

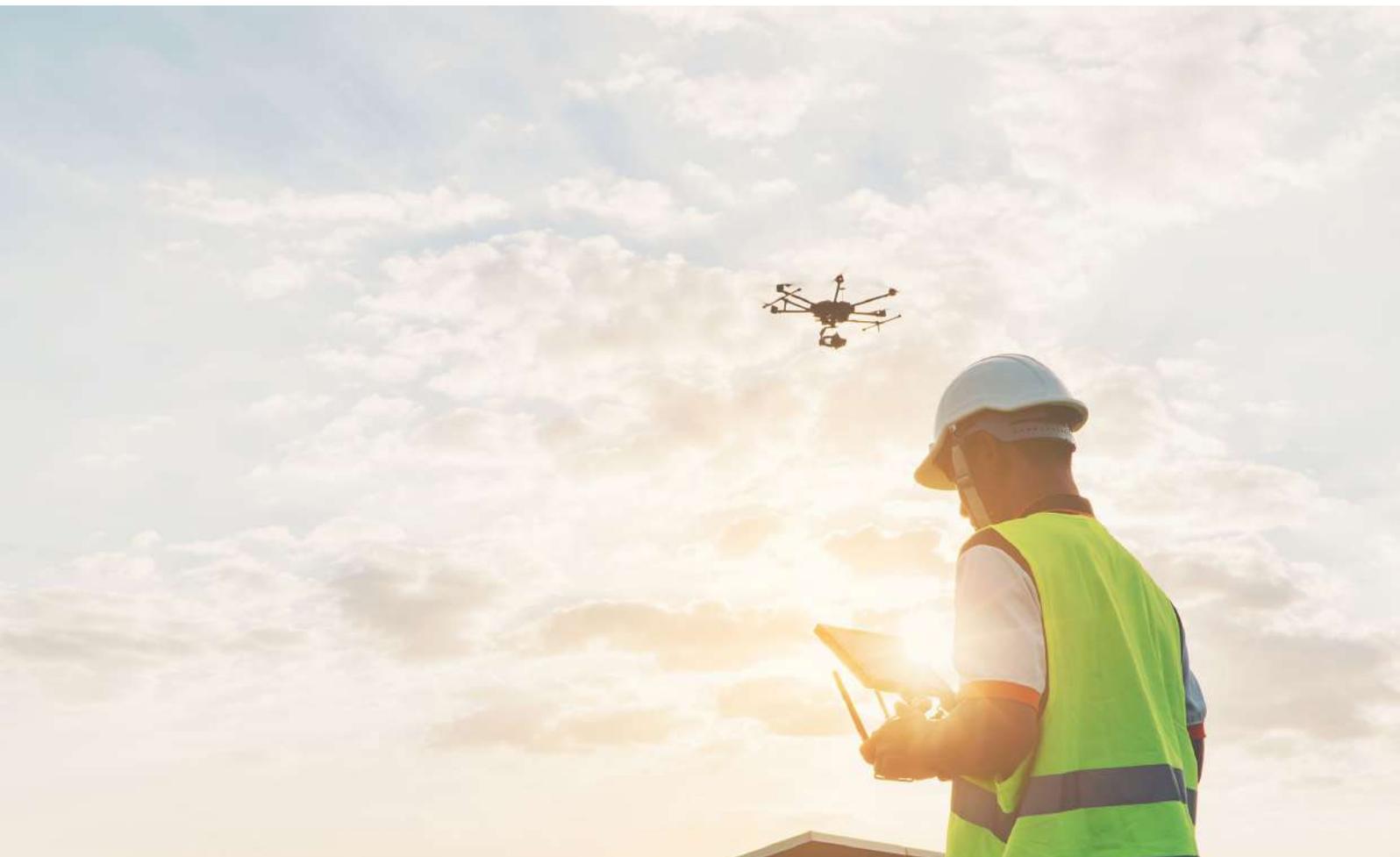


Co-funded by  
the European Union

# MODULE 09

PROGRAMME DE FORMATION

# LIDAR



Dirección General de Formación  
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA,  
HACIENDA Y EMPLEO



**BZB**  
Bildungszentren des  
Baugewerbes e.V.





Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

# Table des matières

<b>Table des matières .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Objectifs du module .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Introduction au Lidar .....</b>	<b>6</b>
2.1 Qu'est-ce que le LIDAR ? .....	6
2.2 Types de LiDAR.....	8
Principales caractéristiques des scanners TLS et ALS.....	8
2.3 Composants du système LiDAR (ALS).....	11
<b>3. Données LIDAR.....</b>	<b>13</b>
3.1 Types de données enregistrées lors de la numérisation LiDAR.....	13
3.2 Format et structure des données.....	15
<b>4. Applications LIDAR.....</b>	<b>17</b>
4.1 Cartographie et inspection/analyse des sites.....	18
4.2 Levé sous feuillage dense .....	19
Pénétration du couvert végétal avec LIDAR.....	19
LiDAR multispectral (MS LiDAR).....	22
4.3 Inspections de sécurité et évaluations de l'état des structures.....	25
4.4 Modélisation des inondations et évaluations de l'impact sur l'environnement.....	26
4.5 Gestion des services publics et des infrastructures .....	27
<b>5. Méthodologie de capture et de traitement des données LIDAR sur le terrain .....</b>	<b>28</b>
5.1 Matériel.....	28
5.2 Configuration avant le vol.....	31
5.3 Capture d'images en vol et logiciel de capture.....	34
5.4 Traitement et logiciels.....	36
5.5 Sortie de données.....	38
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau des figures.....</b>	<b>40</b>

## **DRONES4VET : participants et auteurs du projet Erasmus+**

### **Equipe du CMQE HEREC Occitanie. France:**

Régis Lequeux - professeur et ingénieur en génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes -  
coordinateur des 10 modules

Nicolas Privat - professeur et ingénieur en génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes

Eric Remola - professeur de génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes

Nicolas Vassart - professeur et docteur en génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes

Valerie Poplin - Directrice exécutive du CMQE

### **Equipe du MTU Ireland :**

Sean Carroll, Maître de conférence, ingénieur en génie civil

Michal Otreba Inz, Maître de conférence, ingénieur en génie civil

coordinateurs des "Levelling & Follow-up sessions for educators"

### **University of Applied Sciences Kufstein Tirol, Autriche**

Emanuel Stocker, Enseignant-chercheur en gestion des infrastructures et de  
l'immobilier. Manuel coordinateur.

Sarah Plank, Contrôleur de la Recherche et Développement

### **Equipe CRN Paracuellos. (DG Formación. Comunidad de Madrid) Espagne :**

José Manuel García del Cid Summers, Directeur

Daniel Sanz, directeur de Dron-Arena

Santos Vera, technicien

Jorge Gómez Sal, chef de l'unité technique

Fernando Gutierrez Justo, Erasmus coordinateur

Promoteurs du projet

### **Equipe BZB Düsseldorf. Allemagne :**

Frank Bertelmann-Angenendt, chef de projet

Markus schilaski, chef de projet

### **Equipe DEX. Espagne – Gestion Erasmus+ :**

Ainhoa Perez

Ignacio Gomez Arguelles

Diego Diaz Mori

Yvan Corbat

# 1. Objectifs du module

Ce module présente le ***LiDAR*** et la manière dont cette technologie de télédétection peut être utilisée en conjonction avec un drone pour capturer des données de terrain. La ***terminologie clé concernant le balayage LiDAR*** est identifiée, ainsi que les principales méthodes permettant de réaliser un balayage LiDAR. Un ***exemple illustré*** des étapes à suivre pour réaliser avec succès un ***balayage LiDAR*** à l'aide d'un drone est expliqué, ainsi que la manière dont les données résultantes peuvent être traitées. Enfin, quelques exemples des nombreuses ***applications dans l'industrie de la construction*** pour lesquelles cette technologie peut être utilisée en conjonction avec les drones sont discutés.

## 2. Introduction au Lidar

### 2.1 Qu'est-ce que le LIDAR ?

**LIDAR** (light detection and ranging) est une méthode de télédétection active qui utilise un laser ou de la lumière pour mesurer des objets. Dans un système LiDAR, les distances (ou portées) d'un objet sont mesurées au moyen d'impulsions lumineuses émises par un scanner laser à déclenchement rapide. Lorsqu'une impulsion lumineuse atteint une cible, une partie de ses photons est réfléchi vers le scanner où elle peut être mesurée et enregistrée. L'"**impulsion**" LiDAR désigne les photons de lumière émis et ceux qui sont réfléchis ou retournés sont appelés "**écho**" ou "retour". Les scanners LiDAR peuvent être montés sur un certain nombre de plates-formes différentes pour les opérations de numérisation, y compris des trépieds ou des aéronefs (drones, avions, etc.), comme illustré à la figure 1.

Un système LiDAR mesure l'emplacement du scanner, la direction ou l'angle de la lumière émise et le temps nécessaire pour que la lumière se rende à l'objet et en revienne. La vitesse de la lumière et l'emplacement du scanner étant connus, le temps enregistré entre l'émission de la lumière (impulsion) et le retour réfléchi (écho) peut être utilisé pour calculer l'emplacement 3D (coordonnées x, y, z) de l'objet réfléchissant à l'aide de la géométrie de base. Au cours d'un balayage LiDAR, un laser peut émettre des millions d'impulsions lumineuses horodatées en enregistrant le moment et l'endroit où elles se reflètent, produisant ainsi un nuage de points 3D précis de l'objet ou de la zone cible. Ces données peuvent ensuite être utilisées pour développer des modèles numériques afin d'estimer la structure 3D de l'objet ou de la zone cible.

