



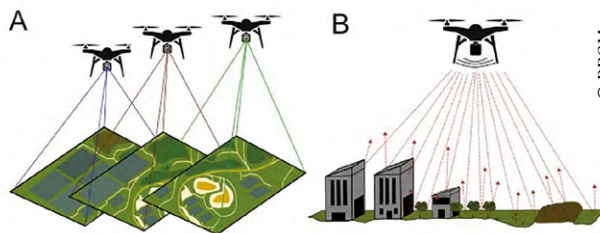
TÉLÉDÉTECTION AÉROPORTÉE POUR RECONSTRUCTION 3D

DESCRIPTION DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

L'utilisation de techniques de télédétection avec des moyens aéroportés (drone, avion, hélicoptère, ULM, ...) permet d'obtenir des informations topographiques ou cartographiques. Il existe plusieurs techniques utilisant la télédétection dont l'utilisation dépend des objectifs recherchés.

La photogrammétrie et le LiDAR sont deux techniques de reconstruction 3D. La photogrammétrie permet de produire un modèle numérique de surface (MNS) qui est une description altimétrique du sol et des objets qui l'occupent. Le LiDAR permet d'obtenir un modèle numérique de terrain (MNT) qui est une description altimétrique du sol. L'interprétation de ces modèles permet d'obtenir des fonds de plan qui peuvent être utilisés pour compléter l'intervention d'un géomètre sur des terrains difficiles d'accès ou pour obtenir des informations complémentaires pour :

- une étude hydrographique,
- l'identification des zones d'érosion et des voies de transfert de matière (sol par exemple) ou le calcul des stocks de matière ou de déchets,
- l'évaluation de l'évolution du couvert végétal.



© BRGM

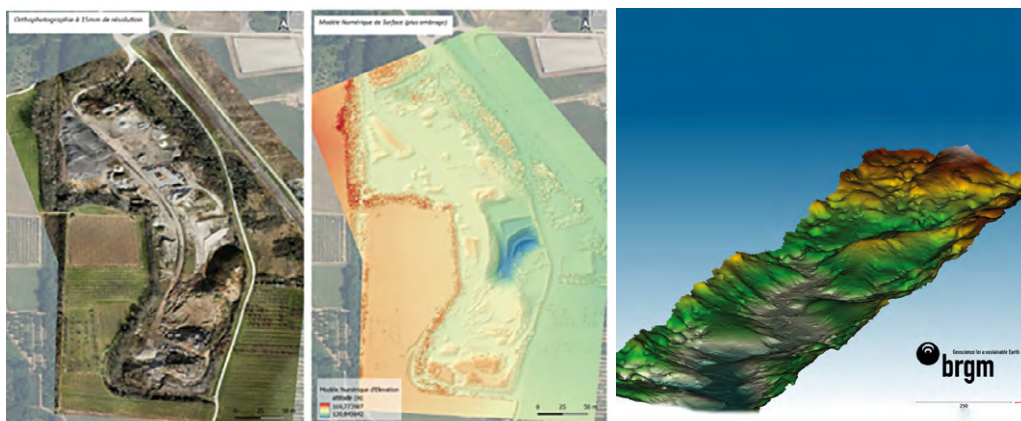
Principe de fonctionnement de la photogrammétrie (A) et du LiDAR (B).

La **photogrammétrie aéroportée** repose sur la corrélation d'images (photos couleur, noir et blanc ou images thermiques). La comparaison de plusieurs photos d'un même objet ou d'une même zone, prises sous différents angles, permet de reconstituer un modèle 3D. La photogrammétrie permet de capter les couleurs et de proposer des détails fins permettant des rendus esthétiques et interprétables à l'oeil nu.

Une **orthophotographie** est une photo « synthétique » générée à partir des prises de vues acquises par photogrammétrie de manière à ce que toutes les déformations géométriques liées aux conditions de prises de vue (distorsion de l'objectif, problèmes de perspective liée ou non au relief, ombres, ...) soient supprimées. Une image métrique est ainsi obtenue sur laquelle on peut réaliser des mesures et superposer d'autres documents topographiques ou des orthophotos d'autres époques sans décalage.

Le **LiDAR (Light Detection and Ranging)** est une technique qui utilise des faisceaux laser pour déterminer des distances. Plusieurs milliers de faisceaux laser sont émis par seconde vers le sol. Les distances sont calculées en mesurant le temps que met la lumière à revenir à l'appareil après avoir été réfléchi par un objet ou une surface. Les résultats obtenus sont un nuage de points 3D représentant la topographie de la zone survolée. Le LiDAR permet de s'affranchir des contraintes de luminosité ambiante et de pénétrer jusqu'au sol. Un traitement du nuage de points en fonction des objets touchés permet donc d'éliminer la végétation et de produire un modèle numérique du terrain nu.

Le couplage de la photogrammétrie et du LiDAR permet de combiner les avantages des deux techniques. Historiquement ce couplage croisait les données obtenues lors de vols distincts, consacrés à chacune des deux techniques mais des instruments joignant les deux capteurs sur le même porteur commencent à être disponibles.



