une telle résolution spatiale implique quelques limites, notamment pour les écosystèmes spatialement petits ou pour une cartographie plus fine de la végétation hétérogène (Bhatnagar et al., 2021), d'où l'intérêt d'utiliser des drones. Ces derniers, sont très utilisés pour l'agriculture dont les besoins nécessitent une résolution spatiale fine.

1.2.2 La télédétection dans les écosystèmes agricoles

Si la télédétection permet dans un premier temps d'identifier les cultures, à l'échelle de la parcelle, elle peut également apporter des informations sur l'état de la végétation et sur sa structure. L'agriculture de précision se développe et cherche à optimiser la gestion des parcelles agricoles, en tenant compte de la variabilité spatiale à l'intérieur des parcelles ou entre les parcelles (Buffet et Oger, 2000).

Les capteurs multispectraux sont principalement utilisés pour la détection de maladies, de ravageurs ou d'adventices, mais aussi pour le comptage des plants. Les capteurs multispectraux permettent de mieux suivre l'état sanitaire des cultures en permettant la détection de carence pas forcément visible à l'œil. En effet, ces capteurs sont très utilisés en agriculture de précision pour calculer des indices de végétation qui prennent la forme d'orthophotographies 2D. De nombreux indices ont été développés dans ce domaine. Quant aux capteurs Lidar, ils peuvent être utilisés en agriculture de précision pour estimer la biomasse des cultures et des prairies par exemple. Ces informations permettent notamment aux agriculteurs d'estimer le rendement. De plus, le calcul de métriques telles que la hauteur des plants ou leur volume permet par exemple de pouvoir représenter la structure 3D des arbres ou de la vigne pour étudier l'ensoleillement et le passage de la lumière au travers de la canopée afin d'améliorer l'efficacité de l'élagage (Moreno et al., 2020).

Enfin, l'utilisation de la télédétection et plus particulièrement des capteurs multispectraux et Lidar est plutôt courante en agriculture de précision. Cette technologie a su s'imposer au cours des dernières années pour l'étude des écosystèmes agricoles, ce qui conforte le choix de leur utilisation dans le cadre du projet STRANGE et de ce mémoire.

I.3 Matériel utilisé

I.3.1 Les drones

I.3.1.1 Le drone DJI Matrice 300 RTK

Dans le cadre de ce travail, les données seront acquises avec le drone DJI Matrice 300 RTK. Il s'agit d'un drone multi rotors équipé d'un module RTK (Real Time Kinematic) pour un positionnement centimétrique ainsi que d'une Unité de Mesure Inertielle (IMU)⁵ aidant au calcul de la vitesse, de la position et de l'orientation du drone. La M300RTK fonctionne avec deux batteries intelligentes TB60 de DJI. Son autonomie maximale est annoncée à 45 minutes dans les conditions optimales : charge utile de 700 g, vent faible, batteries neuves. Au total, quatre paires de batteries sont disponibles, l'autonomie réelle est plus faible qu'annoncée mais la station de charge permet de les recharger rapidement.

I.3.1.2 Le drone Trinity F90+

Le deuxième partenaire spécialisé en télédétection du projet STRANGE utilise un drone Trinity F90+ conçu par Quantum-Systems. Il s'agit d'un drone à ailes fixes avec

⁵ Une IMU est une unité composée d'accéléromètres et de gyromètres.

décollages et atterrissages verticaux. Ce drone n'est pas équipé de module RTK, mais fonctionne avec une station de référence itinérante (iBase) permettant de géoréférencer les données en PPK (Post Processing Kinematic)⁶. Le drone peut planer, réduisant sa consommation d'énergie, améliorant son autonomie (jusqu'à 90 minutes). Ce drone peut ainsi couvrir des surfaces très importantes facilement. Le Trinity F90+ est compatible avec divers capteurs hautes résolution : caméra photogrammétrique, Lidar, etc.

I.3.2 Les capteurs Lidar

I.3.2.1 Le DJI Zenmuse L1

La société DJI commercialise un capteur Lidar, le DJI Zenmuse L1, appelé par la suite simplement L1. Ce capteur est composé d'un module Lidar Livox Avia, d'une IMU de haute précision, mais également d'une caméra RVB (Rouge, Vert, Bleu) permettant la colorisation du nuage de points. Le capteur, seul, pèse près de 930 grammes. Plus précisément, la particularité de ce module Lidar est de proposer, en plus du mode de balayage répétitif, un mode de balayage non-répétitif. Le mode répétitif est à privilégier pour des applications de précision tandis que le mode non-répétitif permet d'obtenir des informations plus détaillées sur l'environnement (DJI, 2021). Le capteur L1 permet d'enregistrer jusqu'à trois échos. Plus le nombre d'échos enregistrés est important, plus il est facile d'obtenir des points au sol sous la végétation. Ainsi le capteur peut enregistrer plus de 240 000 points par seconde et jusqu'à 480 000 pts/s en 3 échos (DJI, 2021). L'exactitude⁷ du système est annoncée à 10 cm en horizontal et 5 cm en vertical.

I.3.2.2 Le Cube 240

Le Cube 240 est utilisé avec le drone F90+ ; il a été conçu par Quantum-Systems spécifiquement pour ce drone avec la coopération de YellowScan. Tout comme le L1, il est équipé du module Lidar Livox Avia, il bénéficie donc des caractéristiques évoquées ci-dessus. Le capteur est également équipé d'un système GNSS/IMU de haute précision. Le traitement des données passe par le logiciel CloudStation de YellowScan. Son exactitude est annoncée comme étant inférieure à 3 cm, et varie en fonction de la hauteur de vol.

⁶ Le PPK est également une méthode de positionnement GNSS mais, contrairement au RTK, les corrections permettant d'obtenir une précision centimétrique ne sont pas disponibles en temps réel. Un traitement supplémentaire doit être réalisé.

⁷ DJI annonce que l'exactitude a été mesurée dans un environnement de laboratoire, avec l'IMU activé, le RTK au statut Fixe, une hauteur de vol de 50 m et une vitesse de 10 m/s, avec des segments droits de la trajectoire inférieurs à 1000 m.

I.3.3 Les capteurs multispectraux

I.3.3.1 La Micasense RedEdge-P Dual

Le capteur RedEdge-P Dual de la société Micasense est un capteur multispectral composé de 2 caméras : la RedEdge-P red et la RedEdge-P Blue. Les deux caméras sont reliées par un Downwelling Light Sensor 2 (DLS 2) qui est un capteur de lumière ambiante. Cet accessoire mesure la quantité de lumière incidente provenant du soleil. Il contient également un GNSS permettant le géoréférencement des images à quelques mètres près. Le capteur RedEdge-P Dual dispose de 10 bandes multispectrales ainsi que deux bandes panchromatiques. Les bandes multispectrales de ce capteur couvrent celles des Satellites Landsat 8 et Sentinel 2, ce qui facilite la comparaison des données (Annexe 1). Les bandes panchromatiques, quant à elles, permettent d'améliorer la résolution spatiale des images : 1.99 cm/pixel au lieu de 3.85 cm/px à 60 m avec les bandes multispectrales.

Ce capteur peut être monté sur différents drones (dont la M300RTK dans le cadre du projet STRANGE). Ainsi, le système de montage et les paramétrages doivent être adaptés en conséquence. La solution complète (caméras, DLS 2, câbles, etc.) pèse environ 715 g Le capteur est également vendu avec un Panneau de Réflectance Calibré (CRP) permettant de corriger la réflectance afin de la rendre moins sensible aux conditions d'ensoleillement.

I.3.3.2 La Micasense RedEdge-MX dual

La caméra multispectrale Micasense RedEdge-MX dual, utilisée avec le Trinity F90+, était produite par Micasense avant la caméra RedEdge-P Dual. La principale différence entre ces deux caméras provient du fait que la RedEdge-MX ne dispose pas de bandes panchromatiques. Les principales différences entre ces deux capteurs sont présentés en Annexe 1.

I.3.4 La nacelle double de la Matrice 300 RTK

Une nacelle double peut être installée sur le drone M300RTK, celle-ci lui permet d'embarquer deux capteurs à la place d'un. En parallèle de ce travail, son utilisation est envisagée au travers de la combinaison des acquisitions multispectrales (RedEdge-P Dual) et photogrammétriques RVB très haute résolution (DJI Zenmuse P1).

La qualité des données obtenues avec le matériel présenté ne dépend pas uniquement des caractéristiques techniques mentionnées. Afin d'avoir des données utilisables pour répondre à la problématique de ce travail, la mise en place des solutions d'acquisition et de traitement des données doit être minutieusement étudiée.

II Mise en place des solutions d'acquisition et de traitement

Les protocoles d'acquisition et de traitement ont été pensés en tenant compte de la configuration des sites, de différentes contraintes et des objectifs du projet. Ceux développés ci-dessous ne concernent que le drone DJI Matrice 300 RTK avec les capteurs DJI Zenmuse L1 et Micasense RedEdge-P Dual, qui devait à l'origine être le seul dispositif d'acquisition utilisé dans le cadre de ce travail.

II.1 Présentation des sites et des principales contraintes

Les protocoles d'acquisition réalisés seront appliqués sur deux des sites du projet STRANGE (sites de la Zone Atelier Loire). En effet, lors de l'élaboration du projet, les sites ont été répartis entre les deux partenaires du consortium scientifique équipés de drones, afin de garantir la réalisation des acquisitions dans le temps imparti. Un échange sur les protocoles d'acquisition des données entre les deux équipes a été réalisé afin de garantir l'uniformité de celles-ci. L'ensemble des sites concernés présente certains points communs comme la présence d'un cours d'eau, d'espaces boisés, de haies, de prairies et de cultures (Figure 1). Leur superficie est également similaire. En revanche, le site du Louroux présente un relief assez faible tandis que celui du site de la Cisse est assez significatif avec une différence d'altitude d'environ 20 m entre les points hauts et bas. Par la suite, le mémoire se concentrera sur ce dernier site.

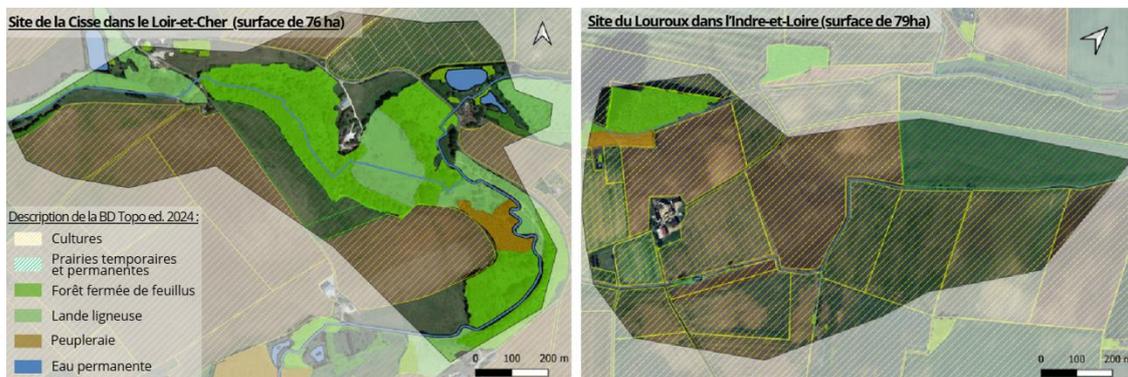


Figure 1 : Présentation des sites d'étude de la Cisse et du Louroux (BD Topo de l'IGN 2024, RPG 2022 - ASP)

Pour finir, la principale contrainte de ces sites est la taille de leur emprise car, même si elle a été réduite⁸, elle est encore supérieure à 76 ha, ce qui implique d'office l'utilisation d'une hauteur ou d'une vitesse de vol assez élevée afin de réduire le temps de vol, celui-ci étant limité par l'autonomie des batteries et la météo. En pratique, l'autonomie réelle d'une

⁸ Les emprises initiales des sites étaient d'environ 100 ha, elles ont été réduites afin de faciliter les vols drone.

paire de batteries du drone M300RTK de DJI utilisé est d'environ 25 minutes et 4 paires de batteries sont disponibles. Il n'est possible de recharger qu'une seule paire de batteries sur site. De plus, le facteur humain, telle que la concentration du télépilote qui diminue au cours du temps, peut conduire à prendre des risques sur une trop longue durée de vol. Enfin, la météo doit être stable afin d'obtenir des données de qualité. Cette condition est particulièrement importante dans le cas des mesures multispectrales où les conditions d'ensoleillement ne doivent pas changer du début à la fin du vol : aucune trouée dans le ciel nuageux ne doit avoir lieu ; aucun nuage ne doit survoler le site dans un ciel bleu.

La limite du temps de vol peut se traduire par une dégradation de la qualité des données. La réalisation de tests de sensibilité est alors nécessaire.

II.2 Préparation de l'acquisition des données Lidar

II.2.1 Tests de sensibilité

Afin de garantir la fiabilité des résultats issus des acquisitions Lidar, des tests de sensibilité sont réalisés sur un site test, plus facilement accessible, situé sur la commune de Fay (72). L'objectif est de faire varier les différents paramètres de vol du drone M300RTK et les différents modes d'acquisition du capteur L1, mais aussi de tester différentes méthodes de géoréférencement, afin d'identifier le meilleur compromis entre le temps d'acquisition et la qualité des données. Le site présente des éléments paysagers similaires à ceux des sites du projet STRANGE (haies, des arbres isolés, des ruisseaux, une mare, un bois, un champ de culture, etc.). En revanche, afin de faciliter les tests et les comparaisons, l'emprise du site est beaucoup plus petite : environ 5,5 ha.

II.2.1.1 Paramètres de vols et d'acquisitions

Pour l'ensemble des vols, le plan de vol reprend exactement la même emprise (dans laquelle 9 cibles sont réparties pour le géoréférencement) bien qu'il varie légèrement en fonction des paramètres utilisés (notamment en raison de la hauteur). Pour chaque acquisition, on fait varier un unique paramètre.

La Figure 2 présente le graphique utilisé pour la planification des vols réalisés à l'occasion des tests de sensibilité. Afin de minimiser le nombre de vols avec le drone, certains scénarios ont été exclus en raison de leur durée, trop longue pour les sites d'études. Par conséquent, sur la base de 4 hauteurs de vol différentes comprises entre 50 m et 100 m, suivant les recommandations de DJI (DJI, 2021), 3 vitesses de vols, 2 modes de balayage ainsi que 2 variantes du nombre d'échos enregistrés sont testés.

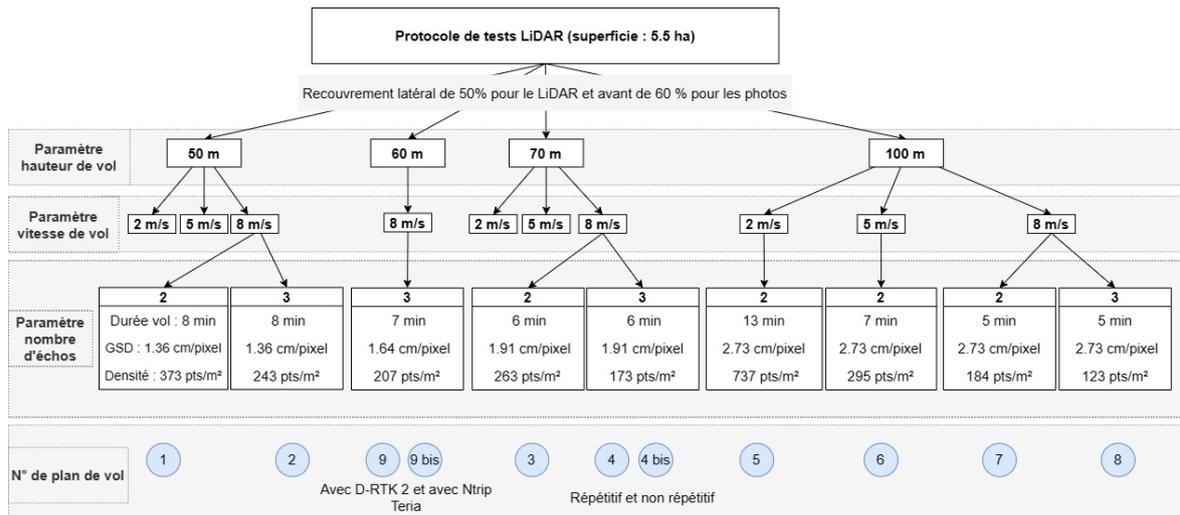


Figure 2 : Graphique synthétisant les vols réalisés pour les tests de sensibilité du capteur DJI Zenmuse L1

Une fois les acquisitions réalisées et les données traitées avec les mêmes paramètres sur DJI Terra (v4.0.1), différentes comparaisons sont réalisées afin de mettre en évidence l'influence des paramètres testés. Pour chacune des comparaisons, l'attention est portée sur le temps de vol, la densité de points, l'apparence des coupes ainsi que le poids du nuage puisque celui-ci doit pouvoir être stocké et partagé dans le cadre du projet STRANGE.

1. Influence de la hauteur de vol

Ce paramètre peut être étudié en comparant les données des vols n°2, n°4, n°8 et n°9. La vitesse de vol est alors constante à 8 m/s, le mode d'acquisition est répétitif et le nombre d'échos enregistrés est fixé à 3 pour chaque vol.