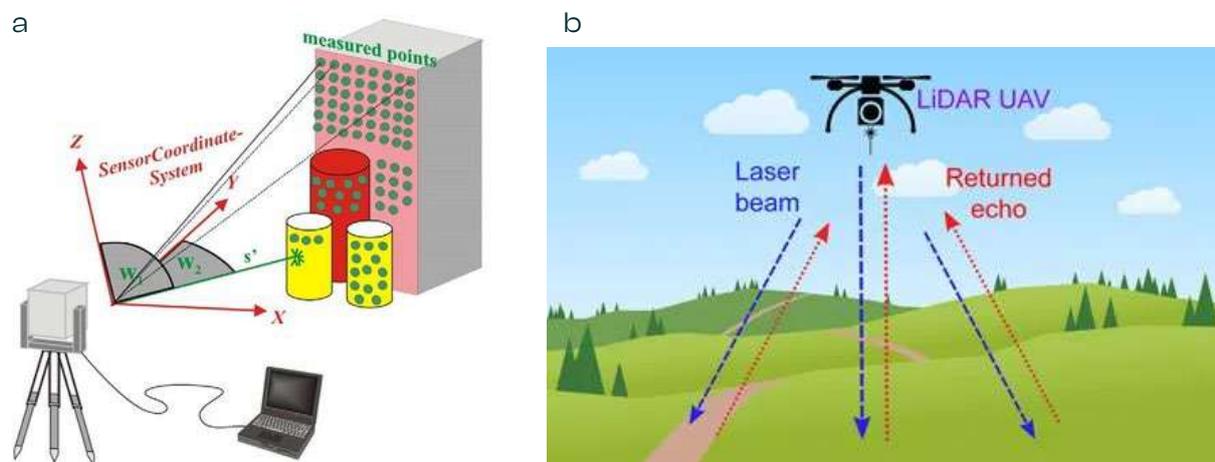


Figure 1 Balayage LIDAR (a) Scanner laser terrestre sur trépied<sup>4</sup> (b) Balayage laser monté sur un drone - balayage laser aéroporté<sup>5</sup>.

Le LiDAR, en tant que technique de télédétection, est considéré comme un exemple de **technologie active**, tandis que la photographie aérienne, qui peut être utilisée dans le cadre de la photogrammétrie, est considérée comme une **technologie passive**. Cette distinction essentielle s'explique par le fait que la photographie s'appuie sur la lumière du soleil ou le rayonnement pour se refléter sur un objet extérieur, alors que les systèmes LiDAR émettent leur propre rayonnement et mesurent la manière dont ce rayonnement se reflète sur une cible. L'utilisation du LiDAR n'est donc pas limitée aux heures de lumière du jour et peut être moins perturbée par les effets de l'environnement.

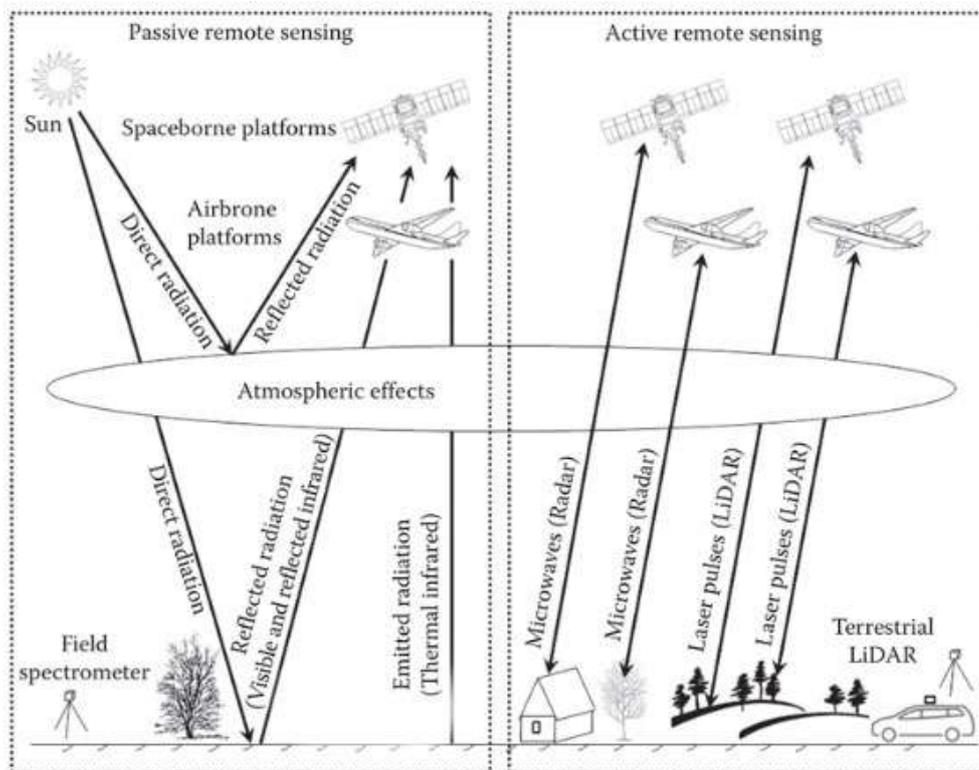


Figure 2 Télédétection passive et active<sup>3</sup>

## 2.2 Types de LiDAR

Le LiDAR peut être classé en fonction de la façon dont le système est installé et fonctionne. Parmi les principaux types, on peut citer

- Le balayage laser terrestre (**TLS**) est un système de balayage laser qui fonctionne au sol. Il peut s'agir d'un système statique (c'est-à-dire monté sur un trépied) ou dynamique (véhicule/dispositif mobile).
- Airborne LiDAR (**ALS**) - il s'agit d'un système de balayage laser attaché à un aéronef tel qu'un drone, un avion ou un hélicoptère.
- Bathymétrie - il s'agit d'un type de balayage laser qui peut être utilisé pour pénétrer la surface de l'eau (jusqu'à environ 50 m en eau très claire).
- Satellite LiDAR - comme son nom l'indique, il s'agit d'incorporer des scanners sur des satellites qui peuvent non seulement scanner la surface de la terre mais aussi l'atmosphère.

### Principales caractéristiques des scanners TLS et ALS

Dans le secteur de la construction, les deux principales techniques de balayage LiDAR fréquemment employées sont le **TLS** et l'**ALS**, qui peuvent toutes deux être utilisées pour capturer des données spatiales tridimensionnelles de la surface et des structures de la Terre. Le balayage laser terrestre sur site implique généralement l'utilisation de scanners laser montés sur une surface ou sur un trépied, placés stratégiquement autour du site ou de l'objet d'intérêt et déplacés le cas échéant après chaque balayage. La figure 3 illustre certains des composants clés d'un tel système, qui comprend un scanner capable de tourner à 360 degrés horizontalement (c'est-à-dire autour de l'axe vertical) et une source laser qui émet rapidement de la lumière, laquelle est généralement réfléchiée par un miroir qui tourne à 360 degrés verticalement (c'est-à-dire autour de l'axe horizontal).

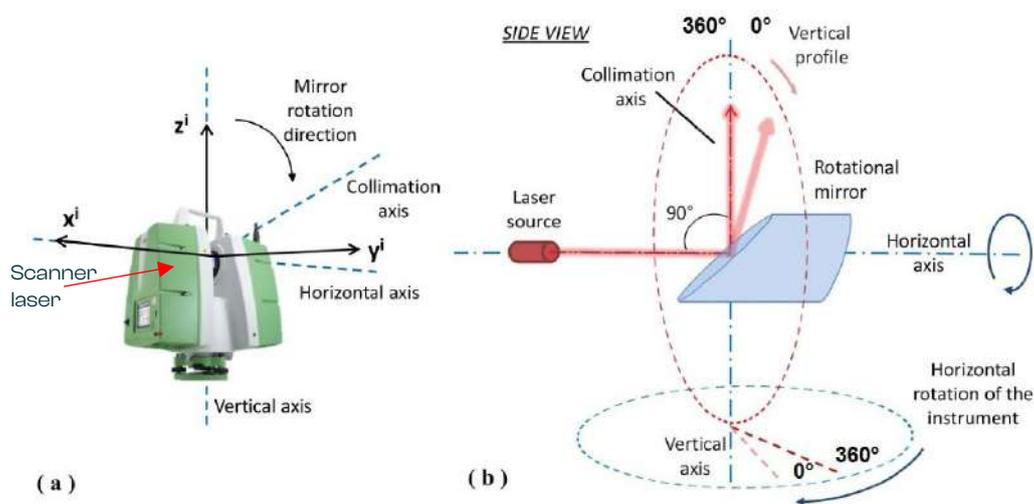


Figure 3 Composants clés d'un TLS monté sur trépied (a) Scanner<sup>6</sup> (b) Miroir rotatif dans le scanner<sup>6</sup>

L'ALS consiste à monter des scanners laser sur des avions, des hélicoptères ou des drones. Ces scanners émettent des impulsions laser vers le sol et les signaux réfléchis sont utilisés pour créer un nuage de points en 3D de la surface et des objets ciblés. La figure 4 illustre certains des composants clés des systèmes ALS, qui comprennent une unité de mesure de l'inertie (IMU) pour suivre le mouvement de l'avion (tangage, roulis et lacet) et une antenne GNSS pour l'enregistrement précis du positionnement (altitude et coordonnées X,Y). La section 2.3 présente plus en détail les principaux composants d'un système ALS.

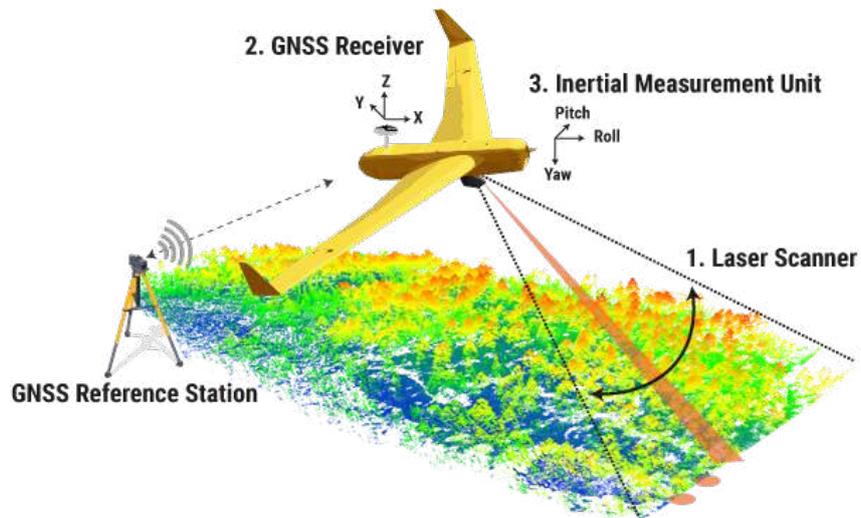


Figure 4 Composants clés d'un système SLA<sup>16</sup>

Les systèmes de balayage laser TLS et ALS présentent chacun des avantages distincts en ce qui concerne la capture de données spatiales tridimensionnelles. Le tableau 1 compare ces deux méthodes de balayage laser en fonction de certains critères clés à prendre en compte avant de capturer des données spatiales sur le terrain. Certaines des applications typiques de chaque méthode sont également identifiées.

Tableau 1 Comparaison des techniques TLS et ALS

	<b>Balayage laser terrestre (TLS)</b>	<b>Balayage laser aéroporté (ALS)</b>
<b>Lieu/Plateforme</b>	Le TLS implique l'utilisation de scanners laser stationnaires installés sur le sol ou montés sur des trépieds. Ces scanners sont placés à des endroits spécifiques sur le terrain ou à proximité des objets d'intérêt.	L'ALS consiste à monter des scanners laser sur des aéronefs tels que les UAS. Ces scanners émettent des impulsions laser vers le sol et les signaux réfléchis sont utilisés pour créer un nuage de points en 3D de la surface de la Terre et des objets.
<b>Gamme</b>	Les scanners laser terrestres ont généralement une portée plus courte que les scanners laser aéroportés. Ils peuvent capturer des données à haute densité dans un rayon limité, généralement de quelques centaines de mètres au maximum.	Les scanners laser aéroportés ont une portée beaucoup plus grande que les scanners terrestres, ce qui leur permet de couvrir de vastes zones, généralement de plusieurs kilomètres carrés, en un seul vol.
<b>Résolution</b>	En raison de la proximité de la cible, la TLS permet d'obtenir une très haute résolution des données. Il peut capturer des détails fins d'objets et de surfaces avec une grande précision.	Les données ALS peuvent avoir une résolution plus faible que les données TLS parce que le scanner capture les données à partir d'une altitude plus élevée, ce qui se traduit par une empreinte plus grande pour chaque impulsion laser. Les progrès de la technologie permettent aujourd'hui d'obtenir une résolution plus élevée, mais il faut trouver un équilibre entre l'intensité ou la résolution du balayage et la zone à couvrir.
<b>Applications</b>	Le TLS est couramment utilisé pour l'arpentage de petites et moyennes zones, la modélisation détaillée de structures, les sites archéologiques, le levé de constructions et les applications industrielles, entre autres.	L'ALS par drone à voilure fixe est idéal pour la cartographie à grande échelle, l'inventaire forestier, l'aménagement du territoire, la modélisation des inondations, la cartographie topographique et d'autres applications nécessitant une couverture étendue de vastes zones. L'ALS par drone multirotor est idéal pour le levé 3D de constructions et la gestion immobilière, entre autres.
<b>Vitesse de collecte des données</b>	La collecte de données TLS est plus lente que le balayage laser aéroporté, car chaque position de balayage doit être configurée et traitée individuellement.	L'ALS peut couvrir rapidement de grandes surfaces, ce qui en fait une méthode efficace pour l'acquisition de données sur des paysages étendus.

Dans le cadre de ce module de formation, seules les exigences et caractéristiques spécifiques des systèmes ALS sont prises en compte pour le reste du module.

## 2.3 Composants du système LiDAR (ALS)

Pour de nombreuses opérations de balayage laser, le système LiDAR est monté sur un avion ou un drone. Les principaux composants d'un tel système sont mis en évidence dans la figure 6 :

- Capteur LiDAR : Des impulsions sont émises par le capteur LiDAR dans les bandes proches de l'infrarouge lorsque l'avion vole. La figure 5 illustre les longueurs d'onde du spectre électromagnétique.

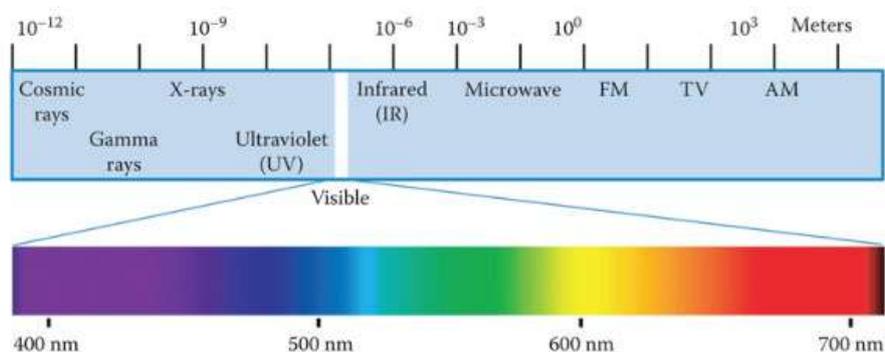


Figure 5 Spectre électromagnétique<sup>3</sup>

- Récepteurs GPS : Les récepteurs GPS suivent l'altitude et la position de l'aéronef ou du drone afin de permettre un positionnement précis de l'aéronef pour le traitement des données.
- Unités de mesure inertielle (IMU) : L'unité de mesure inertielle suit le tangage, le roulis et le lacet de l'aéronef afin de mesurer avec précision le mouvement de l'aéronef et l'émission/le retour des impulsions laser.

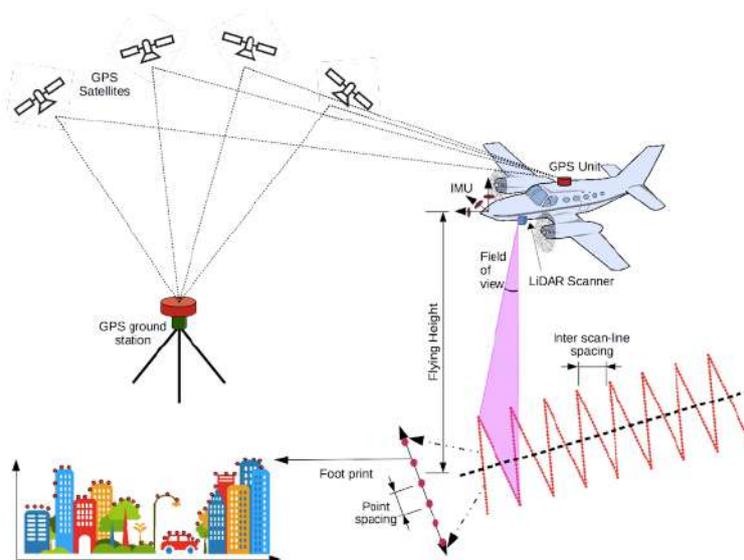


Figure 6 Composants de l'ALS<sup>3</sup>

- Enregistreurs de données ou CPU : Une unité centrale embarquée enregistre toutes les informations relatives aux impulsions, qui sont ensuite traduites en positions exactes (x, y, z).

Lorsque les opérations de cartographie sont menées sur de vastes zones, il est courant d'utiliser des aéronefs à voilure fixe ou des drones. Toutefois, lorsque des zones plus petites ou des objets/structures spécifiques doivent être scannés, des drones multirotors sont fréquemment utilisés.



Figure 7 DJI M300 avec scanner laser L1<sup>®</sup>

Figure 8 L1 Zenmuse DJI Laser Scanner<sup>®</sup>

## 3. Données LIDAR

### 3.1 Types de données enregistrées lors de la numérisation LiDAR.

Lors d'un balayage LiDAR, plusieurs types de données (mesures sur le terrain, métadonnées, etc.) peuvent être capturés pour aider à créer et à compléter une représentation 3D précise de la zone de balayage ou de l'objet. Bien que les types de données puissent varier en fonction de l'application et du type de scanner, certains des types de données les plus courants sont identifiés dans la figure 9 et le tableau 2 ci-dessous :

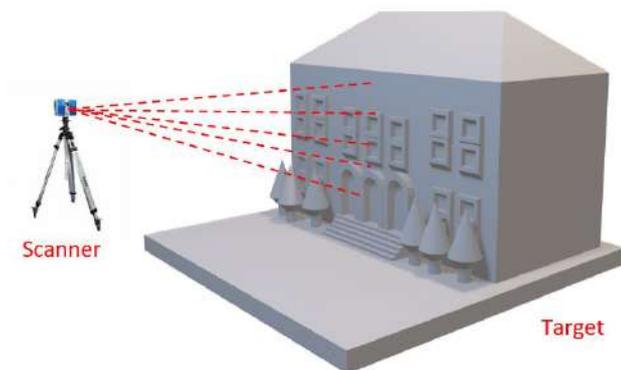


Figure 9 Types de données LiDAR

	Scanner	Cible
Mesure sur le terrain	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distance</li> <li>Vitesse d'impulsions</li> <li>Angles horizontaux et verticaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Position (X,Y,Z)</li> <li>Intensité (I)</li> <li>Couleur (RGB)</li> </ul>
Métadonnées	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heure de la capture</li> <li>Conditions environnementales</li> <li>Détails de l'étalonnage</li> <li>Informations sur le prestataire de services</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nom du projet/lieu</li> <li>Réseau de contrôle prestataire</li> </ul>