Pour le site test, d'une surface de 5.5 ha, les temps d'acquisition varient entre 5 minutes (hauteur de vol : 100 m) et 8 minutes (hauteur de vol : 50 m). Pour une surface de 76 ha correspondant à l'emprise du site de la Cisse, les temps de vols prévisionnels sont bien plus longs et les écarts sont alors plus importants : 1h09 pour une hauteur de vol de 100 m, 1h22 pour 70 m, 1h36 pour 60 m et 1h50 pour 50 m. À cette estimation doit être ajouté le temps nécessaire au drone pour faire les allers et retours lors des changements de batteries.

La densité du nuage de points peut fortement influencer les résultats. En effet, une densité trop faible indique un nombre d'information réduit, notamment lorsque la végétation est dense où peu de points appartenant au sol sont enregistrés. À l'inverse, une densité trop élevée implique un nuage très lourd et des complications de traitement ainsi que de stockage et de partage par la suite. Le logiciel QGIS a été utilisé pour réaliser ces comparaisons en distinguant deux types de milieux : les prairies et les zones de végétation arborée comme le montre la Figure 3. La hauteur de vol influence plus fortement la densité de points dans les

zones de végétation arborée (facteur 6.5 – Tableau 1) que dans les prairies (facteur 1.5 – Tableau 1). La différence de densité diminue très fortement dans les zones de végétation arborée entre 70 m et 100 m.

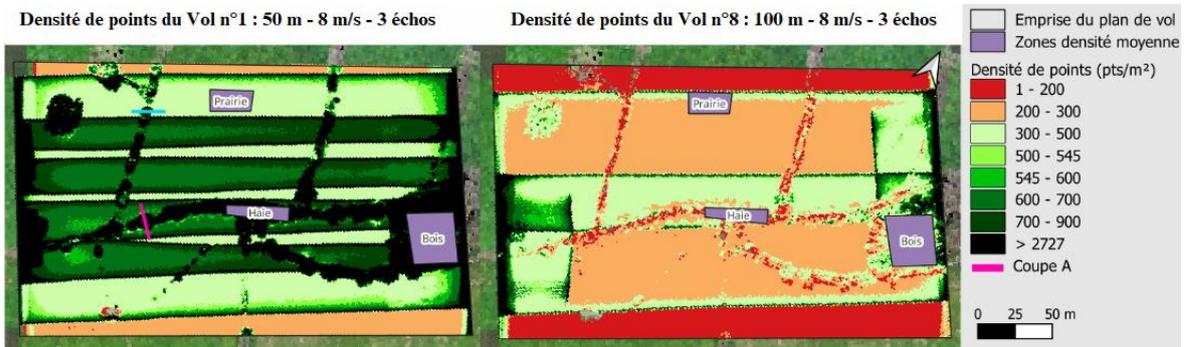


Figure 3 : Densité moyenne des nuages de points Lidar correspondant aux hauteurs de vol 50 et 100 m sur le site test de Fay.

La densité de points est assez variable sur le site, notamment en mode répétitif, c'est pourquoi une comparaison visuelle de coupes est intéressante. Une première analyse des coupes dont la largeur est fixée à 20 cm, notamment dans les haies, permet de se rendre compte de l'influence du paramètre étudié sur la structure 3D saisie par le capteur (Figure 4). L'emplacement de la coupe est désigné sur la Figure 3.

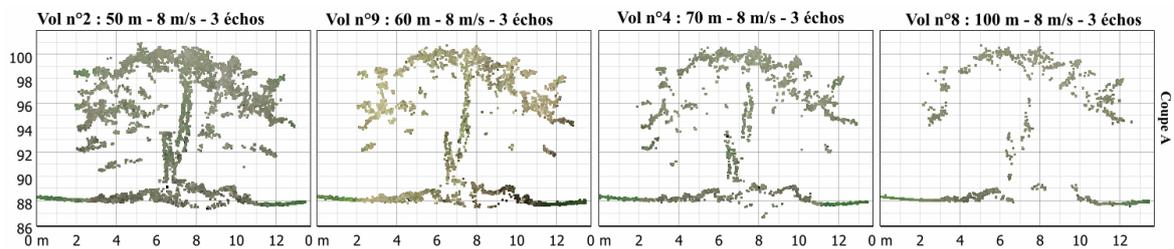


Figure 4 : Comparaison d'une coupe dans les nuages de points pour les différentes hauteurs de vol sur le site test de Fay.

Le poids des fichiers de points pour la zone de tests varie entre 0.7 Go (h : 100 m) et 2.5 Go (h : 50 m). Pour un site de la taille des terrains d'études le poids devrait donc être compris entre 9 Go et 34 Go. En revanche, le poids d'un fichier de points peut être allégé grâce à une compression (de 2.5 Go à 0.7 Go, au format *.copc.laz*⁹, par exemple, pour le nuage de points du vol test n°2) ou après un sous-échantillonnage des données.

En résumé, choisir une hauteur de vol entre 60 m et 70 m par rapport à la zone d'intérêt semble être la meilleure option.

⁹ COPC est un format de fichier de nuage de points optimisé pour le Cloud, il facilite le partage et l'accès aux données (Hobu, Inc., 2021).

2. Influence de la vitesse de vol

L'influence de la vitesse de vol du drone sur la qualité des données peut être étudiée en comparant les vols n°5, n°6 et n°7 en fixant la hauteur de vol à 100 m, un mode d'acquisition répétitif et un nombre d'échos enregistrés égal à 2. Le temps de vol varie de façon plus prononcée que précédemment. On l'estime pour le site de la Cisse à 2h45 pour une vitesse de vol de 2 m/s, à 1h36 pour 5 m/s et à 1h22 pour 8 m/s.

Concernant la densité de points, celle-ci est très importante à 2 m/s (environ 3000 pts/m²) et plutôt faible à 8 m/s (environ 300 pts/m²). Plus la vitesse du drone augmente, plus la densité de points est faible. Avec une hauteur de vol plus faible, la densité serait plus importante mais la même variation serait observable entre les vols réalisés à différentes vitesses. La coupe présentée dans la Figure 5, illustre bien les différences de densité. A noter que ces coupes ont été réalisées avec des vols où seuls 2 échos ont été enregistrés, ce qui explique pourquoi la structure 3D de la végétation n'est pas très bien représentée, même avec une vitesse de vol très faible. Les coupes sont réalisées avec une largeur de 20 cm.

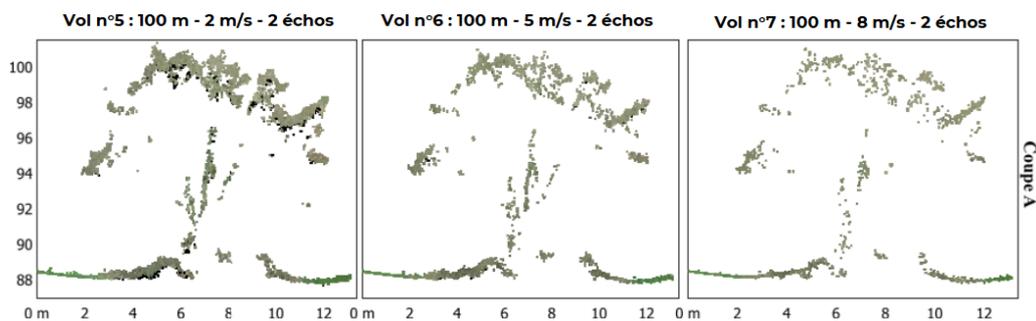


Figure 5 : Comparaison de coupes dans les nuages de points pour les différentes vitesses de vol sur le site test de Fay.

Pour finir, le poids des fichiers s'annonce être très important pour une vitesse de vol de 2 m/s (environ 70 Go) par rapport à une vitesse de 8 m/s (environ 13 Go) pour une zone de 76 ha. Comme vu précédemment, le poids du fichier, même s'il peut être réduit avec des traitements spécifiques, augmente également lorsque la hauteur de vol diminue.

Ces observations montrent qu'un vol à 70 m à 2 m/s ou même à 5 m/s est impossible car le temps de vol ainsi que le poids du nuage seraient trop importants. Ainsi, choisir une vitesse de vol de 8 m/s est un compromis inévitable.

3. Influence du mode de balayage

Les vols n°4 et n°4bis permettent de comparer les modes de balayage répétitif et non répétitif. Le choix de ce paramètre n'influence guère le poids du nuage et le temps d'acquisition. En revanche, le mode non répétitif permet d'avoir une densité de points plus

homogène sur la zone (moins d'impact lié au recouvrement des bandes), de même pour l'intensité lumineuse qui est ainsi mieux représentative des surfaces (Figure 6). Ce mode de balayage est présenté par DJI (DJI, 2022) comme étant « moins précis » mais permettant une meilleure pénétration dans la végétation. Dans le cadre du projet, ces avantages sont très intéressants pour les analyses. En définitive, le mode d'acquisition non-répétitif sera retenu.

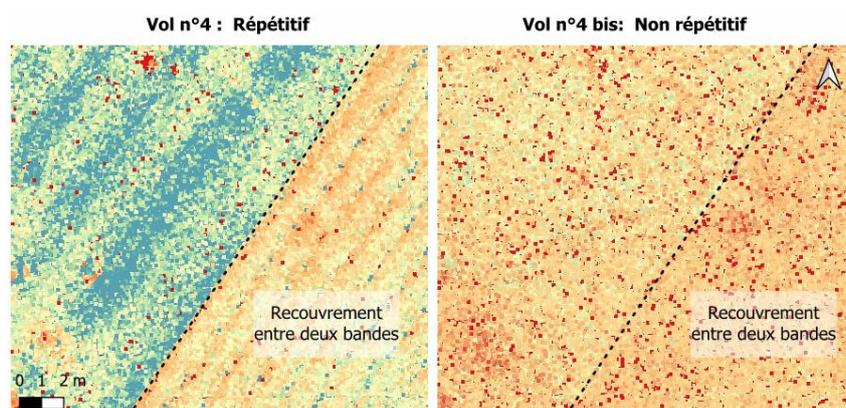


Figure 6 : Comparaison de l'intensité en fonction du mode de balayage choisi sur une surface en herbe homogène

4. Influence du nombre de retours enregistrés

Le capteur L1 peut enregistrer un, deux ou trois échos. L'enregistrement de 3 échos différents réduit la fréquence d'échantillonnage, concrètement ce ne sont pas les mêmes informations qui sont enregistrées. Les tests de sensibilités montrent que ce paramètre n'influence pas le temps d'acquisition et très peu le poids du fichier. En revanche il impacte la densité de points, notamment dans les zones de végétation arborée comme le montre le Tableau 1.

	<u>Type de milieu</u>	<u>Hauteur de vol</u>			
		50 m	60 m	70 m	100 m
Densité de points pour 2 échos enregistrés	Prairies	655		480	281
	Haies et bois	2363		692	310
Densité de points pour 3 échos enregistrés	Prairies	448	387	391	304
	Haies et bois	2092	1264	1131	316

Tableau 1 : Comparaison de la densité de points en fonction du type de milieu, du nombre d'échos enregistrés et de la hauteur de vol

Les acquisitions sur le terrain test ont eu lieu en février alors que les arbres n'avaient pas de feuilles, or les acquisitions sur les sites d'études ont lieu plus tard dans la saison lorsque les arbres sont en feuilles. Le triple écho permet une meilleure pénétration de la végétation, plus pertinent lorsque le feuillage est présent. Ainsi, en raison de la configuration des sites d'étude, avec nombre de bosquets et de haies, trois échos seront enregistrés.

II.2.1.2 Méthode de géoréférencement

Le drone M300RTK peut donc travailler en RTK ou en NRTK (Network Real Time Kinematic) si on travaille avec Teria ou Centipède par exemple. La précision (1σ) du géoréférencement serait alors de l'ordre de 2 à 5 cm (Legros et al., 2013). Cette méthode de géoréférencement nécessite une connexion internet stable afin de bien recevoir les corrections, cependant il n'est pas rare de perdre la connexion RTK en cours de vol. Pour rendre la réception des corrections plus fiable, la base DJI D-RTK2 peut être installée sur un point connu en coordonnées, et utilisée comme pivot. La transmission des corrections passe alors par la radio et la connexion internet n'est plus nécessaire, la précision reste la même. De même, si le point n'est pas connu en coordonnées au moment de l'installation du pivot, il est possible d'utiliser la méthode PPK. Aucun contrôle direct de la qualité du géoréférencement n'est possible avec ces trois méthodes.

L'utilisation de points au sol mesurés au NRTK moyenné (durant 30 secondes), permet de contrôler la qualité du géoréférencement en altimétrie, mais peut également être utilisé pour l'améliorer en réalisant, après reconstruction, un recalage altimétrique du nuage. Lors des tests, 9 repères ont été répartis sur le terrain, tous mesurés au NRTK moyenné. Afin de montrer leur apport, deux nuages ont été comparés : l'un avec recalage altimétrique et l'autre sans. Tout d'abord, le nuage de points issu de la reconstruction sans recalage altimétrique présente des écarts importants entre l'altitude reconstruite et l'altitude théorique de certains repères (10 cm pour le repère C4). Le vol sans recalage altimétrique présente des écarts inférieurs à 5 cm sur l'ensemble de ces repères. Ensuite, la comparaison des deux nuages avec le plugin *M3C2 distance* de CloudCompare (Lague et al., 2013) permet de visualiser la répartition des écarts à l'échelle du site (Figure 7).

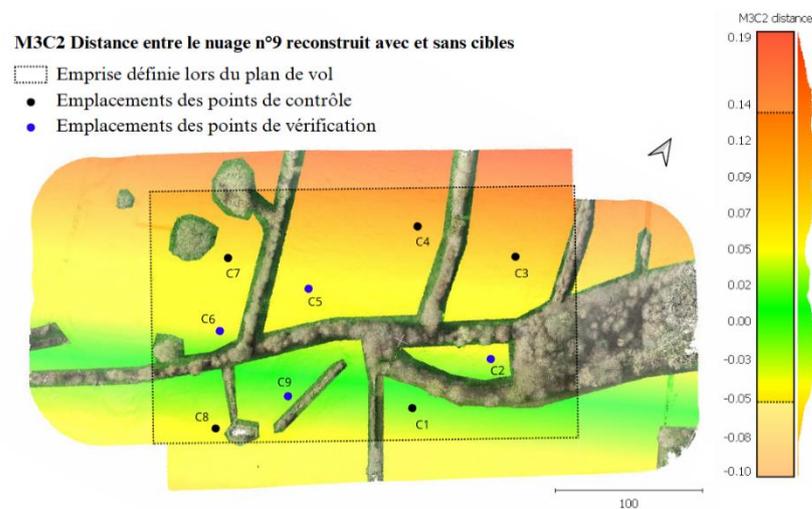


Figure 7 : Comparaison d'un nuage reconstruit avec et sans recalage altimétrique

En excluant la végétation du calcul, seulement 18% d'écarts sont compris entre 0 et 2 cm et 24 % d'écarts entre 2 et 5 cm contre 27 % d'écarts entre 5 et 10 cm et 31% d'écarts supérieurs à 10 cm. Les écarts les plus importants, de l'ordre de 15 – 20 cm sont situés au Nord, hors de l'emprise du plan de vol ; il s'agit des points acquis à la fin du vol.

En revanche, il est plus difficile d'évaluer ou d'améliorer la qualité planimétrique d'un nuage de points Lidar en raison de la détermination du centre des repères au sol. Comme le montre la Figure 8, plus la hauteur de vol est importante moins le repère semble être au centre de la cible. Cela représente un écart d'environ 6 cm pour une hauteur de vol de 50 m et de 20 cm à 100 m.

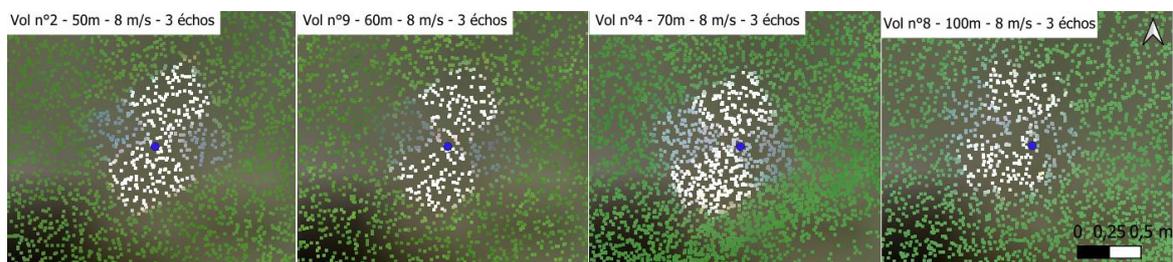


Figure 8 : Représentation des cibles sur le nuage colorisé avec l'information RVB

Toutefois, cette observation peut être liée simplement à une erreur de colorisation du nuage sur DJI Terra. En effet, Štroner et al. (2021) confirme cette hypothèse en utilisant des cibles hautement réfléchissantes permettant la comparaison des informations RVB et d'intensité : « *les informations de couleurs sont systématiquement biaisées* » et les écarts augmentent avec la hauteur de vol. Pour une étude nécessitant obligatoirement un contrôle planimétrique, l'utilisation d'une peinture ou d'un papier hautement réfléchissant s'avérerait nécessaire.

En résumé, l'utilisation d'une base GNSS sur un point connu précisément en coordonnées, depuis laquelle le drone peut recevoir en temps réel les observations GNSS par radio, avec en complément la pose de cibles bien réparties sur le terrain est la solution à retenir. Ainsi le protocole de géoréférencement pourra être adapté facilement aux sites du projet situés en « zone blanche ». L'ensemble des paramètres sélectionnés seront résumés en Annexe 2, définissant le protocole à suivre sur l'ensemble des sites du projet STRANGE.

II.2.2 Protocole de traitement des données Lidar

II.2.2.1 Reconstruction des nuages de points

Lors de l'import des données sur le logiciel DJI Terra (v4.0.1), plusieurs dossiers peuvent être sélectionnés. Ainsi, si un vol a été réalisé en plusieurs fois en raison de

changements de batteries, il est possible de rassembler les données afin de générer un seul nuage de points. Par la suite, les coordonnées du pivot doivent être saisies. Le nuage est directement géoréférencé grâce aux informations de la mission. Ce logiciel propose une option d'*optimisation de la précision du nuage de points* et une option *nuage de points lisse*, qui permettent d'améliorer sa précision globale et de réduire le bruit. J'ai fait le choix d'utiliser ces deux options ainsi que la classification du sol qui permet de distinguer les points du nuage selon s'ils appartiennent au sol ou au sursol. Comme évoqué précédemment, pour le recalage altimétrique, DJI Terra permet l'import de repères. Seule l'information d'altitude est concernée par cette opération. Le logiciel distingue les points de contrôle, appelés GCP (Ground Control Point), et les points de vérification. Les GCP sont utilisés pour réaliser l'ajustement altimétrique tandis que les points de vérification sont utilisés pour estimer l'exactitude altimétrique. A la fin du traitement sur DJI Terra, un nuage de points au format *.las* est exporté.

II.2.2.2 Classification du nuage de points

La classification du nuage de points Lidar est importante pour la suite des traitements. La classification des points appartenant au sol peut être réalisée avec différents outils. DJI Terra propose depuis juin 2023 (v.3.7.0) la classification du sol lors de la reconstruction du nuage. Mais d'autres logiciels peuvent également être utilisés. L'étape de classification du sol / sursol n'est pas évidente ; quel que soit le logiciel utilisé, différents paramètres sont à déterminer. Leur valeur varie en fonction de la densité de points, du relief, de la végétation, etc. La classification nécessite généralement plusieurs reprises avec à chaque fois un contrôle voire une correction manuelle du résultat obtenu. Dans leur étude, Resop et al. (2019) montrent que les erreurs de classification sont fortement liées à un manque de données dans les chenaux des cours d'eau ou sous le couvert forestier. Ce phénomène est également observable dans les classifications réalisées par DJI Terra sur le site test. D'autres logiciels ont été expérimentés, afin de proposer dans le protocole de traitement la solution la plus efficace. Finalement, après de nombreux tests de classification du sol, l'approche la plus efficace est de réaliser la première classification proposée par DJI Terra et de contrôler le résultat à l'aide de coupes dans le nuage de points (sur QGIS par exemple). Ensuite, seulement si c'est nécessaire, il conviendra d'utiliser le logiciel TerraScan, plus complet mais plus complexe, pour l'améliorer. La manipulation des nuages de points de taille importante est fastidieuse. Dans un second temps, la classification automatique du sursol peut être réalisée avec RealWorks ou Cyclone 3DR. Celle-ci permet de classer la végétation, les

bâtiments et les lignes électriques. Toutefois, étant donné que les sites étudiés présentent peu d'éléments de ce type, une classification manuelle, sur Metashape par exemple, est plus efficace même si moins automatisée. Cette étape permet d'améliorer la qualité des produits Lidar obtenus, en permettant, par exemple, le retrait des classes bâtiments et lignes électriques pour les calculs s'intéressant à la végétation.

II.3 Préparation de l'acquisition des données multispectrales

Pour la préparation des acquisitions multispectrales, assurer le fonctionnement optimal du capteur multispectral, qui sort d'usine, est nécessaire.

II.3.1 Intégration du capteur à la solution d'acquisition

II.3.1.1 Installation sur la Matrice 300 RTK

Le capteur proposé par Micasense peut être intégré à différentes plateformes d'acquisition. Il n'a pas été créé pour fonctionner spécifiquement avec la M300RTK mais il est fourni avec un système de fixation compatible. Micasense fournit en ligne un guide d'intégration (Micasense, 2021) condensé permettant à l'utilisateur d'installer correctement le capteur sur différents drones DJI. Le montage de la Figure 9 doit être réalisé.



Figure 9 : Montage du capteur Micasense RedEdge-P Dual et du DLS 2 sur le drone DJI Matrice 300 RTK (Micasense)

Dans le cas d'une caméra Dual, le montage ne s'effectue malheureusement pas avec un Skyport (comme pour le capteur L1 ou une caméra RedEdge-P simple), mais avec un Quick Mount. Si les deux systèmes se ressemblent, pour le Quick Mount aucune information n'est transmise du drone au capteur, il sert uniquement de fixation et d'alimentation.

II.3.1.2 Configuration du capteur

Bien que le capteur sorte d'usine, il est nécessaire de mettre à jour les micrologiciels des deux caméras et de vérifier le bon fonctionnement du système. Une reconfiguration de la caméra bleue a aussi dû être effectuée afin que l'ensemble des composants du système soient reconnus lors du démarrage du drone. Enfin, le magnétomètre du DLS 2 a

régulièrement besoin d'être calibré, en suivant une procédure consistant à faire tourner le drone sur lui-même autour de 6 axes. Le système peut ensuite être utilisé pour les acquisitions multispectrales.

II.3.2 Test du capteur

II.3.2.1 Paramètres de vols et d'acquisitions

Le capteur multispectral a été testé sur le site test de Fay, afin de vérifier son bon fonctionnement et d'établir le protocole d'acquisition. Trois modes d'acquisitions distincts sont disponibles. Le premier est le mode *External Trigger* qui permet au capteur de débiter et arrêter ses acquisitions automatiquement en fonction du plan de vol, cette solution est la plus intéressante pour un levé photogrammétrique, mais elle ne fonctionne pas avec un Quick Mount (un Skyport est nécessaire). Le mode d'acquisition peut également être réglé sur *Timer* où le temps entre chaque photographie est défini ou sur *Overlap* pour lequel c'est le recouvrement longitudinal qui est renseigné. Ce dernier mode d'acquisition s'est avéré être le plus convaincant, tout en garantissant le recouvrement souhaité, il permet de limiter le nombre de photographies. Les acquisitions de test ont été réalisées avec le mode *Overlap*, à une hauteur de vol de 50 m puis de 80 m, pour une vitesse de 8 et 12 m/s avec un recouvrement de 75% (longitudinal et latéral). Une photographie du CRP a été réalisée avant et après chaque vol. La comparaison des scénarios cible la qualité des images obtenues (estimée depuis Metashape) et le temps d'acquisition. A 8 m/s comme à 12 m/s, toutes les photographies (hors virages) ont un indice de qualité supérieur à 0.5 (seuil recommandé par Metashape). Finalement, le principal critère pour le choix des paramètres de vol est la taille pixel sol attendue (8-10 cm/px) et dépend donc uniquement de la hauteur de vol choisie. Les paramètres suivants ont été retenus : hauteur de vol 100 m, vitesse de vol 12 m/s et recouvrement de 75%. L'utilisation d'une vitesse importante permet d'économiser les batteries pour l'acquisition Lidar.

II.3.2.2 Méthode de géoréférencement

Le géoréférencement des données multispectrales ne peut pas être réalisé avec les données RTK du drone en raison du Quick Mount. Toutefois les données sont géotaguées par le DLS-2 qui mesure la position du capteur grâce aux données GNSS, dont la précision attendue est de l'ordre de 2 à 10 m. Ainsi, pour améliorer la précision de ce géoréférencement, des cibles mesurées au NRTK moyenné sont utilisées.

II.3.2.3 Contrôle des données

Les acquisitions durant les tests ont mis en évidence un défaut de la caméra RedEdge-P Blue. Lors du traitement des données, j'ai constaté que les métadonnées renseignées pour chaque bande, telle que la longueur d'onde, étaient erronées. Le support technique de Micasense m'ayant confirmé que ces erreurs étaient liées à une mauvaise configuration d'usine, la caméra a été renvoyée en Service Après-Vente (SAV). Cette expérience montre que le matériel doit toujours être contrôlé avant utilisation, même s'il est neuf.

II.3.3 Protocole de traitement des données multispectrales

La procédure de création des produits photogrammétriques avec les images multispectrales est similaire à la procédure habituelle des traitements photogrammétriques. Celle-ci peut être réalisée sur le logiciel Metashape, dont les étapes de calculs propres aux données multispectrales suivent les recommandations de Micasense (Agisoft, 2024). Les étapes propres à ce type de données ont lieu à l'import et à l'export des données. Dans un premier temps, les images du CRP sont automatiquement détectées lors de l'import et si ce n'est pas le cas, il faut les classer à part et appliquer un masque sur celui-ci, puis l'outil *Calibrer la réflectance* permet de corriger la réflectance des images à l'aide des valeurs de référence du panneau et des mesures du DLS 2. Après avoir réalisé les étapes habituelles de traitement (alignement des images, pointage des cibles, création de l'orthomosaïque, etc.), l'outil *Définir la transformation raster* permet de calculer des indices spectraux et de les visualiser, ou bien de normaliser la réflectance entre 0 et 1 pour faciliter l'interprétation de l'orthoimage. Lors de l'export de l'orthoimage, l'option *Transformation Raster* permet de choisir ce que l'on souhaite exporter. Le protocole de traitement, synthétisé en Annexe 2, décrit les différentes étapes à suivre.

II.4 Réalisation des acquisitions sur les sites d'études

Les premières acquisitions sur les sites d'études concernaient le site de la Cisse. En raison d'un incident technique (chute du drone), les acquisitions n'ont pas été terminées mais les données d'une zone réduite ont pu être utilisées pour illustrer ce mémoire. Plus tard, Thomas Houet (directeur de recherche au CNRS) est intervenu sur ces sites avec son matériel (Trinity F90+, Cube 240, RedEdge-MX Dual) afin d'obtenir des acquisitions complètes dans le cadre du projet STRANGE. Cette opportunité me permet de compléter ce mémoire avec une rapide comparaison des données pour valider l'homogénéité des données pour les acquisitions futures.

II.4.1 Acquisitions avec la Matrice 300 RTK et les capteurs L1 et RedEdge-P dual

Les acquisitions sur le site de la Cisse se sont déroulées le 15 avril 2024. La caméra bleue du capteur n'étant pas revenue de réparation, seule la caméra rouge a été utilisée.

Pour commencer, 11 cibles ont été réparties (Figure 10) puis mesurées au NRTK moyenné. La base DRTK-2 a été installée sur un point mesuré au NRTK moyenné, puis utilisée comme pivot. Les plans de vols avaient été réalisés au préalable avec les paramètres résultants des tests de sensibilité, puis contrôlés sur place. Le point de décollage a été défini sur un point haut, le plus au centre possible et avec une vue bien dégagée sur l'emprise du vol. Le temps de vol pour chaque acquisition était en moyenne d'une heure et demie. On a choisi le moment où les prévisions annonçaient une météo la plus stable pour l'acquisition multispectrale, soit vers midi lorsque le soleil était au zénith et que le ciel était homogènement nuageux. Le vol Lidar a été réalisé le matin.

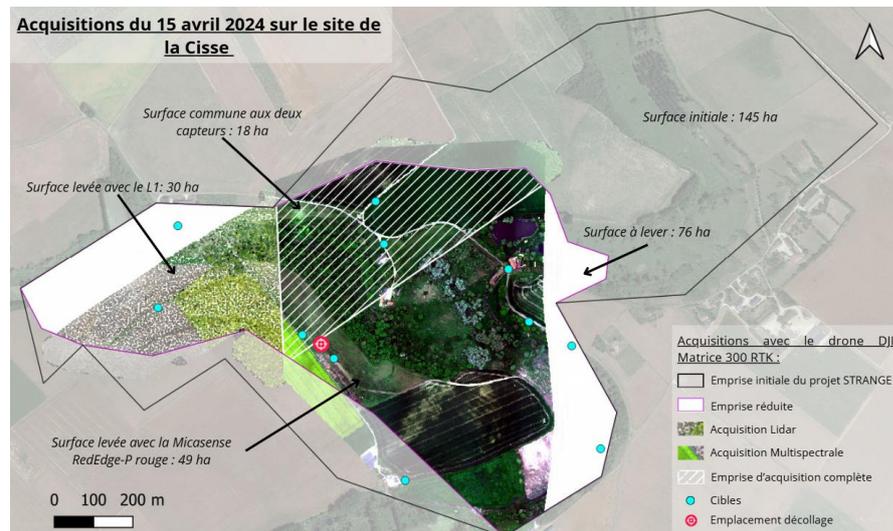


Figure 10 : Zones d'acquisition sur le site de la Cisse du 15 avril 2024 avec le drone DJI Matrice 300 RTK.

C'est au cours de l'acquisition multispectrale, en raison d'une grosse rafale de vent, que le drone n'a pas réussi à rejoindre son point d'atterrissage lors du changement de batterie et a chuté. Cet incident a clôturé la journée d'acquisitions. Les données acquises ont été traitées, contrôlées et utilisées par la suite (le temps d'obtenir les données d'une acquisition complète).

II.4.2 Acquisitions avec le Trinity f90+ et les capteurs Cube 240 et RedEdge-MX Dual

Les acquisitions Lidar et multispectrales ont eu lieu dans la journée du 24 avril 2024, sur le site d'étude de la Cisse et sur le site du Louroux. Malgré un petit contretemps (fils à ressouder sur le drone), les acquisitions ont pu se dérouler sans difficultés. Les conditions

météo étaient plus favorables : le vent était faible et le ciel était très nuageux, sans percées du soleil.

Des cibles ont été installées aux extrémités des sites puis mesurées au NRTK moyenné. Contrairement à la M300RTK, le drone Trinity F90+ n'utilise pas le RTK, la trajectoire est géoréférencée en PPK lors des traitements, avec les données de la station du RGP (Réseau GNSS Permanent) la plus proche. Le protocole d'acquisition a été adapté aux contraintes de temps et aux paramètres estimés à la suite de tests de sensibilité réalisés par Thibaut Peres (ingénieur d'étude au CNRS). Les acquisitions ont été réalisées avec une hauteur de vol de 100 m pour le Lidar et de 120 m pour la caméra multispectrale avec une vitesse similaire d'environ 10 m/s. Ces paramètres de vols, ont permis de réaliser les acquisitions sur les deux sites en une journée.

Les données acquises ont été traitées puis comparées aux données obtenues lors du premier vol avec la M300RTK.

II.4.3 Contrôle des résultats et comparaison des données

Le contrôle des données Lidar passe dans un premier temps par l'observation du nuage reconstruit et notamment de la classification sol / sursol effectuée. Sur le site de la Cisse, aucun faisceau n'a pu traverser le colza (couverture très dense) et atteindre le sol, le logiciel a donc considéré la couche supérieure du colza comme du sol. Cette zone devra être exclue des calculs suivants afin de ne pas fausser les analyses. Cette observation concerne aussi bien le nuage obtenu avec le L1 que le nuage obtenu avec le Cube240.

L'acquisition d'une zone commune n'était initialement pas prévue dans le cadre du projet. Les données acquises par les deux systèmes sur le site de la Cisse permettent de comparer les informations obtenues avec chaque protocole. Les faisceaux du Lidar Cube240 ont eu plus de mal à traverser la végétation, ce qui conduit à une moins bonne représentation des couches inférieures de la végétation et du sol. Le MNT (Modèle Numérique de Terrain) résultant, généré avec une taille pixel de 5 cm, s'en trouve fortement impacté (Figure 11).

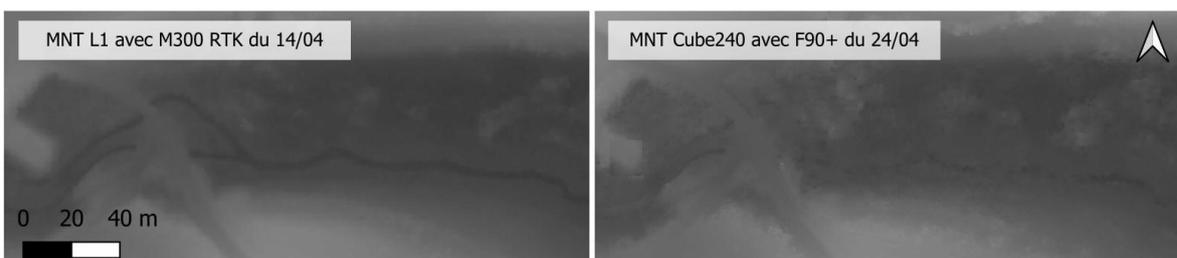


Figure 11 : Influence des protocoles d'acquisitions établis pour le Lidar Cube240 et le L1 avec l'aspect du cours d'eau sur les MNT créés à partir des nuages de points

La structure de la végétation et le sol sont moins bien représentés par le nuage obtenu avec le Cube240, en raison de la dégradation des paramètres de vol choisis pour remédier à la contrainte de temps. Cependant, faute de données sur le site complet avec le L1, ce nuage sera tout de même utilisé pour la suite du projet STRANGE.

Pour les données multispectrales, même si sur le terrain le ciel est nuageux, des percées du soleil peuvent avoir lieu ; un contrôle visuel de l'orthoimage permet de détecter d'éventuelles anomalies. Une zone anormalement éclairée apparaît sur l'orthoimage obtenue lors de la première journée d'acquisition avec la M300RTK, ce qui n'est pas le cas sur celle obtenue lors de la deuxième journée d'acquisitions qui était bien plus nuageuse (Figure 12).