Tableau 2 Types de données et paramètres LIDAR

Types de données	Description
<b>Données du nuage de points</b>	Le résultat fondamental d'un balayage LiDAR est un nuage de points. Chaque point du nuage de points représente un emplacement spécifique dans l'environnement spatial 3D. Collectivement, ces points forment un modèle 3D de la surface, de la zone ou de l'objet qui a été scanné.
<b>Paramètres de balayage</b>	Les paramètres de balayage du système LiDAR ont une influence significative sur la qualité, la résolution et la précision du balayage. Des paramètres tels que la vitesse d'impulsions (impulsions/sec) et la résolution du balayage sont généralement enregistrés.
<b>Données de position GPS</b>	Les systèmes LiDAR enregistrent les coordonnées géographiques (latitude, longitude) et l'élévation (altitude) du point d'origine et du point de retour de chaque impulsion laser. Ces informations permettent de calculer avec précision les distances et de se positionner dans le monde réel.
<b>Données d'intensité</b>	L'intensité est une mesure de la force de retour de l'impulsion laser qui a généré le point. Chaque retour ou écho laser a une valeur d'intensité qui peut fournir des informations supplémentaires sur la réflectivité ou les propriétés matérielles des surfaces, ce qui permet de distinguer différentes surfaces.
<b>Données RVB</b>	De nombreux systèmes LiDAR sont équipés de caméras qui capturent des images en couleur ou des données RVB. Les données RVB peuvent être intégrées au nuage de points pour créer une représentation 3D visuellement réaliste et colorée de l'objet ou de la zone scannée...
<b>Données de classification</b>	Les points d'un nuage de points peuvent être classés en fonction des objets ou de la surface d'où ils proviennent (par exemple, sol, eau, bâtiment, etc.), ce qui peut faciliter l'analyse des données et l'interprétation pendant le traitement.
<b>Numéro de retour et nombre de retours</b>	Chaque impulsion laser peut donner lieu à plusieurs retours si elle interagit avec plusieurs surfaces. Le numéro de retour indique de quel retour il s'agit (premier, deuxième, etc.) et le nombre de retours indique combien de retours ont été enregistrés pour cette impulsion.
<b>Données d'étalonnage:</b>	Certains systèmes LiDAR enregistrent des informations de calibration, qui permettent de corriger les imperfections du capteur et d'optimiser la précision du nuage de points.

## 3.2 Format et structure des données

Il existe un certain nombre de formats de fichiers de nuages de points dans lesquels les données lidar peuvent être encodées, notamment LAS (.las), LAZ (.laz) et E57 (.E57), qui sont parmi les plus courants. Le format LAS est utilisé par la Société américaine de photogrammétrie et de télédétection (ASPRS). Quel que soit le format de fichier choisi, la grande majorité d'entre eux sont en fin de compte des variations du schéma position-intensité-couleur XYZ-I-RGB, comme le montre la figure 10. Le format LAS est souvent la norme industrielle pour le stockage des données LiDAR aéroportées et est couramment utilisé pour les applications SIG. Le format E57 a des applications plus larges pour le balayage laser, ce qui permet de stocker des images et des métadonnées avec le nuage de points. Les deux formats peuvent être convertis en d'autres formats tels que .TXT ou Shapefiles. Les données des nuages de points LiDAR peuvent contenir une "classification des retours", qui aide l'utilisateur final à déterminer le type d'objet scanné, par exemple le sol, les bâtiments ou l'eau. Cela peut permettre d'utiliser d'autres modèles de données tels que les MNS et les MNT.



Figure 10 Formats des données LiDAR<sup>8</sup>

Bien qu'il existe un certain nombre de solutions matérielles et logicielles propriétaires permettant de convertir les données LiDAR dans une multitude de formats de données, il est important pour les acquéreurs de données LiDAR de déterminer le format de fichier qui assurera la meilleure intégration des données dans les systèmes existants (tels que les systèmes de gestion des actifs) afin de garantir l'interopérabilité.

En ce qui concerne le type de formatage LAS, les informations les plus importantes décrivant chaque impulsion sont classées en X, Y, Z, I, N, R, C. Les paramètres sont les suivants :

- X, Y et Z sont les coordonnées des emplacements des échos.
- I indique l'intensité ou la force de l'écho.
- N représente le nombre de retours (échos) reçus à partir d'une seule impulsion et
- R indique l'ordre de ces échos, ou le numéro de retour. Par exemple, une combinaison de N = 2 et R = 1 indique que deux échos ont été enregistrés à partir de cette impulsion (N = 2) dont cet enregistrement est le premier (R = 1). Dans les données publiques, il est courant de classer les échos par catégories.
- La colonne C indique ces catégories pour cette classification.<sup>8</sup>

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>I</b>	<b>N</b>	<b>R</b>	<b>C</b>
597847.589	7336016.990	329.020	1	3	1	3
597847.290	7336017.230	325.050	1	3	2	3
597846.979	7336017.490	320.780	1	3	3	1
597845.609	7336017.429	319.820	14	1	1	1
597842.969	7336017.230	319.330	18	1	1	2
597840.359	7336017.009	319.060	17	1	1	2
597838.520	7336016.200	328.500	8	1	1	1
597836.849	7336016.370	323.710	5	2	1	3
597836.469	7336016.660	318.960	0	2	2	2

Figure 11 Format des données LiDAR LAS (.las)<sup>8</sup>

## 4. Applications LIDAR

Les véhicules aériens sans pilote (UAV unmanned Aerial Vehicles) équipés de la technologie LiDAR ont trouvé de nombreuses applications dans les secteurs de la construction et du génie civil. Comparé à d'autres aéronefs tels que les hélicoptères ou les avions, le balayage à l'aide de drones peut offrir des avantages significatifs en termes d'efficacité, de précision et de rentabilité. La section suivante présente quelques exemples d'utilisation novatrice du LiDAR par drone pour des applications dans le domaine de la construction et du génie civil. Cette liste n'est pas exhaustive et il convient de noter que le système UAV LiDAR est adopté par de nombreuses industries en dehors du secteur de la construction. La combinaison des drones et de la technologie LiDAR fournit aux professionnels de la construction et du génie civil des données très précises, actualisées et facilement accessibles. Cela permet de prendre de meilleures décisions, d'améliorer la gestion des projets et de renforcer la sécurité dans un large éventail d'applications dans l'industrie.

## 4.1 Cartographie et inspection/analyse des sites.

Le LiDAR par drone permet de créer rapidement et avec précision des cartes topographiques de sites de construction. Ces données aident les ingénieurs et les planificateurs à comprendre le terrain, les structures existantes et la végétation. Elles facilitent la sélection des sites, la planification et la conception des projets d'infrastructure. Les drones équipés de LiDAR peuvent effectuer des calculs volumétriques précis des stocks, des sites d'excavation et des décharges. Ces informations sont essentielles pour la gestion des projets, le suivi de l'avancement des travaux et la gestion des quantités de matériaux. Des balayages LiDAR réguliers d'un chantier de construction peuvent fournir des informations en temps réel sur l'avancement du projet. Cela permet d'identifier les retards, de résoudre les problèmes et de respecter le calendrier du projet. Pendant la construction, le LiDAR par drone peut être utilisé pour capturer l'état d'avancement d'un projet. Ces données peuvent être comparées aux modèles de conception, ce qui permet d'identifier les écarts et de s'assurer que la construction se déroule comme prévu.



Figure 12 Balayage LiDAR d'un port<sup>9</sup>

## 4.2 Levé sous feuillage dense

### Pénétration du couvert végétal avec LIDAR

Pour les applications LiDAR dans les zones à forte densité de feuillage, comme les forêts, une grande partie des rayons LiDAR n'atteint pas le sol à cause des branches, des feuilles et d'autres objets qui obstruent le chemin. Les rayons laser LiDAR ne peuvent pas pénétrer à travers ces objets. Les résultats des balayages LiDAR dans ces zones varient en fonction des saisons de l'année (en hiver, il y a généralement moins de feuillage - le balayage LIDAR peut être plus efficace, alors qu'au printemps et en été, le feuillage est plus abondant et les rayons ne peuvent pas atteindre le niveau du sol).

Par conséquent, lorsque l'on considère les balayages ALS avec une couverture végétale à haute densité, les modèles de nuages de points se concentrent sur les points qui sont passés avec succès entre les objets atteignant le niveau du sol.

Il convient de noter que l'angle de balayage est l'un des facteurs clés de la réussite de la mission. La figure ci-dessous présente un exemple de pénétration d'une impulsion laser dans des zones boisées en tenant compte du champ de vision vertical. Comme vous pouvez le voir, certains rayons laser pénètrent jusqu'au sol, tandis que d'autres, en fonction de la densité de la couverture foliaire, reviennent au LiDAR avant d'atteindre le sol.

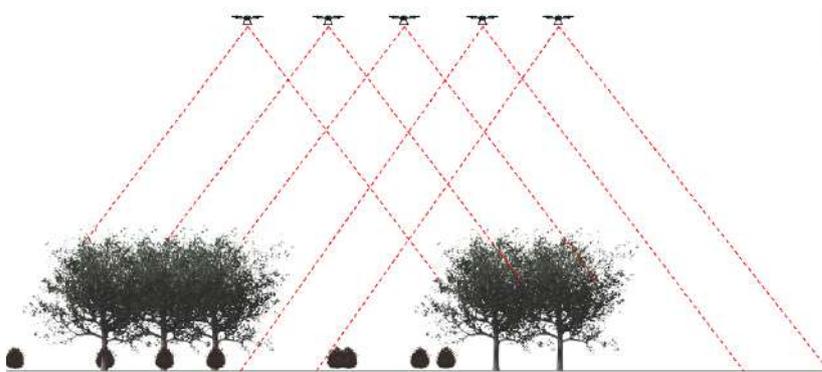


Figure 13 Exemple de pénétration du faisceau laser à travers les arbres.

La figure ci-dessous montre un exemple d'analyse forestière utilisant l'ALS.



Figure 14 Exemple d'analyse d'une forêt<sup>9</sup>

Pour planifier des missions ALS telles que celles décrites ci-dessus, le pilote d'un UAS doit tenir compte d'un certain nombre de facteurs lorsqu'il choisit l'équipement LIDAR et les paramètres de balayage les plus appropriés en fonction de l'environnement :

1. **Taux de répétition des impulsions/fréquence** - nombre d'impulsions lumineuses envoyées par le scanner LiDAR par seconde. Une fréquence de répétition des impulsions plus élevée signifie une plus grande densité de points dans les données LiDAR ; la probabilité que les impulsions LiDAR passent à travers les vides du feuillage pour mesurer la surface du sol est plus élevée.
2. **Champ de vision** - pour augmenter la probabilité de pénétration du LIDAR à travers le feuillage, de nombreux scanners ont la capacité d'augmenter leur champ de vision grâce à la rotation verticale et horizontale du capteur au cours d'une mission, plutôt que d'utiliser une position statique du capteur.