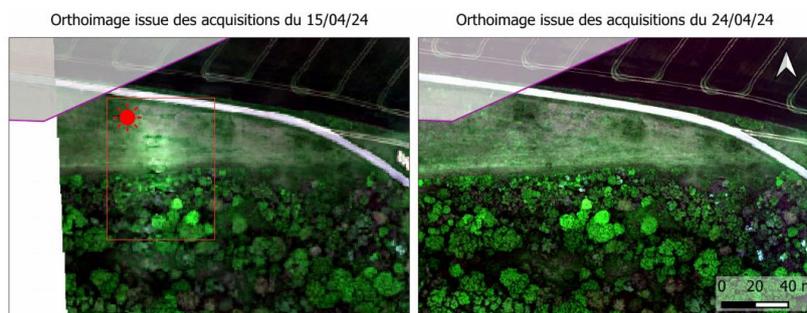


Figure 12 : Anomalie détectée sur l'orthoimage de l'acquisition multispectrale du 15/04/2024 en raison des conditions d'ensoleillement

L'utilisation du DLS2 et du CRP n'est pas toujours suffisante, ce type de contrôle permet d'identifier les anomalies avant de procéder aux analyses ultérieures qui en seront impactées. Par la suite, la signature spectrale des principaux éléments de la scène peut être affichée afin de vérifier qu'il n'y ait pas d'aberrations. A cette étape, aucune anomalie n'est détectée sur les deux levés.

Enfin, même si la qualité du géoréférencement des produits a été contrôlée lors du traitement aussi bien pour les données Lidar que multispectrales, vérifier que la superposition des données ne pose pas de problème est indispensable. Pour cela, les Modèles Numériques de Surface (MNS) peuvent être importés sur QGIS afin de calculer la distance entre des points associés aux mêmes éléments fixes sur les deux MNS. Pour les données acquises le 15/04 l'écart moyen est de 5 cm (avec un écart-type de 3.6 cm), sur 10 points répartis sur la zone. Les données peuvent donc être combinées.

III Combinaison des données

Le travail proposé dans ce mémoire, réalisé au cours des cinq premiers mois du projet STRANGE, se veut être une première approche de la partie sur la caractérisation des variables environnementales pour laquelle, à terme, l'ensemble des données obtenues dans les trois volets du projet devront être analysées et mises en commun. Ainsi, pour cette première approche, différents indices spectraux et métriques Lidar seront calculées sans se limiter à une liste « *restreinte et minimale de variables* » (Pereira et al., 2013) comme ce serait le cas si la liste d'EBV était parfaitement définie.

Les données Lidar ou photogrammétriques sous forme de nuage de points permettent une bonne visualisation de l'ensemble du site. En revanche, l'analyse spatiale est facilitée avec une approche 2D, ainsi par la suite des rasters seront utilisés, avec différentes résolutions spatiales : 10 cm/px pour profiter de la haute résolution des capteurs, 1 m/px pour réduire le bruit lié aux variations non significatives de la couverture du sol et 10 m/px pour imiter la résolution spatiale des capteur satellitaires. La majorité des traitements a été réalisée avec le logiciel RStudio (v2023.12.1) permettant d'exécuter des scripts en langage R (v4.3.3).

III.1 Extraction des informations géométriques

III.1.1 Calcul de modèles numériques

Le MNT représente la topographie d'un site, c'est-à-dire le relief et le microrelief¹⁰, le MNS représente la surface d'un site en tenant compte des éléments naturels tels que le relief et les arbres mais aussi des éléments artificiels comme les bâtiments. La différence de ces modèles permet d'obtenir le Modèle Numérique de Hauteur (MNH) représentant la hauteur des objets présents à la surface. Ces modèles peuvent être obtenus à partir d'un nuage de points Lidar ou d'un nuage de points photogrammétriques. A partir du moment où les données lidar sont disponibles, leur utilisation est préférable à celle des données multispectrales pour créer ce type de produits. Les MNS, MNT et MNH peuvent être calculés depuis différents logiciels tels que QGIS, ArcGis, RStudio, Metashape, etc. Dans le cadre de ce mémoire, les produits présentés sont calculés avec R.

¹⁰ Le relief décrit la structure du terrain dans son ensemble tandis que le microrelief fait référence à des petites variations de terrains présentes à grande échelle.

III.1.2 Calcul de métriques Lidar

« Les métriques sont des résumés scalaires de distributions de points qui peuvent être calculés à l'aide de différentes définitions de voisinage et de différents emplacements de référence. » (Roussel et al., 2023). Concrètement, ce sont des mesures synthétisant les informations présentes dans un nuage de points Lidar afin de faciliter son analyse. Bakx et al. (2019) ont recensé 50 articles scientifiques dans lesquels sont calculées des métriques Lidar, dans le cadre de recherche sur la diversité et la répartition des oiseaux. Ils montrent qu'il existe une multitude de mesures Lidar permettant de quantifier les attributs structurels de la végétation, et que plusieurs approches sont possibles en s'intéressant aux pixels, aux voxels¹¹ ou aux objets. Dans le cadre de ce mémoire, les métriques Lidar sont calculées sur la zone d'étude complète avec une approche basée sur les pixels, les informations sont stockées sous la forme de rasters afin de faciliter la combinaison des données.

L'ensemble des métriques Lidar est calculé avec le package R « LidR » (Roussel et al., 2019). Ce package permet le calcul de métriques prédéfinies mais également de métriques définies par l'utilisateur. Dans le cadre du projet eEcoLiDAR de l'université d'Amsterdam (Kissling et al., 2017 ; Koma et al., 2021), un script regroupant les métriques Lidar permettant d'appréhender la complexité verticale et l'hétérogénéité horizontale de la végétation a été produit. J'ai repris, adapté puis complété ce script avec les métriques prédéfinies du package LidR (Annexe 3). La principale difficulté rencontrée était liée au poids du nuage, même découpé en dalles, le traitement ne pouvait pas s'effectuer sur les ordinateurs à disposition¹² qui manquaient de mémoire RAM¹³. Des lignes permettant de libérer la mémoire temporaire ont dû être ajoutées au code. Pour la suite du projet STRANGE, le script pourra être édité afin d'ajuster les métriques ou d'en calculer de nouvelles. Le script actuel permet de calculer des métriques décrivant la couverture du sol (*Taux de pénétration des impulsions*), la variabilité verticale (*coefficient de variation de la hauteur*), etc. Le calcul de certaines métriques (notamment pour la variabilité verticale) nécessite la normalisation du nuage à partir du MNT. Cette étape permet de s'intéresser à la hauteur des points par rapport au sol, et non par rapport à leur altitude, ainsi le relief

¹¹ Le voxel est l'équivalent tridimensionnel du pixel.

¹² Processeur Intel Core i7-7700 à 3.6 GHz et 32 Go de Ram

¹³ La mémoire RAM (Random Access Memory) d'un ordinateur est une mémoire volatile utilisée pour stocker des données, des instructions, etc. dont l'ordinateur a besoin pour ses calculs.

n'impacte pas l'étude de la structure de la végétation. L'Annexe 4 donne une brève description de chaque métrique calculée.

Au total, 45 métriques Lidar sont calculées et regroupées en un seul *RasterStack*¹⁴. La résolution des rasters est fixée à 10 cm/px, 1 m/px puis 10 m/px. Les métriques, d'ordre géométrique, ne sont pas les seules informations obtenues avec les acquisitions réalisées, une grande partie de celles-ci sont d'ordre radiométrique¹⁵.

III.2 Extraction des informations radiométriques

III.2.1 Intensité Lidar

À la suite du précédent script, certaines fonctions ont été ajoutées afin d'utiliser l'information d'intensité lumineuse enregistrée dans le nuage de points. Bien que la majorité des études Lidar se concentre sur les informations géométriques, l'intensité lumineuse peut également être utilisée pour distinguer les caractéristiques de la couverture du sol pour la cartographie : la contribution de l'intensité dérivée du Lidar n'est pas négligeable dans les classifications d'habitats (Collin et al., 2023). En revanche, l'intensité lumineuse dépend des propriétés de l'objet sur lequel l'onde se réfléchit mais aussi de la distance à la cible, de l'angle d'inclinaison et de l'instrument utilisé, cela induit un bruit traduit par un effet « poivre et sel ». Sans correction radiométrique, l'intensité est relative et non quantifiable, les données sont donc utilisables mais les valeurs ne sont pas significatives (Kashani et al., 2015). Dans le cadre de ce mémoire, aucune correction radiométrique n'est appliquée aux données d'intensité Lidar, elles sont à prendre avec précaution. Les 12 rasters calculés sur la base de ces informations sont ajoutés au *RasterStack* des métriques.

III.2.2 Calcul d'indices spectraux

L'orthoimage générée avec les données multispectrales de la caméra RedEdge-MX Dual permet de calculer des indices spectraux. Ils combinent différentes bandes spectrales d'une image afin de mettre en évidence certaines propriétés des surfaces observées. Concrètement, un indice spectral est une formule mathématique utilisant différentes bandes multispectrales. Les indices spectraux sont donc très nombreux, mais aussi très diversifiés : ils peuvent être utilisés pour cartographier l'état de santé de la végétation, les incendies, les

¹⁴ Un *RasterStack* est une pile de couches raster de même résolution superposées.

¹⁵ Les informations radiométriques font référence aux propriétés physiques des ondes électromagnétiques.

surfaces imperméables, la qualité de l'eau, la diversité de la végétation ou encore les carences en nutriments.

Pour le calcul de ces indices, j'ai fait le choix d'utiliser un script R dans la continuité des produits précédemment créés pour le Lidar, mais d'autres outils peuvent être utilisés (calculatrice raster de Metashape ou QGIS, un script Python, etc.). Une liste de 121 indices, non exhaustive, a été créée à partir de la littérature (Annexe 4). Les indices sont calculés à partir de l'orthoimage générée avec Metashape depuis les données de la caméra RedEdge-MX Dual, contenant 10 bandes spectrales avec une taille pixel sol de 10 cm. Générer les rasters avec différentes tailles pixels sol permet de comparer l'impact de celles-ci lors des analyses. Par exemple, la Figure 13 illustre l'indice NDVI calculé sur le site de la Cisse pour les différentes résolutions spatiales.

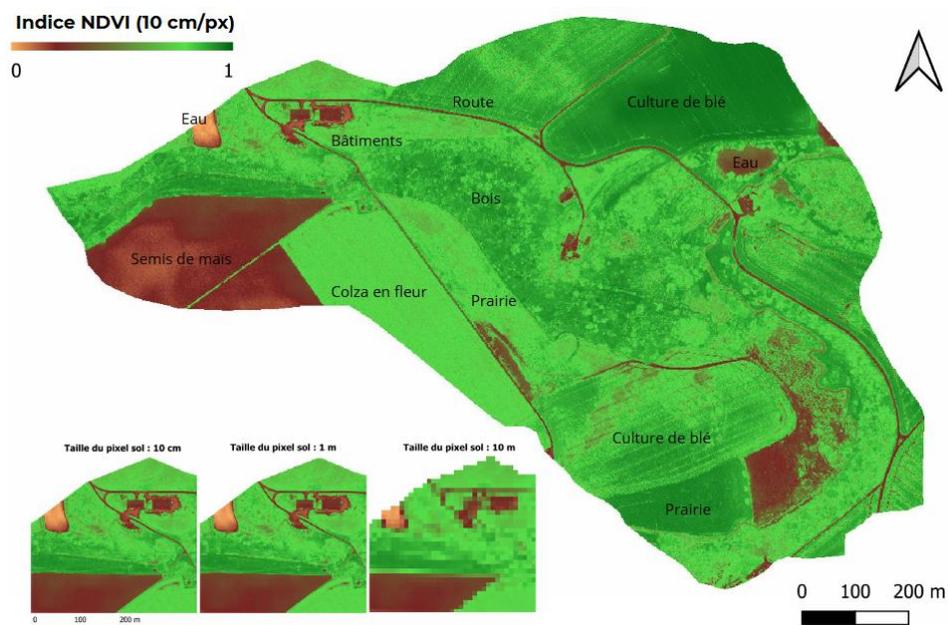


Figure 13 : Exemple d'indice spectral calculé à différentes résolutions - le NDVI

L'ensemble des 121 indices calculés sont enregistrés dans un *RasterStack* afin de faciliter leur utilisation future.

III.3 Analyse exploratoire pour la sélection des variables contributives

III.3.1 Mise en œuvre de la sélection

Le nombre d'informations obtenues à partir des données Lidar et multispectrales est très important. Même si toutes les couches raster obtenues sont différentes, la plus-value apportée par certaines est minime, ce qui est encore plus vrai lorsqu'on les combine. On associe alors la contribution d'une variable à la quantité d'information qu'elle contient. Afin de ne conserver que les rasters apportant le plus d'informations, la multicollinéarité a été

étudiée dans un premier temps entre les divers indices multispectraux puis entre les métriques. Cette étape permet de simplifier l'exploitation des résultats et permet de ne pas introduire de biais lié à la redondance de l'information lors des analyses ultérieures (Koma et al., 2021).

Avant de procéder aux calculs de corrélation, j'ai ajouté à mon script différentes fonctions permettant d'améliorer l'étalement de l'histogramme et de normaliser l'ensemble des rasters entre -1 et 1, afin que les données puissent être comparables. Les matrices de corrélation calculées sur R sont présentées en Annexe 5. Celles-ci permettent de visualiser la multicolinéarité de l'ensemble des variables mais au vu du nombre de variables étudiées, elles ne sont pas facilement interprétables. La fonction *vifcor(r, th)* du package *usdm* (Naimi et al., 2014) est utilisée pour extraire les variables trop fortement corrélées. Elle identifie, pour chaque paire de variables dont la valeur absolue de la corrélation est supérieure à la valeur *th*, la variable ayant le facteur d'inflation de la variance (VIF) le plus important (c'est-à-dire celle étant la plus corrélée à l'ensemble des variables).

Initialement, la corrélation entre les indices spectraux est plus importante que celle entre les métriques Lidar. Pour les indices spectraux du *RasterStack* de la Cisse avec une résolution de 1 m/px, 58% des coefficients de Pearson (éléments constitutifs de la matrice de corrélation) sont supérieurs à 0.7, seuil à partir duquel deux variables sont considérées comme « très corrélées ». La matrice de corrélation calculée avec les métriques Lidar est composée de seulement 14% de coefficients supérieurs à ce seuil. Comme les indices spectraux sont beaucoup plus corrélés que les métriques, le seuil de sélection des indices est fixé à 0.7, permettant d'écarter les plus corrélées tout en conservant au moins 10% des raster. Concernant les métriques Lidar, ce coefficient est fixé à 0.5 pour sélectionner les rasters dont la corrélation est « moyenne à faible ». Les matrices de corrélation résultantes sont présentées en Annexe 5 également. Pour le site de la Cisse, avec une résolution spatiale de 1 m, 12 indices multispectraux et 16 métriques Lidar sont conservés.

III.3.2 Analyse des résultats

Pour une résolution de 1 m/px sur le site de la Cisse, parmi les 12 indices sélectionnés, 21% des coefficients de corrélation sont compris entre 0.5 et 0.7. Pour les 16 métriques sélectionnées, 92.5% de ces coefficients sont inférieurs à 0.3 ce qui signifie que la corrélation entre les rasters est très faible. Présenté ainsi, le Lidar semble apporter des informations plus variées. En effet, les indices spectraux sont calculés uniquement à partir de la signature spectrale des surfaces tandis que les métriques sont calculées sur une structure

3D complexe. Cela ne signifie pas pour autant que les métriques seront plus pertinentes, et encore moins suffisantes, pour les analyses futures. En attendant de pouvoir évaluer la pertinence effective des indices et métriques sélectionnés par le vif, au travers d'une analyse incluant l'ensemble des données *in-situ* (avec une corrélation entre indices/métriques et répartition des insectes - par exemple), un regard critique peut déjà être porté sur cette sélection.

Tout d'abord, parmi les rasters sélectionnés, ne figurent pas les indices les plus couramment utilisés tels que le NDVI dont la valeur du VIF est très élevée. Toutefois, plus tard, si des indices (ou des métriques) sont indispensables à l'étude, ils pourront être ajoutés à la sélection manuellement grâce au paramètre « *keep* » de la fonction *vifcor()*. De plus, les rasters sélectionnés par le vif sont majoritairement identiques pour les trois résolutions. Avec une résolution plus grossière, l'information contenue dans les pixels est lissée. Ainsi, si l'indice met en avant une variation entre des éléments grossiers comme l'indice BI (Brightness Index)¹⁶ alors il est retenu à 10 cm comme à 10 m. En revanche, s'il cible des variations au sein de la végétation comme le Datt1¹⁷ alors il a plus de chance d'être remplacé par un autre lors de la sélection VIF.

Enfin, parmi les indices sélectionnés, toutes les bandes du capteur multispectral ne sont pas utilisées : sur les 3 bandes RedEdge, seul le « RedEdge 705 » est mobilisé. Ce constat peut venir du fait que ces bandes sont très proches dans le spectre et donc fortement corrélées, le RedEdge 705 est très sensible à la teneur en chlorophylle, ce qui peut expliquer que sa présence est plus importante. Cela peut également venir des formules d'indices utilisées, qui ne valorisent peut-être pas suffisamment ces bandes.

Les indices et les métriques variant en fonction de la signature spectrale de la surface et/ou en fonction de la structure de la végétation, il n'est pas garanti que ces mêmes variables soient sélectionnées sur un autre site, ou sur ce même site avec une date d'acquisition différente. Pour les analyses ultérieures qui auraient besoin de se concentrer sur quelques indices ou métriques en particulier, l'ensemble des couches restent individuellement exploitables, même celles n'ayant pas été sélectionnées par le vif.

¹⁶ L'indice spectral BI cible les variations de luminosité afin de distinguer différents types de sols ou de végétation.

¹⁷ L'indice spectral Datt1 (Datt, 1999) cible la teneur en eau de la végétation

III.4 Etude de la possibilité d'un changement d'échelle

L'un des objectifs du projet STRANGE est de réaliser un changement d'échelle, c'est-à-dire d'étendre les analyses réalisées sur les 6 sites, à l'échelle du bassin versant.

III.4.1 Données pouvant être mobilisées pour une étude à plus petite échelle

III.4.1.1 Le Lidar HD de l'IGN

En France, l'Institut National de l'Information Géographique et forestière (IGN) est à l'initiative d'une campagne de collecte de données Lidar aéroportées de haute densité dans l'objectif de cartographier l'ensemble du territoire d'ici 2025. Aucun des sites du projet STRANGE n'est concerné par la diffusion des données lors de la réalisation de ce travail. Dès que les données seront disponibles, elles pourront être utilisées pour calculer l'ensemble des produits abordés précédemment à l'échelle du bassin versant. Les informations contenues dans le nuage de points *.las* diffusé ont la même structure que celles utilisées dans le cadre de ce mémoire. En revanche, l'IGN diffuse directement les données classifiées (en 8 classes, dont le sol et les différents niveaux de végétation), ce qui facilite les traitements par la suite. Les nuages de points sont contrôlés afin de garantir des données sans artefacts, complètes, avec une densité minimale de 10 pts/m². La précision (1σ) des nuages de points est annoncée à 10 cm en altimétrie et à 50 cm en planimétrie.

III.4.1.2 Données Multispectrales de Sentinel-2

En orbite à 786 km d'altitude, les deux satellites Sentinel-2 (A et B) fournissent des images dans 13 bandes spectrales (du visible au moyen infra-rouge) depuis, respectivement, 2015 et 2017. La résolution spatiale varie de 10 m/px à 60 m/px, en fonction des bandes. Ces données satellitaires sont gratuites et libre d'accès et dans le cadre de notre étude, elles sont particulièrement intéressantes car les bandes correspondent, en partie, à celles des capteurs multispectraux utilisés. Avec une période de revisite de cinq jours, ces données peuvent être téléchargées à des dates choisies, pour correspondre à quelques jours près aux dates des acquisitions par drones. Les images peuvent ensuite être utilisées pour calculer des indices, de la même façon que celles des capteurs de Micasense.

III.4.2 Aspects des données et attentes

Lors de ce travail, les données d'une dalle du Lidar HD ont été téléchargées sur la commune d'Aubigné-Racan (72800), pour un site présentant les mêmes caractéristiques que les sites d'études. Les données doivent être inspectées tant sur le bruit du nuage, que sur la

densité de points, le géoréférencement ou encore la classification. Afin de tenir compte de la classification du Lidar HD, le script permettant de calculer les métriques Lidar doit être adapté au travers des commande *opt_filter (nuage)*. La taille du *chunk*, utilisée pour traiter le nuage dalle par dalle, peut également être modifiée si la taille du nuage est très importante. Le script s'exécute ensuite sans encombre. Les résultats sont cohérents avec ceux obtenus précédemment, même s'ils ne sont pas directement comparables.

Pour le calcul d'indices avec des données satellitaires, j'ai choisi une image Sentinel-2 du niveau 2A acquise la veille de notre journée d'acquisition (le 15/04/2024) couvrant le site de la Cisse avec une faible couverture nuageuse. Dans un premier temps, les calculs ont été réalisés avec une résolution spatiale de 60 m/px permettant l'usage direct de l'ensemble des bandes, puis un sur-échantillonnage a été réalisé afin d'obtenir une résolution spatiale de 10 m/px comparable à la résolution des données multispectrales traitées précédemment. L'utilisation des données satellites nécessite seulement de modifier les premières lignes du script, c'est-à-dire la lecture des bandes, pour laquelle des fonctions permettant de lire le raster, le reprojeter en Lambert-93, le couper selon l'emprise du site et enfin le rééchantillonner à une résolution de 10 m/px sont nécessaires.

Par la suite, l'ensemble du processus menant à la sélection des rasters non corrélés a été appliqué : 9 indices et 17 métriques ont été retenus. Parmi ces indices, certains sont communs à la sélection VIF des indices calculés avec les données de la caméra Micasense MX. Le contraste entre la végétation et les autres surfaces est bien plus prononcé avec les données obtenues par drone qu'avec celles obtenues par satellite, à la même résolution spatiale. Contrairement aux données acquises par drone, les images Sentinel-2 disposent de bandes spectrales dans le moyen infra-rouge en complément, pouvant être utilisées pour étudier l'humidité des sols et la teneur en eau de la végétation, ce qui peut s'avérer utile dans le type d'écosystème étudié. Pour cette raison, le projet STRANGE mobilisera, plus tard, un nouveau capteur de télédétection permettant d'obtenir des données dans de nouvelles bandes (Short Wave Infrared et Infrarouge Thermique). Pour les métriques Lidar, certaines sont communes, mais n'étant pas calculées sur le même site, leur comparaison n'est pas pertinente.

Finalement, on peut s'attendre à ce que le changement d'échelle pour les analyses effectuées soit compliqué. En fonction des analyses réalisées, peut-être que seulement certaines des EBV pourront être estimées depuis ces données disponibles à petite échelle.

Conclusion

Ce travail a donné la possibilité d'étudier la combinaison des données, issues de capteurs Lidar et multispectraux, pour répondre aux besoins d'un projet de recherche interdisciplinaire, ayant pour objectif l'identification des EBV caractérisant les services écosystémiques des cours d'eau de tête de bassin. Ces capteurs embarqués sur des drones permettent de caractériser un site d'étude avec une haute résolution spatiale, mais nécessitent le développement d'une solution de télédétection reposant sur des protocoles d'acquisition et de traitement spécifiques.

La réalisation d'un protocole d'acquisition rigoureux est nécessaire pour obtenir des informations suffisamment complètes et fiables afin d'assurer la cohérence des analyses futures. Un contrôle minutieux du matériel est indispensable : l'identification du défaut de calibration de certaines bandes du capteur a empêché la collecte de données radiométriques fausses qui aurait conduit à des analyses entachées d'erreurs. La réalisation de tests de sensibilité permet d'adopter des paramètres de vol compatibles avec les contraintes liées au matériel, à la configuration des sites et aux exigences du projet. L'élaboration du protocole de traitement a été guidé par la nécessité de trouver un compromis efficace entre simplicité et qualité ; la gestion des données et leur traitement étant des défis majeurs de ce travail. Dans cette étude, l'accent a été mis sur l'extraction d'informations géométriques et radiométriques puis sur une sélection basée sur leur corrélation. Cette première approche a conduit à la création d'un *RasterStack* intégrant l'ensemble des variables sélectionnées, permettant ainsi leur utilisation conjointe ou individuelle. Ce choix a été motivé par le fait que le projet de recherche n'en est qu'à son début et qu'il est encore trop tôt pour avoir un aperçu exhaustif des analyses qui seront réalisées par la suite. L'indisponibilité des données terrains, issus des autres protocoles scientifiques, au cours de cette étude m'a incité à suspendre mon travail à un stade qui maintient ouvertes plusieurs possibilités. Les prochains mois du projet seront consacrés à l'étude plus approfondies de ces données et à leur mise en relation avec les données de terrain. Le changement d'échelle envisagé est prometteur, mais dépendra sans doute des EBV considérées.

Malgré les défis rencontrés, ce travail apporte au projet STRANGE une solution de télédétection complète permettant de produire un jeu de données Lidar et multispectrales fiables pour les analyses futures. Les interactions au sein d'un écosystème étant complexes, d'autres approches plus poussées pourraient être envisagées pour sélectionner les variables contributives avec notamment l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique.

Bibliographie

Travaux universitaires : thèses

Dusseux, P. (2014). Exploitation de séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale pour le suivi des prairies en milieu agricole. Thèse de doctorat, spécialité Géographie. Université Rennes 2. 283p. <https://theses.hal.science/tel-01131770> (consulté le 01 juin 2024).

Ferraz A., (2012). Cartographie 3D d'une forêt à partir de données LiDAR aéroporté. Thèse de doctorat, spécialité Géophysique. Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, École doctorale des Sciences de la Terre. 158p. Disponible sur: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14591.00169> (consulté le 12 mars 2024).

Gerber, R (2022). Mouvement des insectes aquatiques émergents dans les environnements terrestres: influence de la morphologie, des réserves énergétiques et du paysage. Thèse de doctorat, spécialité Ecologie et évolution. Biodiversité et Ecologie. Université de Rennes. 224 p. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-04339286> (consulté le 17 février 2024).

Articles de revues et périodiques scientifiques

Bakx, T. R. M., Koma, Z., Seijmonsbergen, A. C., & Kissling, W. D. (2019). Use and categorization of Light Detection and Ranging vegetation metrics in avian diversity and species distribution research. *Diversity and Distributions*, 25(7), 1045-1059. <https://doi.org/10.1111/ddi.12915>

Barnsley, S. L., Lovett, A. A., & Dicks, L. V. (2022). Mapping nectar-rich pollinator floral resources using airborne multispectral imagery. *Journal of Environmental Management*, 313, 114942. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114942>

Bhatnagar, S., Gill, L., Regan, S., Waldren, S., & Ghosh, B. (2021). A nested drone-satellite approach to monitoring the ecological conditions of wetlands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 174, 151-165. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.01.012>

Camacho-Valdez, V., & Ruiz-Luna, A. (2011). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*, 1(4). <https://doi.org/10.15741/revbio.01.04.02>

Collin, A., James, D., Gallon, R., Poizot, E., & Feunteun, E. (2023). The Use of Ultra-High Resolution UAV Lidar Infrared Intensity for Enhancing Coastal Cover Classification. *Environmental Sciences Proceedings*, 29(1). <https://doi.org/10.3390/ECRS2023-16610>

Datt, B. (1999). Remote Sensing of Water Content in Eucalyptus Leaves. *Australian Journal of Botany*, 47(6), 909-923. <https://doi.org/10.1071/bt98042>

Doughty, C. L., & Cavanaugh, K. C. (2019). Mapping Coastal Wetland Biomass from High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/rs11050540>

- Kashani, A. G., Olsen, M. J., Parrish, C. E., & Wilson, N. (2015).** A Review of LIDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration. *Sensors*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/s151128099>
- Kissling, W. D., Seijmonsbergen, A., Foppen, R., & Bouten, W. (2017).** eEcoLiDAR, eScience infrastructure for ecological applications of LiDAR point clouds: Reconstructing the 3D ecosystem structure for animals at regional to continental scales. *Research Ideas and Outcomes*, 3, e14939. <https://doi.org/10.3897/rio.3.e14939>
- Koma, Z., Seijmonsbergen, A. C., Grootes, M. W., Nattino, F., Groot, J., Sierdsema, H., Foppen, R. P. B., & Kissling, W. D. (2022).** Better together? Assessing different remote sensing products for predicting habitat suitability of wetland birds. *Diversity and Distributions*, 28(4), 685-699. <https://doi.org/10.1111/ddi.13468>
- Koma, Z., Seijmonsbergen, A. C., & Kissling, W. D. (2021).** Classifying wetland-related land cover types and habitats using fine-scale lidar metrics derived from country-wide Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(1), 80-96. <https://doi.org/10.1002/rse2.170>
- Lague D., Brodu N. & Leroux J. (2013).** Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei Canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10-26 p.
- Martínez Prentice, R., Villoslada Peciña, M., Ward, R. D., Bergamo, T. F., Joyce, C. B., & Sepp, K. (2021).** Machine Learning Classification and Accuracy Assessment from High-Resolution Images of Coastal Wetlands. *Remote Sensing*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/rs13183669>
- Moreno, H., Valero, C., Bengochea-Guevara, J. M., Ribeiro, Á., Garrido-Izard, M., & Andújar, D. (2020).** On-Ground Vineyard Reconstruction Using a LiDAR-Based Automated System. *Sensors*, 20(4). <https://doi.org/10.3390/s20041102>
- Naimi, B., Hamm, N.A.S., Groen, T.A., Skidmore, A.K., and Toxopeus, A.G. (2014).** Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling?. *Ecography* 37 (2), 191-203. <https://www.jstor.org/stable/ecography.37.2.191>
- Pereira, H. M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G. N., Jongman, R. H. G., Scholes, R. J., Bruford, M. W., Brummitt, N., Butchart, S. H. M., Cardoso, A. C., Coops, N. C., Dulloo, E., Faith, D. P., Freyhof, J., Gregory, R. D., Heip, C., Höft, R., Hurtt, G., Jetz, W., ... Wegmann, M. (2013).** Essential Biodiversity Variables. *Science*, 339(6117), 277-278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>
- Resop, J. P., Lehmann, L., & Hession, W. C. (2019).** Drone Laser Scanning for Modeling Riverscape Topography and Vegetation: Comparison with Traditional Aerial Lidar. *Drones*, 3(2). <https://doi.org/10.3390/drones3020035>
- Štroner, M., Urban, R., & Línková, L. (2021).** A New Method for UAV Lidar Precision Testing Used for the Evaluation of an Affordable DJI ZENMUSE L1 Scanner. *Remote Sensing*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/rs13234811>
- Sweaney, N., Lindenmayer, D. B., & Driscoll, D. A. (2021).** Movement across woodland edges suggests plantations and farmland are barriers to dispersal. *Landscape Ecology*, 37(1), 175-189. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01340-5>

Documents en ligne et sites web

Agisoft (2024). MicaSense RedEdge MX processing workflow (including Reflectance Calibration) in Agisoft Metashape Professional. Disponible sur: <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000148780-micasense-rededge-mx-processing-workflow-including-reflectance-calibration-in-agisoft-metashape-pro> (consulté le 15 mars 2024).

Buffet, D., & Oger, R. (2000). Agriculture de précision: Gestion des données et des bases de connaissances. Centre de Recherches Agronomiques. https://www.researchgate.net/publication/257876410_Agriculture_de_precision_Gestion_d_es_donnees_et_des_bases_de_connaissances (consulté le 06 mai 2024).

Kagan, R. (2017). Cours d'eau de tête de bassin versant en bon état : quels enjeux et quelles actions de non-dégradation ? (PDF). Office International de l'Eau. Disponible sur: https://www.oieau.fr/eaudoc/system/files/kagan_fr.pdf (consulté le 01 mai 2024).

Legros R., Morel L., Viguiet F. & Birot F.(2013). Méthodes de travail dans les réseaux GNSS. Disponible sur: https://cnig.gouv.fr/IMG/pdf/methodes_travail_reseau_gnss_130219.pdf (consulté le 05 mai 2024).

Roussel J-R., Goodbody T.R.H. & Tompalski P. (2023). The LidR package. Disponible sur: <https://r-lidar.github.io/lidRbook/index.html> (consulté le 01 juin 2024).

Logiciels et documentation technique

DJI (2020). Matrice 300 RTK Redundant Systems Report. Disponible sur: <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/5569287/Matrice%20300%20RTK%20Redundant%20Systems%20Report.pdf> (consulté le 15 février 2024).

DJI (2021). Guide d'utilisateur L1. Disponible sur: https://dl.djicdn.com/downloads/Zenmuse_L1/20220119UM/Zenmuse_L1%20User%20Manual_FR_v1.2.pdf (consulté le 05 février 2024).

DJI (2022). DJI L1 Operation Guidebook. Disponible sur: https://dl.djicdn.com/downloads/Zenmuse_L1/20220704/DJI%20L1%20Operation%20Guidebook%20V1.1%2020220704.pdf (consulté le 20 février 2024).

Hobu, Inc. (2021). Cloud Optimized Point Cloud Specification. Disponible sur: <https://copc.io/copc-specification-1.0.pdf> (consulté le 16 avril 2024).

Micasense (2021), MicaSense RedEdge-P™ and DLS 2, Integration Guide. Disponible sur: https://support.micasense.com/hc/article_attachments/4414659533207/RedEdge-P-Guide-Dec2021.pdf (consulté le 15 mars 2024).

Roussel, J. R., & Auty, D. (2019). LidR: Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. R package version 2.1.1. <https://CRAN.R-project.org/package=lidR>

Autres documents

STRANGE final proposal (2023)

Table des annexes

Annexe 1 : Bandes de la Caméra Micasense RedEdge-P Dual.....	43
Annexe 2 : Synthèse des protocoles d'acquisitions et de traitements	44
Annexe 3 : Présentation des scripts utilisés pour le calcul des métriques et indices.....	46
Annexe 4 : Présentation des indices et métriques calculés.....	48
Annexe 5 : Matrices de corrélation	52

Annexe 1 :

Bandes de la Caméra Micasense RedEdge-P Dual

Les bandes spectrales du capteur Micasense RedEdge-P Dual permettent la comparaison des données avec les satellites Sentinel-2 et Landsat-8.