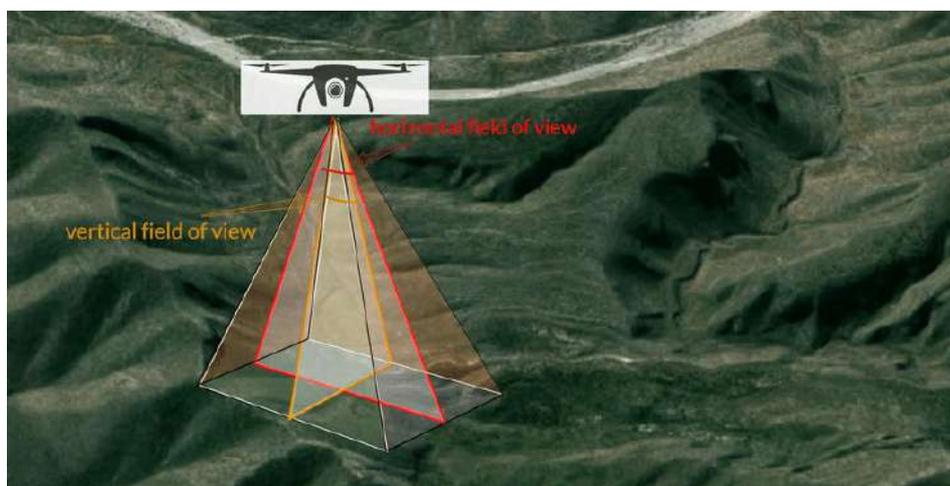


Figure 15 Champ de vision<sup>19</sup>

3. **Nombre de retours (échos) - chaque** capteur LiDAR a la capacité de détecter un certain nombre d'échos de retour (après avoir touché un objet solide) à partir de chaque impulsion laser. Plus le nombre d'échos détectés est élevé, meilleure est la sensibilité à la distance et meilleure est la résolution de la structure de la végétation scannée.
4. **Longueur d'onde du laser** - la majorité des UAS LIDAR utilisent deux longueurs d'onde : 905 et 1550 nm. La longueur d'onde 1550 est souvent la plus efficace pour scanner la végétation en raison de la puissance élevée du laser qui permet de scanner à haute altitude (option plus sûre pour les grands arbres et les zones de dégagement plus importantes). Il dispose également d'un traitement plus sophistiqué, d'un plus grand nombre de retours et d'un bruit de données plus faible. Le 905 nm est plus performant dans les environnements plus humides et mouillés. Le 905 devrait être choisi pour une végétation basse et un terrain plus plat.

5. **Divergence du faisceau** - représente la divergence des photons d'un faisceau laser (en forme de cône) provenant du capteur LIDAR. La figure ci-dessous présente deux capteurs LIDAR avec une divergence de faisceau différente.

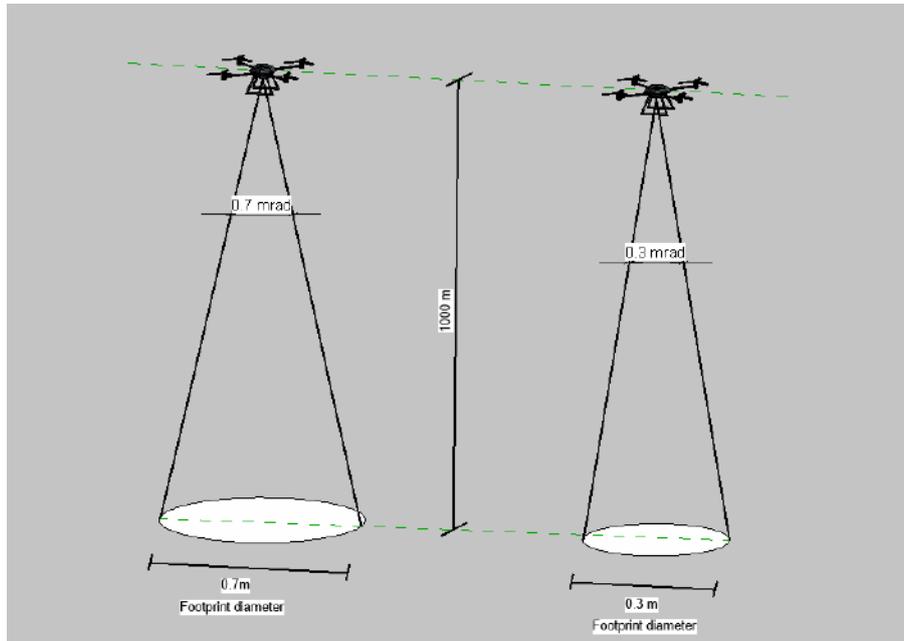


Figure 16 Différents exemples de divergence de faisceau LIDAR (pas à l'échelle)

Comme indiqué précédemment, la figure 13 présente deux drones équipés de capteurs LIDAR à divergence de faisceau différente. Il est également essentiel de mentionner que plus la divergence du faisceau est faible, plus la précision du balayage est élevée.

## LiDAR multispectral (MS LiDAR)

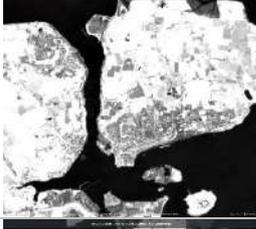
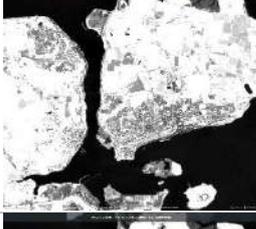
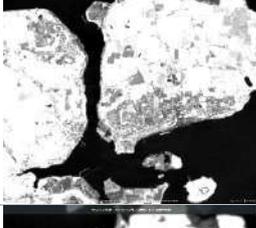
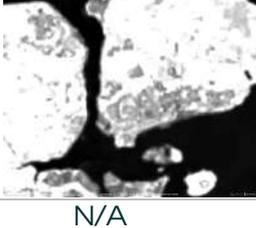
Il convient de mentionner que le LiDAR combine depuis peu ses capacités avec l'imagerie multispectrale. La technologie multispectrale est déjà largement utilisée, par exemple avec le satellite Sentinel-2. L'imagerie multispectrale utilise plusieurs gammes de longueurs d'onde pour collecter des images dans différentes bandes du spectre lumineux. Cette technique permet de déterminer la couverture des terres, le type et les conditions de plantation.

Dans le cadre de l'étude et de la gestion des forêts, les caméras multispectrales peuvent aider à reconnaître les espèces d'arbres, leur santé et leur biomasse.

Comme nous l'avons mentionné, il existe un certain nombre de bandes que cet équipement peut exploiter :

Tableau 3 Images du satellite Sentinel-2 par longueur d'onde/bande<sup>20</sup>

Sentinel-2 Bandes	Longueur d'onde centrale (micromètres)	Exemple d'image pour le port de Cork
Bande 1 - Aérosol côtier	0.443	
Bande 2 - Bleu	0.490	
Bande 3 - Vert	0.560	
Bande 4 - Rouge	0.665	

Bande 5 - Végétation Red Edge	0.705		
Bande 6 - Végétation Red Edge	0.740		
Bande 7 - Végétation Red Edge	0.783		
Bande 8 - NIR	0.842		
Bande 8A - Végétation Red Edge	0.865		
Bande 9 - Vapeur d'eau	0.945		
Bande 10 - SWIR - Cirrus	1.375	N/A	
Bande 11 - SWIR	1.610		

Bande 12 - SWIR	2.190	
-----------------	-------	--

Les systèmes LIDAR MS seront combinés pour introduire une capacité d'imagerie dans d'autres longueurs d'onde.

Le système Titan d'Optech combine trois longueurs d'onde<sup>15</sup> :

- Lumière verte visible - 532 nm
- Proche infrarouge (NIR near infrared) - 1064 nm
- Infrarouge (IR) - 1550nm



Figure 17 Exemple d'images MS LIDAR

## 4.3 Inspections de sécurité et évaluations de l'état des structures

Les drones équipés de LiDAR peuvent évaluer l'état des structures existantes, telles que les ponts et les bâtiments. En détectant les déformations, les fissures et autres anomalies, les ingénieurs peuvent prendre des décisions éclairées en matière de maintenance et de réparation. Les drones équipés de LiDAR peuvent accéder à des zones difficiles d'accès ou dangereuses, réduisant ainsi la nécessité pour le personnel de travailler dans des environnements à risque. Cela est particulièrement utile pour l'inspection de structures élevées ou de sites présentant des conditions dangereuses. La figure ci-dessous montre un exemple de numérisation du pont Tower Bridge avec le nuage de points original traité à gauche et un filtre de différence de hauteur appliqué à l'image de droite.

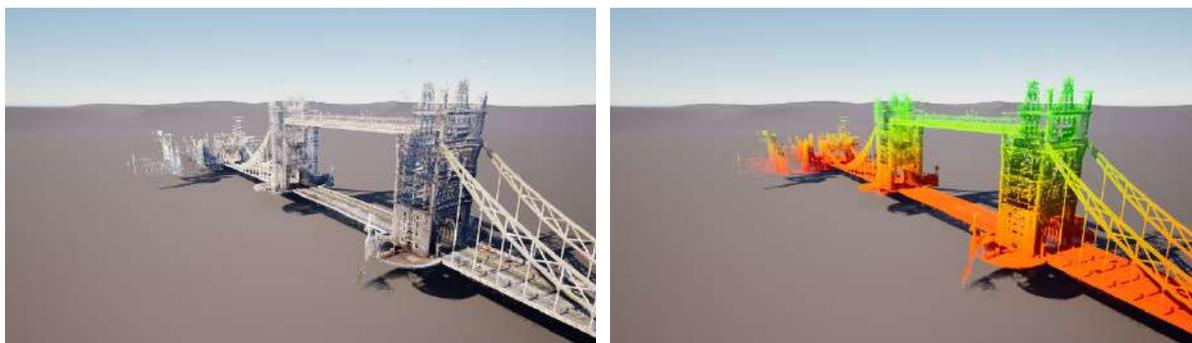


Figure 18 Exemple de balayage LIDAR du Tower Bridge UK<sup>9</sup>

## 4.4 Modélisation des inondations et évaluations de l'impact sur l'environnement

Les données d'élévation générées par LiDAR sont essentielles pour créer des modèles d'inondation précis et développer des stratégies efficaces de gestion des inondations. Le LiDAR peut capturer avec précision la densité de la végétation et l'occupation des sols. Ces informations sont utiles pour évaluer les impacts environnementaux, tels que les risques d'inondation, d'érosion et de perturbation de l'habitat. Les données LiDAR par drone peuvent aider la planification urbaine et les projets d'aménagement du territoire en fournissant des informations précises sur l'utilisation des sols, les structures existantes et les caractéristiques naturelles.

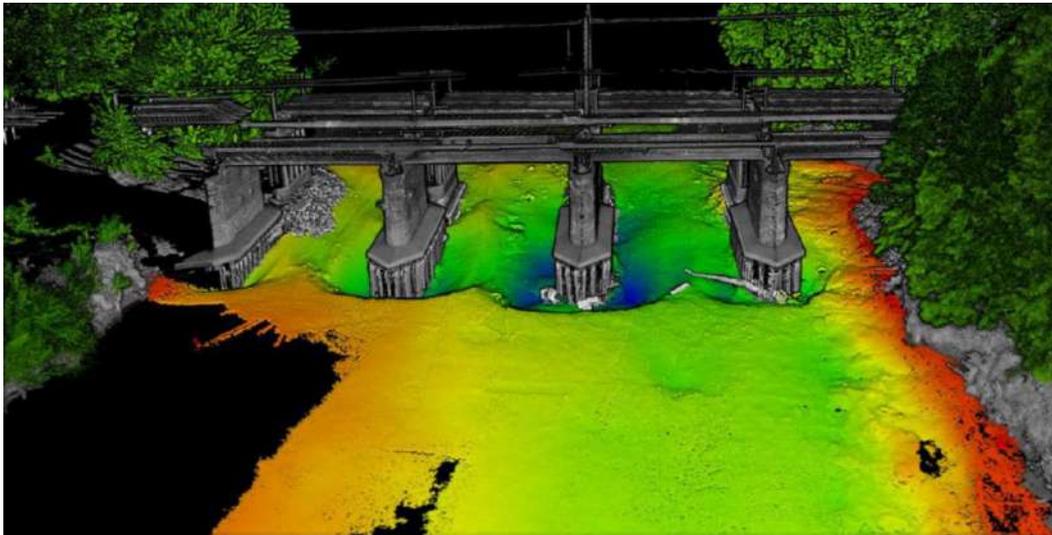


Figure 19 Exemple d'un scan LIDAR de la rivière Eden<sup>44</sup>

## 4.5 Gestion des services publics et des infrastructures

Le LiDAR est utilisé pour lever et cartographier les réseaux de services publics, tels que les lignes électriques et les pipelines. Ces données permettent de planifier la maintenance, les améliorations et les extensions.

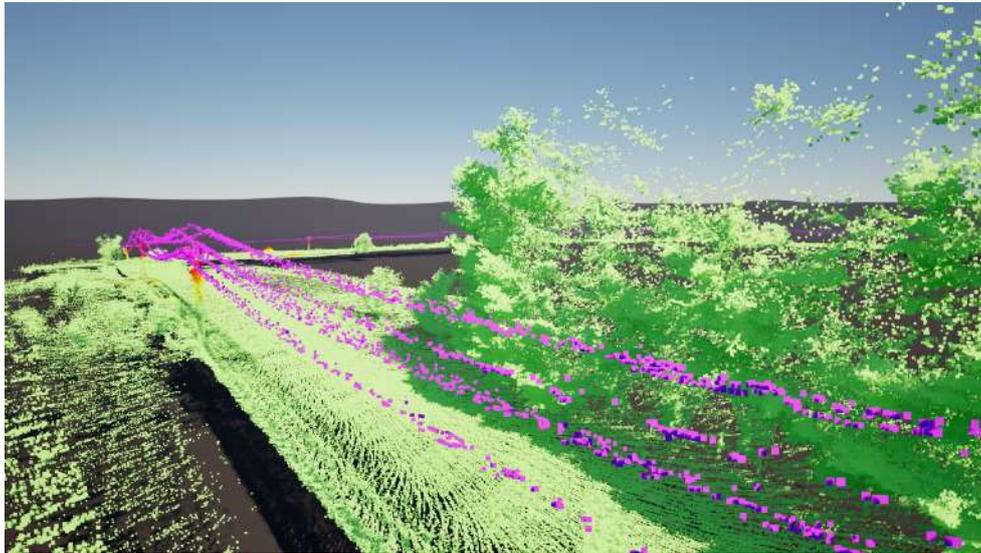


Figure 20 Exemple d'analyse de lignes électriques<sup>9</sup>

# 5. Méthodologie de capture et de traitement des données LIDAR sur le terrain

Lorsqu'il envisage d'utiliser un équipement LIDAR avec des UAV, l'opérateur ne doit pas oublier de planifier sa mission, comme indiqué dans le module 2 "Planification des vols et rapports" de ce programme.

## 5.1 Matériel

Il existe un certain nombre de solutions de capteurs LiDAR sur le marché et la plupart des fabricants de drones disposent d'une solution LIDAR qui s'intègre dans leurs propres systèmes de drones.

Parmi les plus populaires, on trouve les drones de DJI (par exemple, le M300 avec la solution LIDAR DJI Zenmuse L1) qui se vendent généralement à environ 10 000 euros. Une fois encore, il est important de mentionner que ce secteur est en constante évolution et que la palette de solutions s'élargit.



Figure 21 Exemple d'équipement LIDAR pour drone<sup>10</sup>

Il est impératif de choisir un équipement dont les propriétés correspondent aux exigences du type spécifique de mission. Certains des paramètres clés à prendre en compte sont identifiés dans le tableau suivant pour certains des capteurs LiDAR les plus utilisés actuellement :

Tableau 4 Comparaison des détails des capteurs LIDAR<sup>11</sup>

Modèle	Roegl mini VUX-1DL <sup>11</sup>	Velodyne VLP-16 <sup>12</sup>	Quanergy M8 <sup>13</sup>	L1 Zenmuse DJI <sup>14</sup>
Longueur d'onde (nm)	Proche infrarouge	903	905	905
Plage de mesure (m)	3-200	<100	0.3-200	190m@10%, 100klx ; 450m@80%, 0klx
Précision (mm)	+15/10	+30	+30	<u>30 à 100 m</u>
Fréquence de répétition des impulsions (PRF) (Khz) Fréquence de répétition des impulsions (PRF) (Khz)	100	-	-	200
Max. Taux de mesure effectif (kPts/sec.)	100	300/600	430	Retour unique : max. 240 000 pts/s ;  Retour multiple : max. 480 000 pts/s
Fréquence de balayage (Hz)	20-150	5-20	5-30	un/deux retours : 80K/s, 160K/s, 240K/s ;  trois retours : 80K/s, 240K/s
Champ de vision (FOV) (degrés)	-23-+23	-15-+15 (vertical) 360 (Horizontal)	-17-+3 (vertical) 360 (Horizontal)	Modèle de balayage non répétitif : 70,4° (horizontal) × 77,2° (vertical) ;  Modèle de balayage répétitif : 70,4° (horizontal) × 4,5° (vertical)
Altitude maximale de vol (AGL) (m) Altitude de vol opérationnelle (AGL) (m)	80	-	-	50m-120m
Résolution angulaire (degrés)	0.001	2 (vertical) 0,1-4 (horizontal/azimut)	0.03-0.2	-
Échos	Jusqu'à 5 échos	Jusqu'à 2 échos	Écho unique	-
Poids (kg)	2.4	0.83	0.9	0.930±0.01

Le tableau 3 présente les capteurs LIDAR qui pourraient être utilisés pour tout drone correspondant aux spécifications de fabrication généralement dictées par la charge utile, le matériel disponible, le cadre, l'espace d'installation et le logiciel. En outre, le tableau 3 met en évidence certains des principaux paramètres des solutions LIDAR, mais

d'autres paramètres doivent être pris en compte : puissance, indice de protection IP, température de fonctionnement, température de stockage, formats de fichiers de sortie, résolution).

## 5.2 Configuration avant le vol

Comme indiqué au début de cette section, pour exécuter la mission, les opérateurs doivent suivre certaines procédures pour préparer le drone et l'équipement connexe (plus de détails dans le module 2).