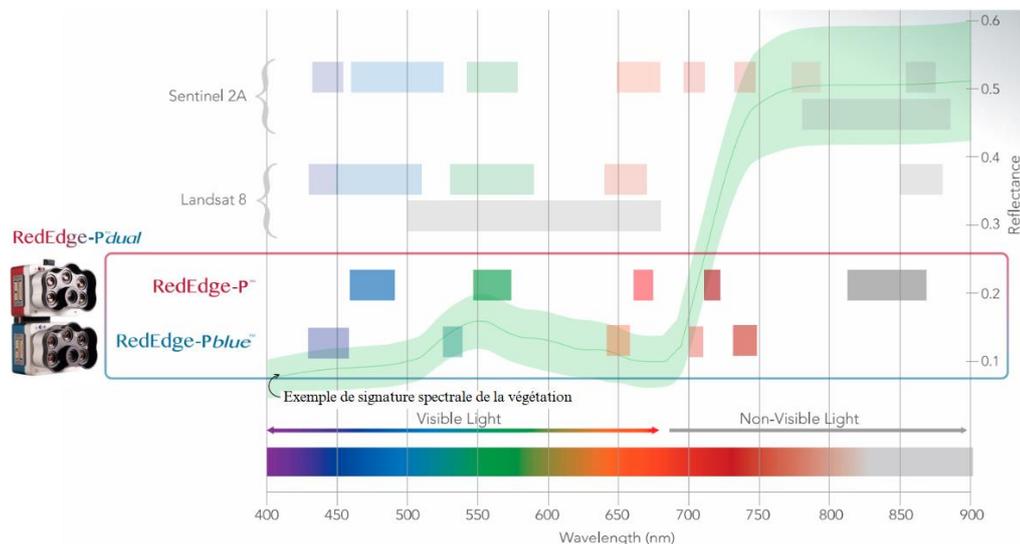


Illustration inspirée de la brochure AgEagle pour la caméra Micasense RedEdge-P dual, disponible sur : <https://ageagle.com/wp-content/uploads/2023/04/REP-dual-brochure-2023-English-Digital.pdf>

Chaque bande est enregistrée dans une image, identifiable par le suffixe « _X », les longueurs d'onde correspondantes sont précisées dans la figure ci-dessous :

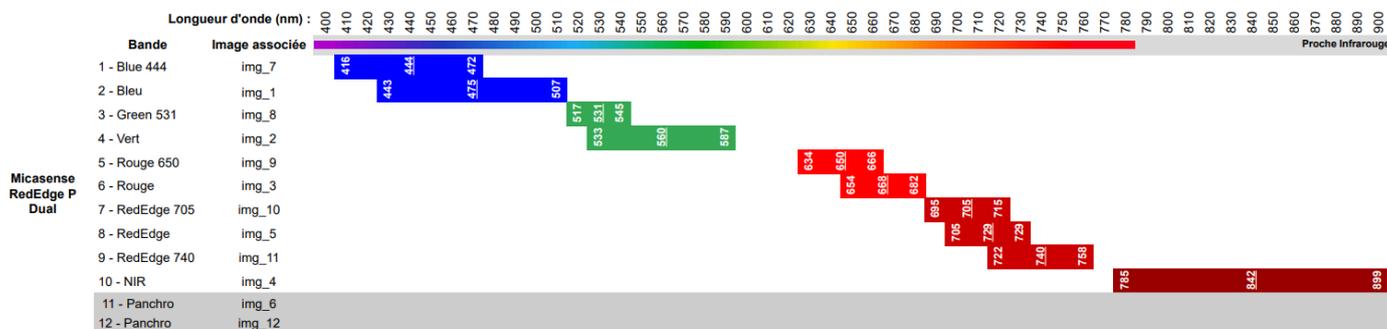


Illustration réalisée à partir des valeurs de longueur d'onde moyenne et de largeur de bandes fournies par Micasense pour le capteur RedEdge-P Dual. Données disponible sur : <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/214878778-What-is-the-center-wavelength-and-bandwidth-of-each-filter-for-MicaSense-sensors>

Tableau présentant les différences entre les deux capteurs multispectraux du projet STRANGE :

Capteur	Nombre de bandes	Résolution du capteur	Taille pixel sol (à 60m)
MS RedEdge-P Dual	10	1456 x 1088 px	3.85 cm/px
« P » pour Panchromatique	P : 2	P : 2464 x 2056 px	P : 1.99 cm/px
MS RedEdge-MX Dual	10	1280 x 960 px	4 cm/px

Comparaison Micasense RedEdge-P et RedEdge-MX (Micasense, 2021)

Annexe 2 :

Synthèse des protocoles d'acquisitions et de traitements

Synthèse du protocole d'acquisition

1 Préparation de l'acquisition

- Vérifier la réglementation (hauteur de vol maximale, déclaration, scénario ...)
- Vérifier la couverture réseau (4G, 5G ...)
- Noter les particularités du site (relief, présence de lignes électriques ...)
- Vérification de la météo (notamment le vent, la pluie et les conditions d'ensoleillement)
- Préparation du matériel (charge des batteries, mises à jour, ...)

----- Arrivée sur site -----

2 Préparation du géoréférencement

- Installation de la station de base (DJI D-RTK 2)
- Répartition des cibles avec une bonne répartition en E,N et Z sur l'ensemble du site
- Mesures des cibles au NRTK moyenné (20-30s)

3 Acquisition Lidar

- Installer la nacelle simple sur le drone M300RTK.
- Installer le capteur DJI Zenmuse L1
- Contrôler le plan de vol et les paramètres d'acquisition :
 - Capteur DJI Zenmuse L1
 - Vitesse de vol : 8 m/s
 - Hauteur de vol : 70 m
 - Enregistrement des échos : Triple
 - Mode de balayage : Non répétitif
 - Colorisation RVB : Activée
- Vérifier la réception des corrections RTK depuis la station de base
- Début du vol
- Changement de batteries si nécessaire
- Fin du vol

i Les étapes 3 et 4 peuvent être inversées en fonction de la météo : l'acquisition multispectrale doit avoir lieu avec un ciel homogène

4 Acquisition multispectrale

- Installer la nacelle double sur le drone M300RTK
- Installer le capteur DJI Zenmuse P1 à droite, et le capteur Micasense RedEdge-P Dual à gauche
- Installer le capteur DLS2 sur le drone et le relier au capteur Micasense
- Contrôler le plan de vol et les paramètres d'acquisition :
 - Sur la télécommande du drone :
 - Capteur DJI Zenmuse P1 (35mm)
 - Vitesse de vol : 12 m/s
 - Hauteur de vol : 100 m
 - Recouvrement latéral : 80%
 - Recouvrement longitudinal : 80%
 - Angle de la trajectoire : 0°
 - Marges : 10m
 - Focus mode : First Waypoint Autofocus
 - Sur l'interface du capteur Micasense :
 - Auto-capture mode : Timer
 - Time period : 1s
 - Target alt. : 100 m
 - Target alt. tolerance : 20 m
- Prendre en photo le CRP (3 fois)
- Début du vol
- Changement des batteries si nécessaire
- Fin du vol
- Prendre en photo le CRP

5 Fin de l'acquisition

- Rangement du matériel
- Récupération des cibles
- Enregistrement des données des capteurs sur un disque dur

Synthèse du protocole de traitement des données

1 Organisation des fichiers

- Organiser les données dans un répertoire logique, par exemple :
 - Les données de la P1 : *LaCisse/15042024/rgb/level0_raw*
 - Les données de la RedEdge : *LaCisse/15042024/multispec/level0_raw*
 - Les données du L1 : *LaCisse/15042024/lidar/level0_rw*

2 Acquisition Lidar

- Reconstruction du nuage de points sur DJI Terra :
 - Import des dossiers Lidar
 - Ajustement des coordonnées de la station de base
 - Densité du nuage : élevée
 - Optimisation de la précision : activée
 - Nuage de points lisse : activé
 - Classification des points au sol
 - Imports des points de repères, définition des points de contrôle et de vérification
 - Export du nuage fusionné en .las (Lambert 93 + hauteur ellipsoïdale)
- Classification manuelle sur CloudCompare ou Metashape des lignes électriques, bâtiments et voitures
- Import dans QGIS :
 - Contrôle de la classification
 - Contrôle du géoréférencement
 - Tuilage
- Exécution du script *1_Pipeline_Calcul_indices.R* sur le nuage tuilé. Ce script conduit à la création d'un RasterStack contenant diverses métriques Lidar ainsi qu'un MNT, un MNS et un CHM.

3 Acquisition multispectrale

- Importer les photos de la P1 dans un chunk nommé 'rgb' et les photos multispectrales dans un chunk nommé 'multispec'
 - Pour le chunk 'rgb' :
 - Saisie de l'offset pour les données GNSS
 - Alignement des photos (qualité high)
 - Pointage des cibles
 - Optimisation de l'alignement des caméras
 - BatchProcess conduisant à la génération d'une orthoimage
 - Pour le chunk 'multispec' :
 - Saisie de l'offset pour les données GNSS
 - Calibration de la réflectance avec le CRP et le DLS2
 - Ajustement des données GNSS avec un script python permettant d'interpoler la position de la camera par rapport aux données RTK de la P1
 - Saisie de l'offset
 - Choix de la bande principale et réglage de la luminosité
 - Pointage des cibles
 - Optimisation de l'alignement des caméras
 - Batchprocess conduisant à la génération d'un orthoimage
 - Utilisation de la calculatrice raster pour normaliser la réflectance entre 0 et 1
 - Export de l'orthoimage avec le paramètre 'index Value'
- Exécution du script *2_Pipeline_Calcul_métriques.R* sur l'orthoimage générée (à la résolution souhaitée). Ce script conduit à la création d'un RasterStack contenant divers indices spectraux.

4 Combinaison des données

- Exécution du script *3_Combinaison.R* permettant la sélection des métriques et des indices les moins corrélés afin d'obtenir les variables les plus contributives
- Utilisation de ces variables (*à faire*)

Annexe 3 :

Présentation des scripts utilisés pour le calcul des métriques et indices

Pour réaliser la combinaison des données Lidar et Multispectrales un script R a été utilisé et exploité sur le logiciel R Studio. Les parties concernant les métriques Lidar sont issues du script disponible sur GitHub à l'adresse suivante : https://github.com/eEcoLiDAR/PhDPaper1_Classifying_wetland_habitats (Koma et al., 2021).

Partie 0 : Fonction_LIDARMetricsCalc.R

Ce script permet de définir l'ensemble des fonctions utilisées par les scripts suivants, c'est-à-dire tout ce qui se réfère aux calculs de métriques, à l'alignement des rasters ou encore à l'extraction des couches d'un *RasterStack*.

Exemple de fonction :

```
HeightMetrics = fonction(z) { heightmetrics = list(
  zmax = max(z),
  zmean = mean(z),
  ...,
  zmin = min(z) )
return(heightmetrics) }
```

Partie 1 : 1_Pipeline_Calcul_indices.R

Ce script permet de calculer les indices spectraux à partir de l'orthoimage multispectrale générée depuis Metashape.

1 - Installation des packages et chargement des bibliothèques

```
install.packages(c("raster", "rgdal", "sf"))
library(c("raster", "rgdal", "sf"))
```

2 - Chargement des fonctions et de l'orthoimage

```
source("D:/.../Function_LiDARMetricsCalc.R")
workingdirectory="D:/.../Indices/Resolution_10cm"
setwd(workingdirectory)
image <- stack("D:/.../Ortho_LaCisse_Laudea_10cm.tif")
```

3 - Définition des bandes spectrales

```
# Pour les indices standards
bleu <- image[[2]]
...
NIR <- image[[10]]

# Pour les indices issus de SentinelHub
B01 <- image[[1]]
...
B08 <- image[[10]]
```

4 - Calcul des indices et enregistrement dans une liste

```
NDVI <- (NIR - rouge) / (NIR + rouge)
NDWI <- (vert-NIR) / (vert+NIR)
...
TCI <- 1.2 * (B05 - B03) - 1.5 * (B04 - B03) * sqrt(B05 / B04)
liste_indices <- list(NDVI=NDVI, ..., NDWI=NDWI, ..., TCI=TCI)
```

5 - Création d'un RasterStack et enregistrement

```
indices_stack <- stack(liste_indices)
writeRaster(indices_stack, paste("RasterStack_Indices_", resolution, sep=""), format = "raster", overwrite = TRUE)
```

6 - Application d'un masque sur l'emprise

```
mask <- st_zm(st_read("D:/.../emprise_reduite_LaCisse.shp"), drop = TRUE, what = "ZM")
liste_indices_mask <- list()
k <- 1
for (raster in liste_indices) {
  liste_indices_mask[[names(liste_indices)[k]]] <- mask(raster, mask)
  k <- k+1
}
```

7 - Étalement de l'histogramme et normalisation

```
p <- 0.98
liste_indices_norm <- list()
l <- 1
for (name in names(liste_indices_mask)) {
  raster_layer <- liste_indices_mask[[name]]
  raster_etale <- ajust_histo(raster_layer, name, p)
  if (should_normalize(raster_layer)) { raster_norm <- normalize_raster(raster_etale) }
  else { raster_norm <- raster_layer }
  liste_indices_norm[[names(liste_indices_mask)[l]]] <- raster_norm
  l <- l+1
}
hist(raster_layer, main = paste("Histogramme de", name), xlab = "Valeurs des pixels", ylab = "Fréquence", breaks = 30)
```

8 - Enregistrement du RasterStack contenant tous les indices normalisés

```
writeRaster(stack(liste_indices_norm), paste("RasterStack_Indices_Norm", resolution, sep=""), format = "raster", overwrite = TRUE)
```

À la fin de ce script deux *RasterStack* sont créés, le premier contient les rasters de tous les indices calculés avec leur valeur initiale, le second contient les rasters de tous les indices préparés pour la comparaison, normalisés entre -1 et 1.

Partie 2 : 2_Pipeline_Calcul_métriques.R

Ce script prend en entrée un nuage de points Lidar, il a été optimisé pour pouvoir traiter des nuages de points lourds facilement. Le nuage de points doit avoir comme attributs au minimum : X, Y, Z, intensité, nombre de retour, numéro de retour, classification. Pour un traitement plus efficace je recommande de découper le nuage de points en dalles au préalable sur QGIS « Boîte à outils de traitements / Gestion des données de nuage de points / Tuile ».

1 - Installation des packages et chargement des librairies

```
install.packages(c("lidR", "rgdal", "raster", "future", "sf", "geometry")
library(c("lidR", "rgdal", "raster", "future", "sf", "geometry")
```

2 - Chargement des fonctions et du nuage de points

```
source("D:/.../Function_LiDARMetricsCalc.R")
workingdirectory="D:/.../LiDARMetrics" # Répertoire dans lequel doit être placé le nuage (tuiles)
setwd(workingdirectory)
nuage <- catalog(workingdirectory)
```

3 - Définition des paramètres de calculs

```
cores=18
chunksize=100 # permet de travailler
morceau par morceau
buffer=1
resolution = 10
workers = 4L #nombre de processeurs logiques utilisés
```

4 - Normalisation du nuage de points

```
ctg <- catalog(workingdirectory)
opt_output_files(ctg) <- paste(workingdirectory,"normalized_neibased{XLEFT}_
{YBOTTOM}_gr_norm",sep="")
normalized_ctg=normalize_height(ctg,knnidw(k=20,p=2))
```

5 - Nettoyage de la RAM (utilisés après chaque calculs)

```
clean_memory_and_connections()
opt_progress(nuage)=TRUE
plan(multisession, workers = workers)
set_lidr_threads(workers)
opt_chunk_size(nuage) <- chunksize
opt_chunk_buffer(nuage) <- buffer
```

`clean_memory_and_connections()` est une fonction créée pour réduire l'utilisation de la mémoire RAM lors de l'exécution de ce script, elle a été ajoutée au script `Function_LiDARMetricsCalc.R`

6 - Calcul des métriques et enregistrement des rasters

```
covermetrics = grid_metrics(normalized_ctg, ~CoverageMetrics(Z,Classification), res = resolution)
writeRaster(covermetrics,paste("covermetrics_norm_",resolution,sep=""), format = "raster",
overwrite=TRUE)
...
opt_filter(normalized_ctg) <- "-keep_class 1" # Class 1 : végétation ; Class 2 : sol
shapemetrics_whgr = grid_metrics(normalized_ctg, ~EigenMetrics(X,Y,Z), res = resolution)
...
opt_filter(normalized_ctg) <- "-keep_class 2"
mns <- grid_canopy(nuage, res=resolution, p2r(0.07, na.fill = tin()))
writeRaster(mns, paste("MNS_",resolution,sep=""), format = "GTiff", overwrite = TRUE)
...
```

7 - Alignement des raster et enregistrement dans un RasterStack

```
raster_files <- list.files(directory_path, pattern = "\\gri$", full.names = TRUE)
raster_list <- unlist(lapply(raster_files, function(file) {
stack_layers <- stack(file)
layers <- extract_layers(stack_layers)
return(layers)}, recursive = FALSE)
max_extent <- extent(Reduce(union, lapply(raster_list, extent)))
res <- raster_list[[1]]
raster_list_adapted <- lapply(raster_list, function(r) {adapt_to_extent(r, max_extent, res)})
metrics_stack <- stack(raster_list_adapted)
writeRaster(metrics_stack, paste("RasterStack_Metriques_",resolution,sep=""), format =
"raster", overwrite = TRUE)
```

8 - Etalonnage de l'histogramme et normalisation des rasters

9 - Enregistrement du RasterStack contenant toutes les métriques normalisées

A la fin de ce script deux *RasterStack* sont créés, le premier contient les rasters de toutes les métriques calculées avec leur valeur initiale, le second contient les rasters de toutes les métriques préparées pour la comparaison, normalisées entre -1 et 1.

Partie 3 : 3_Combinaison.R

Le *RasterStack* contenant les indices normalisés et celui contenant les métriques normalisées, peuvent être enregistrés ou copiés dans un répertoire destiné à la combinaison des données.