### ÉTAPE 1 RTK ou PPK en fonction de la précision de la configuration du balayage

La configuration du LIDAR lui-même sera légèrement différente de celle d'un Drone-LIDAR. Pour obtenir un balayage de haute précision, la configuration GNSS (GPS) initiale doit être équipée de la cinématique en temps réel (RTK) ou de la cinématique de post-traitement (PPK) :

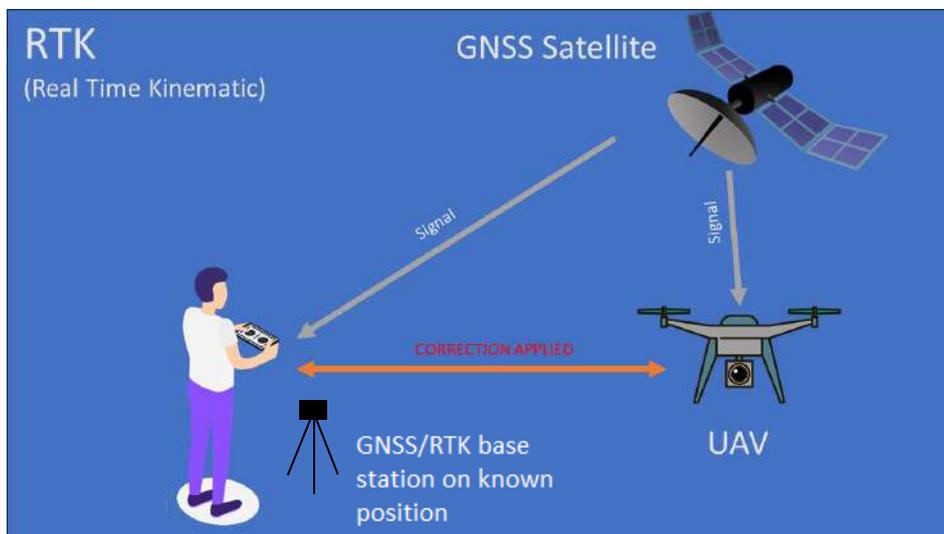


Figure 22 Le RTK expliqué

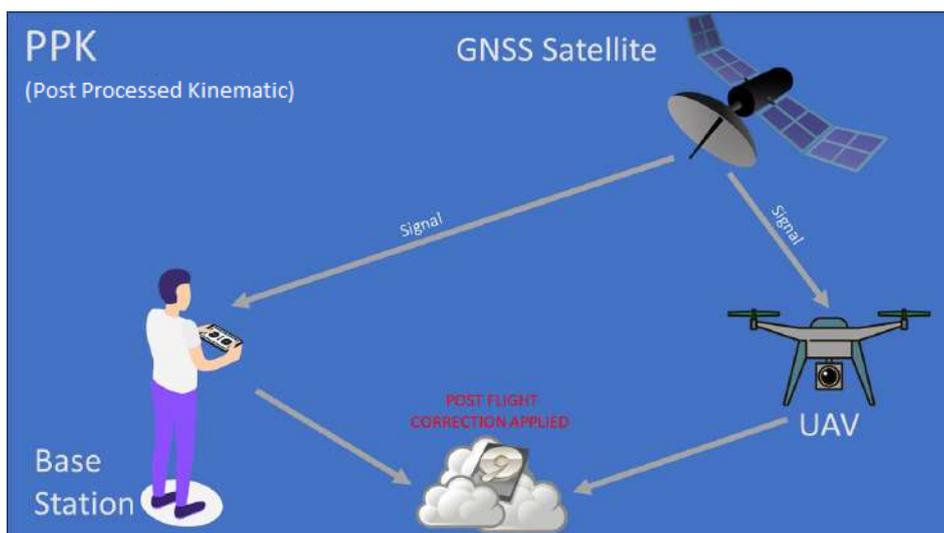


Figure 23 Le PPK expliqué

NOTE : Si la stabilité du RTK ne peut être garantie (par exemple, signal satellite faible), le PPK doit également être utilisé.

La principale différence entre ces deux approches est le temps initial nécessaire pour corriger la position :

- L'approche RTK effectue des corrections pendant le vol,
- PPK : toutes les corrections interviennent après le vol initial.

## **ÉTAPE 2 Étalonage de l'unité de mesure inertielle (IMU)**

Afin de garantir la précision du LIDAR et du nuage final, les opérateurs de drones doivent calibrer l'unité de mesure inertielle (IMU). Chaque fabricant de drones a des étapes spécifiques à suivre pour mener à bien cette étape. Par exemple, le DJI L1 LIDAR doit être calibré avant, pendant (toutes les 100 secondes) et après le vol. Ces étapes garantissent une bonne précision.

En règle générale, l'étalonnage implique que le drone monte jusqu'à une certaine altitude, puis qu'il avance de 30 m et recule de la même distance.

**REMARQUE : Assurez-vous que l'étalonnage de l'IMU est effectué de préférence dans une zone exempte d'obstacles.**

## **ÉTAPE 3 Étalonage de la caméra RVB**

En règle générale, la caméra RGB ne doit être recalibrée qu'en cas de problèmes visuels avec les données capturées. L'un des exemples est celui des lignes fantômes dans les nuages de points.

**REMARQUE : Chaque fabricant fournit des instructions sur la manière de recalibrer une caméra RVB.**

## **ÉTAPE 4 Planification de la mission de vol - sélection des paramètres de vol corrects et configuration pour le type de vol manquant.**

En fonction du type d'aéronef et de l'équipement LIDAR, le fabricant indiquera les paramètres recommandés :

- Champ de vision (FOV field of view)
- Couche de sol - zone imagée sur la surface étudiée
- Altitude de capture
- Vitesse
- Espacement des trajectoires

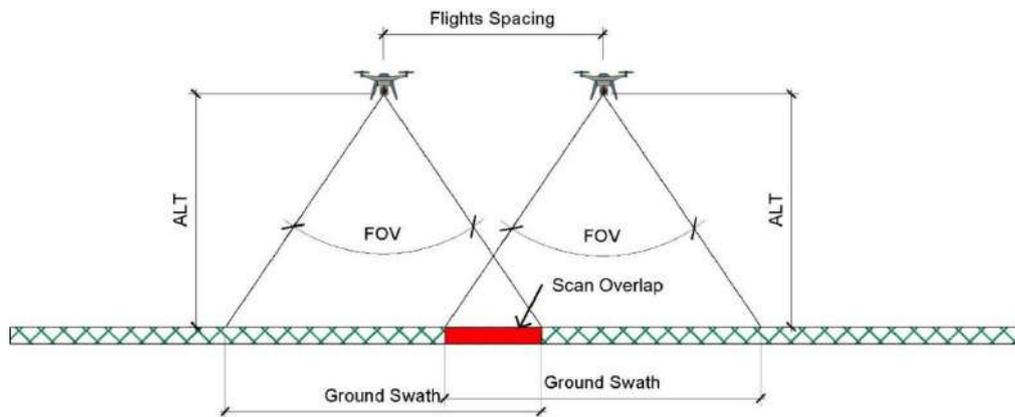


Figure 24 Paramètres de planification des vols

La figure ci-dessus présente les paramètres de vol et leur impact sur le chevauchement du balayage - qualité/densité du balayage.

En outre, les paramètres à définir avant une mission sont les suivants :

- Résolution de numérisation [pixels]
- Longueur focale [mm]
- Fréquence d'image [sec/image]
- Exigences en matière de données

## 5.3 Capture d'images en vol et logiciel de capture

La capture en vol, outre les paramètres de réglage et de planification avant le vol, se concentrera sur les logiciels et leurs applications. La plupart des nouvelles technologies de drones LIDAR ont des applications préinstallées qui aident à planifier le vol (pas seulement pour le LIDAR).

Planification de la saisie des données (comme mentionné à l'étape 4 de la planification de la mission), il est important de décider (en fonction du type d'étude, c'est-à-dire topographie, berges, lignes électriques) de l'itinéraire du vol du drone.

Pour planifier les itinéraires, il faut acquérir/utiliser une carte détaillée et à jour de la zone (dépend du fabricant de la radiocommande du drone). Les cartes acquises peuvent être utilisées dans l'application de contrôle de drone pour la planification. Il est impératif de comprendre le système de coordonnées des fichiers cartographiques (très souvent de type \*.tiff).



Figure 25 DJI Terra GUI

Comme indiqué ci-dessus, le contrôleur de drone est généralement équipé d'une application préinstallée qui permet de planifier la trajectoire.

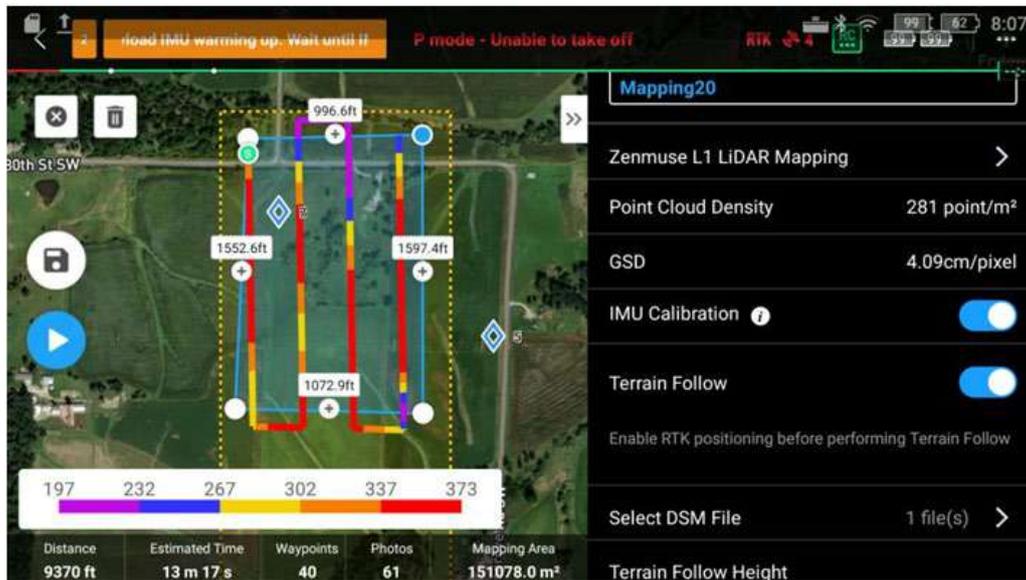


Figure 26 DJI Pilot App - exemple de planification de mission<sup>12</sup>

La capture est réalisée pendant le vol du drone. Les fichiers sont enregistrés sur la mémoire du drone et peuvent être transférés, une fois la mission terminée, vers un ordinateur de bureau ou un autre système d'exploitation pour être traités.

## 5.4 Traitement et logiciels

Lorsqu'il s'agit de traiter les données d'un drone LIDAR, il faut prendre en compte une plateforme. Il existe un certain nombre de logiciels disponibles (DJI terra, PIX4D...). Chaque logiciel a des instructions spécifiques à suivre.

Comme indiqué dans le chapitre précédent, les données doivent être importées dans un logiciel de post-traitement.

Les données brutes comprennent généralement des informations :

- Les points LIDAR pourraient être des données brutes
- Étalonnage de la caméra LIDAR
- Étalonnage de l'IMU
- Calibrage visuel
- Navigation inertielle
- Données visuelles
- Données de la station de base RTK
- Données de la sous-antenne RTK
- Fichiers JPEG - images

Après une importation réussie dans le logiciel de post-traitement, les données sont prêtes à être utilisées.

Les données RAW du LIDAR seront compilées dans un fichier LAS. Les différents logiciels produisent une variété d'options (par exemple, la densité du nuage de points et le système de coordonnées de sortie) pour la sortie avant que les données ne soient traitées et que le nuage de points ne soit généré.

D'une manière générale, le post-traitement peut être défini en 5 étapes :

- A. Traitement de la trajectoire - après le vol - cette étape consiste à vérifier les erreurs potentielles de trajectoire.
- B. Génération de nuages de points - comme indiqué précédemment, les paramètres de sortie suivants permettent de générer un nuage de points.

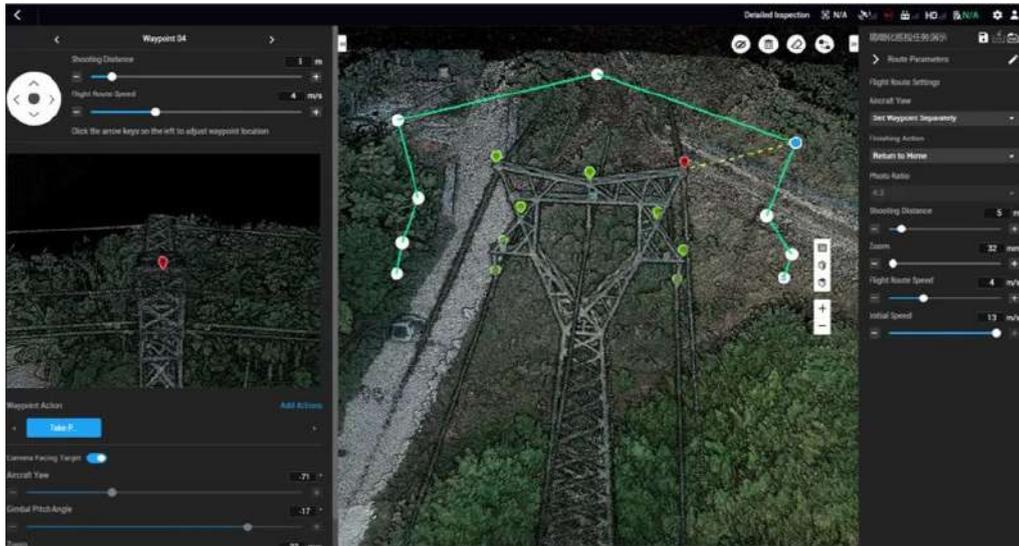


Figure 27 Exemple de nuage de points généré pour l'inspection de lignes électriques.<sup>12</sup>

- C. Affiner la précision des nuages de points
- D. Colorisation - cette étape consiste à ajouter des couleurs au nuage de points afin d'obtenir une vue plus détaillée des objets/zones inspectés. L'image en couleurs RVB (rouge, vert, bleu) est utilisée pour colorer chaque point.

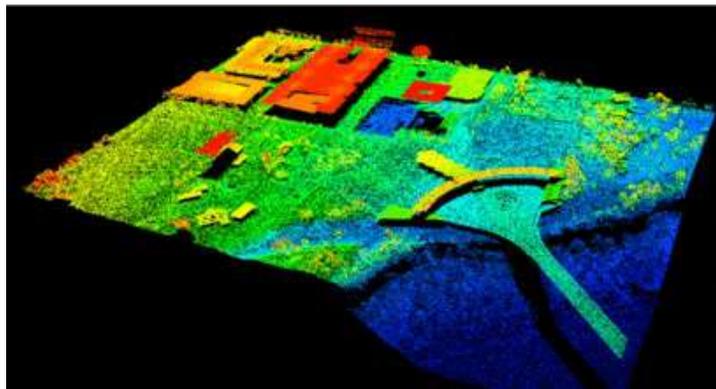


Figure 28 Utilisation de l'intensité de la couleur par hauteur.<sup>13</sup>

- E. Classification - cette étape permet d'attribuer une « classe » à différents types d'éléments/objets dans le nuage de points. Il peut s'agir de différentes catégories telles que: sol, eau, bâtiment, etc. On peut alors les isoler pour ne montrer que ce que l'on souhaite et améliorer le traitement global du nuage.

## 5.5 Sortie de données

L'une des principales sorties de données est un fichier de nuage de points traité, typiquement un fichier LAS ou LAZ, contenant différentes informations (détaillées dans le chapitre O). Certains logiciels permettent d'exporter :

- Des détails de la mission (données incluses dans le paquet LIDAR brut), - type de fichier dépendant du logiciel
- Les photos prises pendant la mission (JPEG, PNG, BMP, etc.)
- Des cartes en 2D (p. ex. Geotiff - image géoréférencée ; TIFF)
- Des modèles 3D (OBJ,B3DM,OSGB,PLY,S3MB,I2S)

La production de données est généralement suggérée par le contrat d'engagement et l'utilisation finale des données.

# Références

- 1) <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/drones-information-notice>
- 2) <https://www.parrot.com/en/drone-regulations/eu>
- 3) LIDAR Remote Sensing and Applications, Dong et Qi Chen, CRC Press
- 4) Staiger R., 2003, "Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications", in 2nd FIG Regional Conference, Sheraton Marrakech, Marrakech, Maroc, December 2-5 (2003)
- 5) <https://www.onyxscan-lidar.com/aerial-photogrammetry-and-drone-based-lidar-for-surveying-missions/>
- 6) Analyse de sensibilité et géométrie de mesure minimale pour l'étalonnage basé sur la cible des scanners laser terrestres panoramiques haut de gamme
- 7) Véhicules aériens sans pilote pour la gestion des actifs. CIRIA
- 8) Guide du client pour la numérisation laser 3D et la capture de données - BIM Task Group
- 9) <https://geoslam.com/sample-data/>
- 10) <https://enterprise-insights.dji.com/blog/lidar-equipped-uavs>
- 11) Zhou W., Chen F., Guo H., Panpan T. "UAV Laser scanning technology : a potential cost-effective tool for micro-topography detection over wooded areas for archaeological prospection" in International Journal of Digital Earth, January 2020
- 12) Guide d'utilisation du DJI L1, V1.1
- 13) Lohani B., Ghosh S., "Airborne LiDAR Technology : A Review of Data Collection and Processing Systems" e in Proceedings of the National Academy of Sciences, India - Section A - November 2017.
- 14) <https://www.networkrailmediacentre.co.uk/resources/mzy64-zoghg-6yss8-ig53o-slr0l>
- 15) <https://geo3d.hr/sites/default/files/2018-06/Titan-Specsheet-150515-WEB.pdf>
- 16) <https://www.yellowscan.com/knowledge/how-does-lidar-work/>
- 17) <https://www.dji.com>
- 18) <https://www.gim-international.com/case-study/new-generation-zenmuse-l1-lidar-drone-system-combines-quality-with-affordability>
- 19) Luo, Yawen & Chen, Yuhua. (2021). Energy-Aware Dynamic 3D Placement of Multi-Drone Sensing Fleet (Placement dynamique en 3D de la flotte de capteurs multi-drones). Sensors, 21. 2622. 10.3390/s21082622.
- 20) <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>

# Liste des tableaux

Tableau 1 Comparaison des techniques TLS et ALS.....	10
Tableau 2 Types de données et paramètres LIDAR.....	14
Tableau 3 Images du satellite Sentinel-2 par longueur d'onde/bande <sup>20</sup> .....	22
Tableau 4 Comparaison des détails des capteurs LIDAR <sup>11</sup> .....	29

# Tableau des figures

Figure 1 Balayage LiDAR (a) Scanner laser terrestre sur trépied <sup>4</sup> (b) Balayage laser monté sur un drone - balayage laser aéroporté <sup>5</sup> .....	6
Figure 2 Télédétection passive et active <sup>3</sup> .....	7
Figure 3 Composants clés d'un TLS monté sur trépied (a) Scanner <sup>6</sup> (b) Miroir rotatif dans le scanner <sup>6</sup> .....	8
Figure 4 Composants clés d'un système SLA <sup>16</sup> .....	9
Figure 5 Spectre électromagnétique <sup>3</sup> .....	11
Figure 6 Composants de l'ALS <sup>13</sup> .....	11
Figure 7 DJI M300 avec scanner laser L1 <sup>17</sup> .....	12
Figure 8 L1 Zenmuse DJI Laser Scanner <sup>10</sup> .....	12
Figure 9 Types de données LiDAR.....	13
Figure 10 Formats des données LiDAR <sup>8</sup> .....	15
Figure 11 Format des données LiDAR LAS (.las) <sup>8</sup> .....	16
Figure 12 Balayage LIDAR d'un port <sup>9</sup> .....	18
Figure 13 Exemple de pénétration du faisceau laser à travers les arbres.....	19
Figure 14 Exemple d'analyse d'une forêt <sup>9</sup> .....	19
Figure 15 Champ de vision <sup>19</sup> .....	20
Figure 16 Différents exemples de divergence de faisceau LIDAR (pas à l'échelle).....	21
Figure 17 Exemple d'images MS LIDAR.....	24
Figure 18 Exemple de balayage LIDAR du Tower Bridge UK <sup>9</sup> .....	25
Figure 19 Exemple d'un scan LIDAR de la rivière Eden <sup>14</sup> .....	26
Figure 20 Exemple d'analyse de lignes électriques <sup>9</sup> .....	27
Figure 21 Exemple d'équipement LIDAR pour drone <sup>10</sup> .....	28
Figure 22 Le RTK expliqué.....	31
Figure 23 Le PPK expliqué.....	31
Figure 24 Paramètres de planification des vols.....	33
Figure 25 DJI Terra GUI.....	34
Figure 26 DJI Pilot App - exemple de planification de mission <sup>12</sup> .....	35
Figure 27 Exemple de nuage de points généré pour l'inspection de lignes électriques. <sup>12</sup>	37
Figure 28 Utilisation de l'intensité de la couleur par hauteur. <sup>13</sup> .....	37