1 - Chargement des RasterStack et application d'un masque d'emprise commune

```
indices_stack <- stack(list.files(path = wd, pattern = "_Indices_Norm_.*\\.gri$", full.names = TRUE))
metriques_stack <- stack(list.files(path = wd, pattern = "_Metriques_Norm_.*\\.gri$", full.names =
TRUE))
emprise <- st_zm(st_read("D:/.../Emprise_combinaison.shp"), drop = TRUE)
for (i in 1:nlayers(metriques_stack)) {metriques_stack[[i]] <- mask(metriques_stack[[i]], emprise)}
```

2 - Calcul des matrices de corrélation

```
jnk_indices=layerStats(indices_stack, 'pearson', na.rm=T)
corr_matrix_indices=jnk_indices$pearson correlation coefficient
corrplot(corr_matrix_indices, ...) #Affichage de la matrice
jnk_metriques=layerStats(metriques_stack, 'pearson', na.rm=T)
corr_matrix_metriques=jnk_metriques$pearson correlation coefficient
corrplot(corr_matrix_metriques, ...) #Affichage de la matrice
```

3 - Calcul des valeurs propres

```
eigen_result_indices <- eigen(corr_matrix_indices, only.values = T)
eigen_matrix_indices <- matrix(eigen_result_indices$values, ncol = 1)
barplot(eigen_matrix_indices, ...) # Affichage d'un graphique
eigen_result_metriques <- eigen(corr_matrix_metriques, only.values = T)
eigen_matrix_metriques <- matrix(eigen_result_metriques$values, ncol = 1)
barplot(eigen_matrix_metriques, ...) # Affichage d'un graphique
```

5 - Sélection des rasters les moins corrélés (vif)

```
r <- rast(indices_stack)
v1 <- vifcor(r, th=0.7, size=50000)
RasterStack_indices_vif <- exclude(indices_stack,v1)
writeRaster(RasterStack_indices_vif, paste("RasterStack_Indices_Vifcor_",resolution,sep=""), ...)
corrplot(v1@corMatrix, ...) # Affichage de la matrice de corrélation entre les rasters sélect.
r <- rast(metriques_stack)
v1 <- vifcor(r, th=0.5, size=50000)
RasterStack_metriques_vif <- exclude(metriques_stack,v1)
writeRaster(RasterStack_metriques_vif, paste("RasterStack_metriques_Vifcor_",resolution,sep=""),...)
corrplot(v1@corMatrix, ...)
```

6 - Assemblage des rasters dans un RasterStack complet

```
liste_metriques <- extract_layers(RasterStack_metriques_vif)
liste_indices <- extract_layers(RasterStack_indices_vif)
liste_totale <- c(liste_metriques,liste_indices)
raster_ref <- liste_totale[[1]]
raster_ref_mask <- mask(raster_ref,emprise)
liste_rasters_alignes <- list()
for (raster_name in names(liste_totale)) {
current_raster <- liste_totale[[raster_name]]
current_raster_masked <- mask(current_raster, emprise)
if (!vifcor_alignement(raster_ref_mask, current_raster_masked)) {
liste_rasters_alignes[[raster_name]] <- align_rasters(raster_ref_mask, current_raster_masked)}
else {liste_rasters_alignes[[raster_name]] <- current_raster_masked}
}
stack_total <- stack(liste_rasters_alignes)
writeRaster(stack_total, paste("RasterStack_Metriques_et_Indices_Vifcor_",resolution,sep=""),
format = "raster", varnames = names(stack_total), overwrite = TRUE)
writeRaster(stack_total,paste("RasterStack_Metriques_et_Indices_Vifcor_",resolution,sep=""), ...)
```

Le *RasterStack* final peut être composé au choix :

- des rasters normalisés
- des rasters initiaux pour conserver les valeurs

En sortie de ce script un *RasterStack* contenant tous les indices et métriques calculés et sélectionnés en fonction de leur corrélation est créé. Il peut s'agir des rasters initiaux avec les valeurs brutes ou des rasters normalisés, selon le besoin pour les analyses futures. L'ensemble des rasters calculés peuvent être utilisés de façon combinée ou individuellement.

Partie 4 : Changement d'échelle

Les scripts `4_Calcul_indices_Sentinel2.R` et `5_Calcul_metriques_LidarHD.R` ont été créés à partir des scripts précédents, seule la façon de lire les données d'origine est modifiée. La sélection des indices est inclus dans chacun.

Indice	Nom	Formule	Utilisation principale	Référence	Bandes utilisées															
					Bleu	Vert	Rouge	NIR	RedEdge	Bleu 444	Vert 531	Rouge 650	RedEdge 705	RedEdge 740						
HUE	Overall Hue Index	$\text{atan}(2 \cdot (\text{bleu} - \text{vert} - \text{rouge}) / 30.5 \cdot (\text{vert} - \text{rouge}))$	Cartographie des sols nus et de l'eau	Escadafal et al., 1994	■	■	■													
HUE_s	Overall Hue Index - Sentinel 2	$\text{atan}(2.0 \cdot \text{B04} - \text{B03} - \text{B02}) / (30.5 \cdot (\text{B03} - \text{B02}))$	Cartographie des sols nus et de l'eau	Index DataBase*	■	■	■													
I	Intensity	$(1.0 / 30.5) \cdot (\text{B04} + \text{B03} + \text{B02})$	Cartographie des sols nus et de l'eau	Index DataBase*	■	■	■													
IF	Fluorescence Index	$(2.0 \cdot \text{B04} - \text{B03} - \text{B02}) / (\text{B03} - \text{B02})$	Estimation de la fluorescence des plantes	Index DataBase*	■	■	■													
IOR	Iron Oxide Ratio	rouge/bleu	Analyse des pigments et des sols	Segal, 1982	■	■	■													
Ipca	Principal Component Analysis Index	$0.994 \cdot \text{abs}(\text{rouge} - \text{bleu}) + 0.961 \cdot \text{abs}(\text{vert} - \text{bleu}) + 0.914 \cdot \text{abs}(\text{vert} - \text{rouge})$	Analyse des sols nus	Saberion et al., 2014	■	■	■													
IPVI	Infrared Percentage Vegetation Index	$\text{NIR} / ((\text{NIR} + \text{rouge}) / 2) \cdot (\text{NDVI} + 1)$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020			■	■	■											
IR550	Inverse reflectance 550	$\text{B03} \wedge (-1.0)$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
IR700	Inverse reflectance 700	$\text{B05} \wedge (-1.0)$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
LCI	Leaf Chlorophyll Index	$(\text{B08} - \text{B05}) / (\text{B08} + \text{B04})$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
LogR	Log Ratio	$\log(\text{NIR} / \text{rouge})$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020			■	■	■											
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	$((\text{NIR} - \text{rouge}) - 0.2 \cdot (\text{NIR} - \text{vert})) \cdot (\text{NIR} / \text{rouge})$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*		■	■	■	■											
MCARI_MTVI2	MCARI/MTVI2	$((\text{B05} - \text{B04}) - 0.2 \cdot (\text{B05} - \text{B03})) \cdot (\text{B05} / \text{B04}) / (1.5 \cdot (1.2 \cdot (\text{B08} - \text{B03}) - 2.5 \cdot (\text{B04} - \text{B03})) / \sqrt{\text{sqrr}(2.0 \cdot \text{B08} + 1.0) \wedge 2.0 - (6.0 \cdot \text{B08} - 5.0 \cdot \text{sqrr}(\text{B04})) - 0.5}))$	Estimation de la teneur en chlorophylle	Index DataBase*																
MCARI_OSAVI	MCARI/OSAVI	$((\text{B05} - \text{B04}) - 0.2 \cdot (\text{B05} - \text{B03})) \cdot (\text{B05} / \text{B04}) / ((1.0 + 0.16) \cdot (\text{B08} - \text{B04}) / (\text{B08} + \text{B04} + 0.16))$	Combinaison MCARI et OSAVI pour minimiser les effets du sol - Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
MCARI_s	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index - Sentinel 2	$((\text{B05} - \text{B04}) - 0.2 \cdot (\text{B05} - \text{B03})) \cdot (\text{B05} / \text{B04})$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
MCARI1	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index 1	$1.2 \cdot (2.5 \cdot (\text{B08} - \text{B04}) - 1.3 \cdot (\text{B08} - \text{B03}))$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
MCARI2	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index 2	$1.5 \cdot (2.5 \cdot (\text{B08} - \text{B04}) - 1.3 \cdot (\text{B08} - \text{B03})) / \sqrt{\text{sqrr}(2.0 \cdot \text{B08} + 1.0) \wedge 2.0 - (6.0 \cdot \text{B08} - 5.0 \cdot \text{sqrr}(\text{B04})) - 0.5}$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
mNDVI	Modified NDVI	$(\text{B08} - \text{B04}) / (\text{B08} + \text{B04} - 2.0 \cdot \text{B01})$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$0.5 \cdot ((2 \cdot \text{NIR} + 1) - \sqrt{(2 \cdot \text{NIR} + 1) \wedge 2 - 8 \cdot (\text{NIR} - \text{rouge})})$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020																
MSAVIhyper	Modified Soil Adjusted Vegetation Index hyper	$0.5 \cdot ((2.0 \cdot \text{B08} + 1.0) - \sqrt{(2.0 \cdot \text{B08} + 1.0) \wedge 2.0 - 8.0 \cdot (\text{B08} - \text{B04})})$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
mSR	Modified Simple Ratio	$(\text{B08} - \text{B01}) / (\text{B04} - \text{B01})$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
MSR670	Modified Simple Ratio 670,800	$(\text{B08} / \text{B04} - 1.0) / \sqrt{\text{sqrr}(\text{B08} / \text{B04} + 1.0)}$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
MSRNIR_red	Modified Simple Ratio NIR/RED	$(\text{NIR} / \text{rouge} - 1) / \sqrt{\text{sqrr}(\text{NIR} / \text{rouge} + 1)}$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020																
MVARI	Modified Visible Atmospherically Resistant Vegetation Index	$(\text{vert} - \text{bleu}) / (\text{vert} + \text{rouge} - \text{bleu})$	Surveillance de la végétation	Yang et al., 2008	■	■	■	■	■											
NDI	Normalised Difference Index	$128 \cdot (((\text{vert} - \text{rouge}) / (\text{vert} + \text{rouge})) + 1)$	Surveillance de la végétation	McNairn et Protz, 1993	■	■	■	■	■											
NDRE	Normalized Difference Red-Edge Index	$(\text{NIR} - \text{rededge}) / (\text{NIR} + \text{rededge})$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020																
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(\text{NIR} - \text{rouge}) / (\text{NIR} + \text{rouge})$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020																
NDWI	Normalized Difference Water Index	$(\text{green} - \text{NIR}) / (\text{green} + \text{NIR})$	Humidité	McFeeters, 1996																
NGBDI	Normalised Green Blue Difference Index	$(\text{vert} - \text{bleu}) / (\text{vert} + \text{bleu})$	Surveillance de la végétation et de l'eau	Du et Noguchi, 2017	■	■	■	■	■											
NGRDI	Normalised Green Red Difference Index	$(\text{vert} - \text{rouge}) / (\text{vert} + \text{NIR} + \text{rouge} + \text{vert})$	Surveillance de la végétation	Gitelson et al., 2002		■	■	■	■											
NormG	Normalised Green	$\text{vert} / (\text{NIR} + \text{rouge} + \text{vert})$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020		■	■	■	■											
NormNIR	Normalised NIR	$\text{NIR} / (\text{NIR} + \text{rouge} + \text{vert})$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020			■	■	■											
NormR	Normalised Red	$\text{rouge} / (\text{NIR} + \text{rouge} + \text{vert})$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020			■	■	■											
OSAVI	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	$(1 + 0.16) \cdot (\text{NIR} - \text{rouge}) / (\text{NIR} + \text{rouge} + 0.16)$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
PPR	Normalized Difference 550/450 Plant pigment ratio	$(\text{B03} - \text{B01}) / (\text{B03} + \text{B01})$	Cartographie des sols nus et de la végétation	Index DataBase*																
PRI	Photochemical Reflectance Index	rouge/vert	Surveillance de la végétation	Index DataBase*		■	■	■	■											
PSNdc2	Normalized Difference 800/470 Pigment specific normalised difference C2	$(\text{B08} - \text{B02}) / (\text{B08} + \text{B02})$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*	■	■	■	■	■											
PVR	Normalized Difference 550/650 Photosynthetic vigour ratio	$(\text{B03} - \text{B04}) / (\text{B03} + \text{B04})$	Réflectance du pic végétal - Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
RBNDVI	Red-Blue NDVI	$(\text{NIR} - (\text{rouge} + \text{bleu})) / (\text{NIR} + (\text{rouge} + \text{bleu}))$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*	■	■	■	■	■											
RCC	Red Chromatic Coordinate Index	$\text{rouge} / (\text{rouge} + \text{vert} + \text{bleu})$	Surveillance de la végétation et des sols nus	De Swaef et al., 2021	■	■	■	■	■											
RDVI	RDVI	$(\text{B08} - \text{B04}) / \sqrt{\text{sqrr}(\text{B08} + \text{B04})}$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
Rededge1	Red edge 1	$\text{B05} / \text{B04}$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
Rededge2	Red edge 2	$(\text{B05} - \text{B04}) / (\text{B05} + \text{B04})$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
RGBVI	Red Green Blue Vegetation Index	$(\text{vert} \wedge 2 - (\text{bleu} \cdot \text{rouge})) / (\text{vert} \wedge 2 + (\text{bleu} \cdot \text{rouge}))$	Surveillance de la végétation	Bending et al., 2015	■	■	■	■	■											
RR11	RR11	$\text{NIR} / \text{rededge}$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020																

Indice	Nom	Formule	Utilisation principale	Référence	Bandes utilisées															
					Bleu	Vert	Rouge	NIR	RedEdge	Bleu 444	Vert 531	Rouge 650	RedEdge 705	RedEdge 740						
SAVI	Soil Ajusted Vegetation index II	$((1 + 0.5) * (NIR - rouge)) / (NIR + rouge + 0.5)$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
SAVI _s	Soil Adjusted Vegetation Index - Sentinel 2	$(Bo8 - Bo4) / (Bo8 + Bo4 + 0.725) * (1.0 + 0.725)$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
SAVII	Soil Ajusted Vegetation Index	$(1.5 * (vert - rouge)) / (vert + rouge + 0.5)$	Surveillance de la végétation	Li et al., 2010																
SCI		$(rouge - vert) / (rouge + vert)$	Cartographie des sols nus et de l'eau																	
SI	Spectral Slope Saturation Index	$(rouge - bleu) / (rouge + bleu)$	Cartographie des sols nus et de l'eau	Escadafal et al., 1994																
SIP11	Structure Intensive Pigment Index 1	$(Bo8 - Bo1) / (Bo8 - Bo4)$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
SIP13	Structure Intensive Pigment Index 3	$(Bo8 - Bo2) / (Bo8 - Bo4)$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
SR440_740	Simple Ratio 440/740	$Bo1 / Bo6$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
SR520_670	Simple Ratio 520/670	$Bo2 / Bo4$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
SR735_710	Simple Ratio 735/710	$Bo6 / Bo5$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
SRQT_IR_R	Racine NIR/red	$\sqrt{NIR / rouge}$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
SRR_NIR	Simple Ratio RED / NIR	$rouge / NIR$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020																
TCARI	Transformed Chlorophyll Absorbion Ratio	$3.0 * ((Bo5 - Bo4) - 0.2 * (Bo5 - Bo3) * (Bo5 / Bo4))$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
TCARI_OSAVI	TCARI/OSAVI	$TCARI / ((1.0 + 0.16) * (Bo8 - Bo4) / (Bo8 + Bo4 + 0.16))$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
TCI	Triangular chlorophyll index	$1.2 * (Bo5 - Bo3) - 1.5 * (Bo4 - Bo3) * \sqrt{Bo5 / Bo4}$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
TGI	Triangular Greenness Index	$vert - 0.39 * rouge - 0.61 * bleu$	Surveillance de la végétation	Hunt et al., 2013																
TVI	Transformed Vegetation Index	$\sqrt{((Bo4 - Bo3) / (Bo4 + Bo3)) + 0.5}$	Surveillance de la végétation	Index DataBase*																
VARI	Visible Atmospherically Resistant Vegetation Index	$(vert - rouge) / (vert + rouge - bleu)$	Surveillance de la végétation	Gitelson et al., 2002																
VEG	Vegetative Index	$vert / ((rouge \wedge 0.667) * (bleu \wedge 0.334))$	Surveillance de la végétation	Wang et al., 2015																
vNDVI	Visible NDVI	$0.5268 * ((r \wedge -0.1294) * (v \wedge 0.3389) * (b \wedge -0.3118))$	NDVI ajusté - Surveillance de la végétation	Costa et al., 2020																
WDRVI	Wide Dynamic Range Vegetation Index	$(0.1 * NIR - rouge) / (0.1 * NIR + rouge)$	Surveillance de la végétation	Ramos et al., 2020																
WI	Woebbecke Index	$(vert - bleu) / (rouge - vert)$	Surveillance de la végétation	Woebbecke et al., 1995																

* r = rouge / (rouge+vert + bleu) ; b= bleu / (rouge + vert + bleu) ; v = vert/(rouge+vert+bleu)

*Index DataBase (Henrich et al., 2012) cite pour chaque indice mentionné l'article de référence

Tableau des métriques :

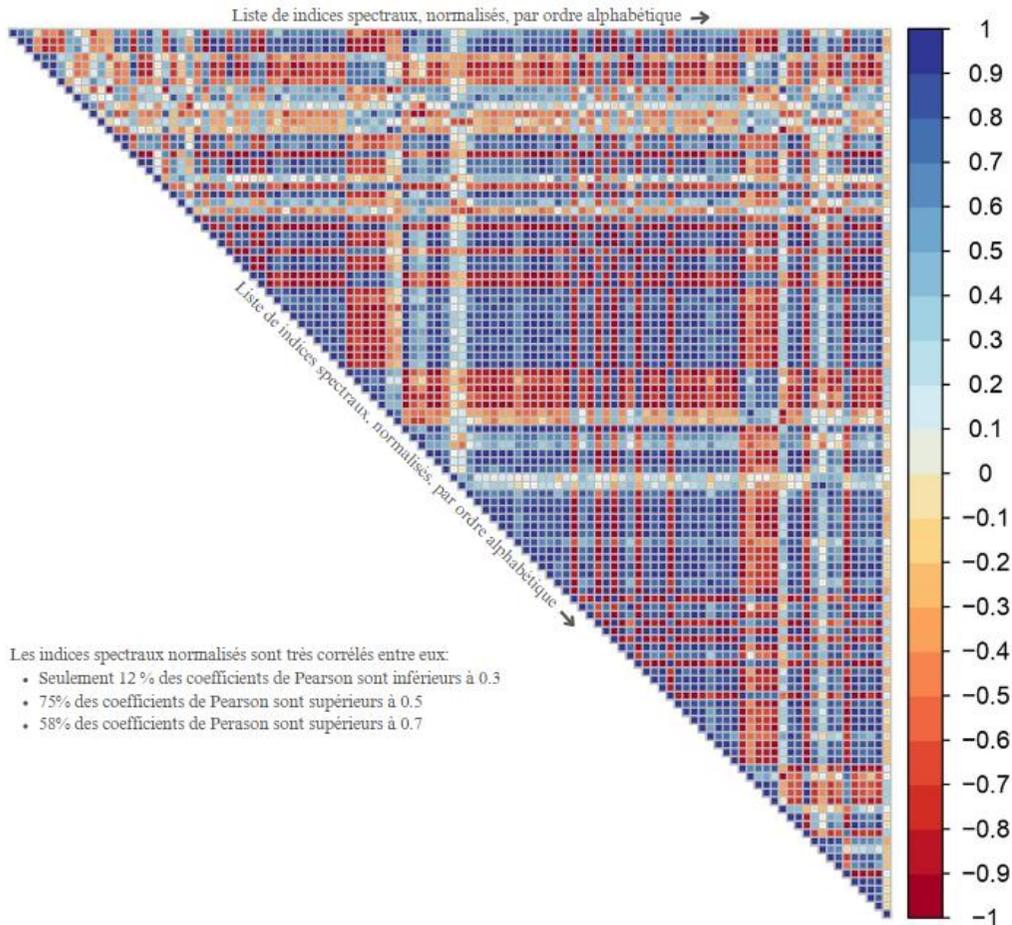
Couverture de la canopée	can_cov	Nombre de retour au-dessus de la hauteur moyenne dans une cellule		Nuage Normalisé
Forme 3D				
Courbure	Curvature	Rapport entre la plus petite valeur propre et la somme des valeurs propres d'une cellule	Weinmann et al. (2017)	Nuage Normalisé
Linéarité	Linearity	Rapport de la différence entre les valeurs propres les plus grandes et les moyennes valeurs propres et les plus grandes valeurs propres dans une cellule		Nuage Normalisé
Planéité	Planarity	Rapport entre la différence entre les valeurs propres moyennes et les plus petites et la plus grande valeur propre dans une cellule		Nuage Normalisé
Sphéricité	sphericity	Rapport entre les plus petites et les plus grandes valeurs propres dans une cellule		Nuage Normalisé
Anisotropie	anisotropy	Rapport de la différence entre la plus grande et la plus petite et la plus grande valeur propre dans une cellule		Nuage Normalisé
Variabilité verticale				
Ecart type de la hauteur	zstd	Écart-type de z dans une cellule	Zlinszky et al. (2012)	Nuage Normalisé
Variance de la hauteur	zvar	Variance de z dans une cellule		Nuage Normalisé
Rapport du relief de la canopée	canrelrat	Rapport entre la différence entre z moyen et minimum et la différence entre z maximum et minimum z	Barnes, Islam et Auer, (2016)	Nuage Normalisé
Rapport de densité verticale	vertdenrat	Rapport entre z maximal et médian et z maximal dans une cellule		Nuage Normalisé
Inclinaison de la hauteur	zskew	Asymétrie de z dans une cellule	Bae et al. (2014)	Nuage Normalisé
Kurtosis de hauteur	zkurto	Kurtosis de z dans une cellule		Nuage Normalisé
Coefficient de variation de la hauteur	zcoeffvar	Coefficient de variation de z dans une cellule		Nuage Normalisé
Indice de Simpson	simpson	1 divisé par la somme des carrés de la proportion des points situés à moins de 0,5 m de hauteur dans une cellule		Nuage Normalisé
Indice de Shannon	shannon	La somme négative de la proportion de points dans les couches de 0,5 m de hauteur multipliée par le logarithme de la proportion de points dans les couches de 0,5 m de hauteur dans une cellule		Nuage Normalisé
Variabilité horizontale				
Ecart-type du MNS	sd_dsm	Écart-type du modèle numérique de surface basé sur un voisinage 3 × 3	Zlinszky et al. (2012)	Les deux
Variance du MNS	var_dsm	Variance du modèle numérique de surface basé sur 3 × 3 voisinage		Les deux
Rugosité du MNS	rough_dsm	La différence maximale du modèle numérique de surface basé sur 4 pixels voisins		Les deux
Indice de position topographique du MNS	tpi_dsm	Différence entre un pixel central et la moyenne de 4 cellules voisines	Wilson et al. (2007)	Les deux
Indice de rugosité du terrain de MNS	tri_dsm	Différence moyenne entre un pixel central et 4 cellules voisines		Les deux
Hauteur				
Hauteur maximale	zmax	Maximum de z	Hyypä et al. (2008)	Nuage normalisé
Hauteur moyenne	zmean	Moyenne de z		Nuage normalisé
Hauteur médiane	zmedian	Médiane de z		Nuage normalisé
25ème percentile de la hauteur	z025quantile	25e centile de z		Nuage normalisé
75ème percentile de la hauteur	z075quantile	75e centile de z		Nuage normalisé
90ème percentile de la hauteur	z090quantile	90e centile de z		Nuage normalisé
Topographie				
Aspect	aspect_dtm	L'orientation du modèle numérique de terrain sur la base de 4 pixels voisins	Wilson et al. (2007)	Nuage normalisé
Rugosité du terrain	rough_dtm	La différence maximale du modèle numérique de terrain basé sur 4 pixels voisins		Nuage normalisé
Slope	slope_dtm	Pente		
Les lignes du tableau ci-dessous reprennent les métriques du package LidR (Roussel et al.,2021)				
Variabilité de la hauteur	zentropy	Entropie de Z	LidR	Nuage Standard
Pourcentage de retour au dessus de la hauteur moyenne	pzabovemean	Pourcentage de retour au dessus du Z moyen	LidR	Nuage Standard
Somme de l'intensité de chaque retour	itot	Somme de l'intensité de chaque retour	LidR	Nuage Standard
Intensité maximale	imax	I max	LidR	Nuage Standard

Les scripts présentés en annexe 3 permettent d'ajouter facilement de nouveaux indices ou métriques.

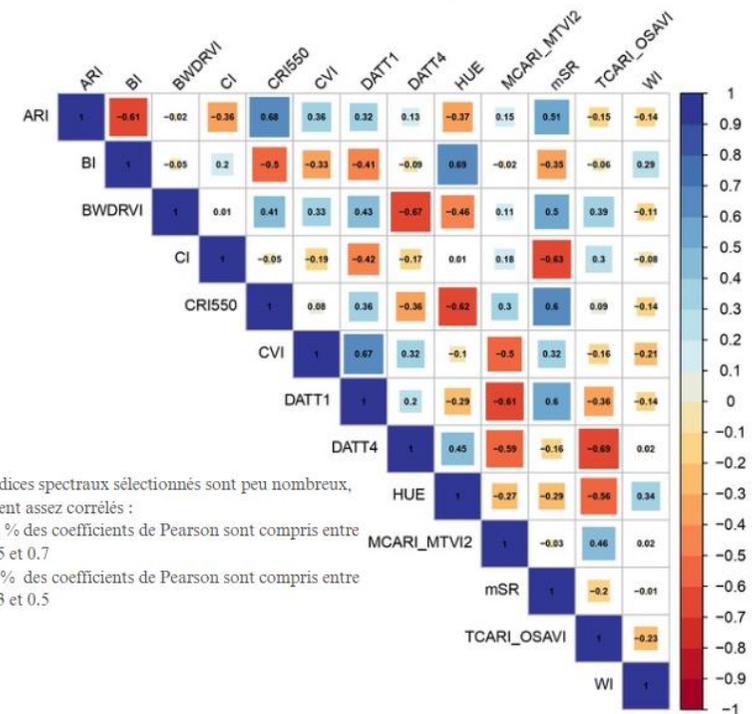
Annexe 5 : Matrices de corrélation

Les matrices de corrélation des indices spectraux :

Matrice de corrélation des indices spectraux calculés sur le site de la Cisse avec les données de la Micasense RedEdge-MX Dual (24/04/24)

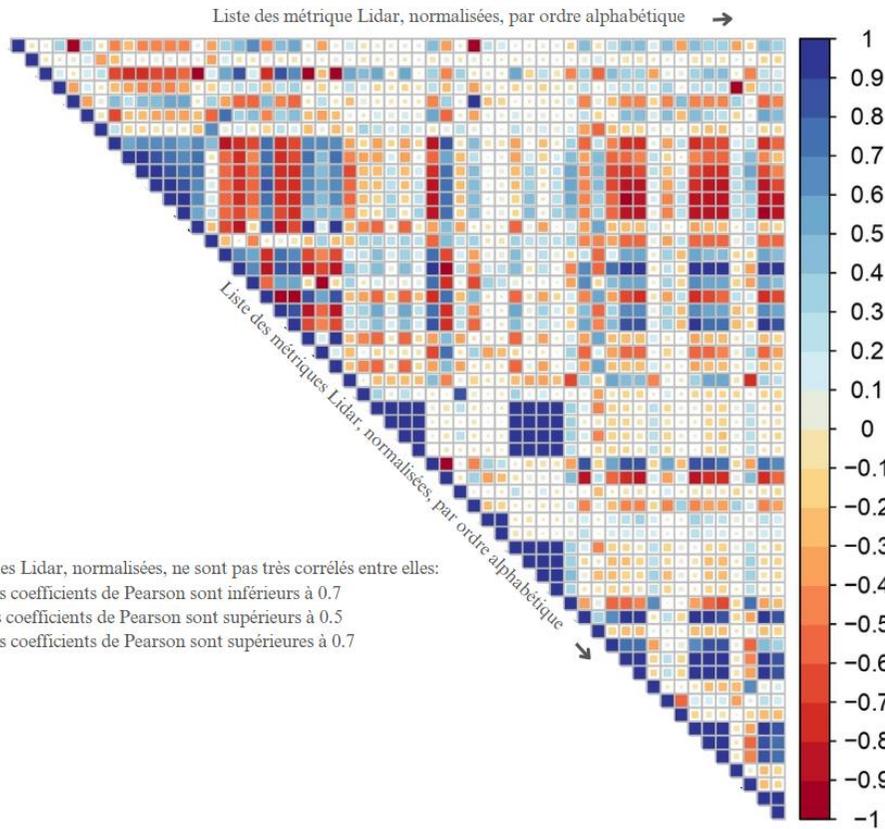


Matrice de corrélation des indices spectraux sélectionnés sur le site de la Cisse avec les données de la Micasense RedEdge-MX Dual (24/04/24)

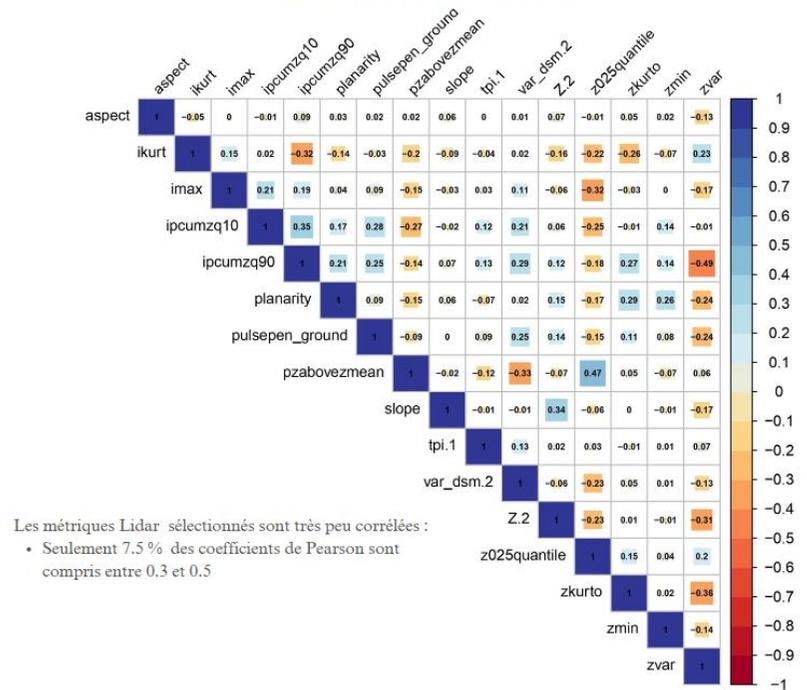


Les matrices de corrélation des métriques Lidar :

Matrice de corrélation des métriques Lidar calculées sur le site de la Cisse avec les données du L1 (24/04/24)



Matrice de corrélation des métriques Lidar sélectionnées sur le site de la Cisse avec les données du L1 (24/04/24)



Liste des figures

Figure 1 : Présentation des sites d'étude de la Cisse et du Louroux (<i>BD Topo de l'IGN 2024, RPG 2022 - ASP</i>).....	15
Figure 2 : Graphique synthétisant les vols réalisés pour les tests de sensibilité du capteur DJI Zenmuse L1	17
Figure 3 : Densité moyenne des nuages de points Lidar correspondant aux hauteurs de vol 50 et 100 m sur le site test de Fay.....	18
Figure 4 : Comparaison d'une coupe dans les nuages de points pour les différentes hauteurs de vol sur le site test de Fay.....	18
Figure 5 : Comparaison de coupes dans les nuages de points pour les différentes vitesses de vol sur le site test de Fay.....	19
Figure 6 : Comparaison de l'intensité en fonction du mode de balayage choisi sur une surface en herbe homogène.....	20
Figure 7 : Comparaison d'un nuage reconstruit avec et sans recalage altimétrique.....	21
Figure 8 : Représentation des cibles sur le nuage colorisé avec l'information RVB	22
Figure 9 : Montage du capteur Micasense RedEdge-P Dual et du DLS 2 sur le drone DJI Matrice 300 RTK (<i>Micasense</i>).....	24
Figure 10 : Zones d'acquisition sur le site de la Cisse du 15 avril 2024 avec le drone DJI Matrice 300 RTK.	27
Figure 11 : Influence des protocoles d'acquisitions établis pour le Lidar Cube240 et le L1 avec l'aspect du cours d'eau sur les MNT créés à partir des nuages de points	28
Figure 12 : Anomalie détectée sur l'orthoimage de l'acquisition multispectrale du 15/04/2024 en raison des conditions d'ensoleillement	29
Figure 13 : Exemple d'indice spectral calculé à différentes résolution - le NDVI.....	33

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison de la densité de points en fonction du type de milieu, du nombre d'échos enregistrés et de la hauteur de vol	20
--	----

Développement d'une solution combinant des données Lidar et multispectrales pour l'identification de variables environnementales clés caractérisant les services écosystémiques des cours d'eau de tête de bassin.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2024

RESUME

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche s'intéressant aux variables essentielles de biodiversité (EBV) caractérisant les services écosystémiques fournis par les écosystèmes aquatiques aux écosystèmes agricoles environnants. Les données de télédétection avec une haute résolution spatiale offrent la possibilité d'obtenir des informations précises et détaillées caractérisant ces milieux. Une attention particulière doit être portée à l'acquisition et aux traitements des données car leur qualité impactera celle des analyses futures. Les protocoles d'acquisition et de traitement rigoureux et optimisés établis ont permis de réaliser des acquisitions Lidar et multispectrales sur des sites d'intérêt scientifique afin de caractériser au mieux la topographie et la végétation présente. L'étude confirme la faisabilité de la combinaison des données Lidar et multispectrales et les données acquises constituent une base solide pour les études scientifiques qui seront réalisées à l'avenir sur les sites étudiés.

Mots clés : Télédétection, Lidar, Multispectral, Photogrammétrie, Métriques, Indices.

SUMMARY

This work is part of a research project focusing on Essential Biodiversity Variables (EBV) that characterize the ecosystem services provided by aquatic ecosystems to the surrounding agricultural ecosystems. High-resolution remote sensing data offer the potential to obtain precise and detailed information about these environments. Particular attention must be given to data acquisition and processing, as their quality will impact the quality of future analyses. Rigorous and optimized acquisition and processing protocols established enabled successful Lidar and multispectral data collection on scientifically significant sites, in order to best characterize the topography and vegetation. The study confirms the feasibility of combining Lidar and Multispectral data and the acquired data constitute a robust basis for future scientific studies on the studied sites.

Key words: Remote sensing, Lidar, Multispectral, Photogrammetry, Metrics, Index.