© BRGM

Exemples d'une orthophotographie (à gauche), d'un MNS (au centre) tous deux acquis par photogrammétrie et d'un nuage de points LiDAR (à droite).

TÉLÉDÉTECTION AÉROPORTÉE POUR RECONSTRUCTION 3D

CONTEXTE D'UTILISATION

La sensibilité de ces méthodes non intrusives dépend du relief, des conditions météorologiques et des conditions d'éclairages :

	PHOTOGRAMMÉTRIE	LIDAR
Contexte d'utilisation	<ul style="list-style-type: none">• Adapté aux terrains dégagés,• Besoin de conditions météorologiques et d'éclairage particulières (pas de brouillard, de particules en suspension, pas de vol de nuit),• Non adapté aux terrains dont la surface présente de fortes variations de relief (vallée encaissée par exemple).	<ul style="list-style-type: none">• Adapté aux terrains végétalisés ou non,• Pas de contraintes particulières sur la lumière, les ombres et les conditions météorologiques,• Adapté à tous types de reliefs,• Développements en cours pour s'affranchir de la présence d'eau (étang, lac, mare, cours d'eau, barrage, ...).

Contexte d'utilisation du LiDAR et de la photogrammétrie.

La résolution et la précision des résultats sont en partie influencées par le moyen de vol. La photogrammétrie et le LiDAR par drone sont **utilisables uniquement sur les sites où le vol de drone est autorisé** (zones de survol interdit disponibles sur le Géoportail de l'IGN). Des **déclarations spécifiques auprès de la DGAC** (Direction Générale de l'Aviation Civile) sont à réaliser en amont afin de connaître les restrictions de vols liées à la zone d'étude (zone urbaine, proximité d'un aéroport ou d'un aérodrome, sites sensibles, ...). Par exemple, en zone urbaine, la distance maximale de vol est de 100 m soit environ 3 ha. Pour un site d'une taille supérieure, plusieurs vols doivent être programmés. **Un télépilote professionnel avec permis est obligatoire pour manœuvrer un drone aérien.**

Si la portée ou la puissance du LiDAR est critique ou que la zone à couvrir est vaste, les aéronefs habités (avion, hélicoptère, ULM) capables d'emporter de l'équipement plus lourd sont à envisager.

Enfin, **la production des données nécessite un positionnement des levés de précision centimétrique.** La solution habituelle recourt au positionnement par satellite en temps réel (GNSS-RTK) complété par une correction émise par une base fixe et captée à bord du porteur. Le réseau de téléphonie mobile est souvent employé pour transmettre cette correction en temps réel, à condition que le site d'opération soit couvert (couverture réseau dégradée par la présence de bâtiments, d'arbres ou de brouilleurs de signal sur des sites sensibles). En cas de doute, il est recommandé de faire appel

à un géomètre pour installer un réseau topographique de calage visible dans les photos ou lors des survols par LiDAR. À noter qu'il existe des techniques non dépendantes du GNSS utilisant la technique de cartographie à l'avancement (SLAM) comme les LiDAR mobiles portables à la main utilisés en intérieur (bâtiments ou cavités).

À quelle étape ?

La photogrammétrie et le LiDAR aéroportés sont utilisables **à diverses étapes** de gestion d'un site pollué. Leur utilisation est préconisée lors du **diagnostic**, dans le cadre de sites complexes pour estimer les pentes et déterminer des volumes (topographiques ou de déchets). Des approches **en amont de la phase de terrain** se développent pour caractériser le réseau hydrographique et identifier des zones d'érosion et de transfert de matières, pour mieux planifier les campagnes d'investigation (accessibilité, implantation de points, ...) mais aussi pour étudier les solutions de gestion pouvant s'appliquer.

Ces techniques sont également utiles et principalement mises en œuvre lors des phases de **travaux de terrassement** pour suivre les mouvements de terre (calcul de volumes de terres déplacées), les avancées des travaux d'excavation mais également suivre l'efficacité des techniques de stabilisation / confinement / dépollution (suivi de l'évolution d'un couvert végétal, absence de tassements différentiels ou d'érosion sur un confinement, ...).

POLLUANTS CONCERNÉS

La photogrammétrie et le LiDAR ne sont pas associés à la détection, ou la quantification de polluants mais à la mesure de paramètres complémentaires (calcul de volumes de terres déplacées, suivi de l'efficacité de techniques de stabilisation, ...).

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

Pour l'acquisition, le matériel déployé est un **drone ou autre moyen de vol possédant un LiDAR et/ou un appareil photo pour la photogrammétrie** avec une résolution adaptée à l'objet à détecter.

Certains drones sont équipés de **récepteurs GNSS** et géolocalisent donc automatiquement les données. Dans le cas contraire, une station GNSS fixe (pivot) ou mobile est nécessaire pour un géoréférencement centimétrique. **Des**

batteries de rechange sont à prévoir lors de l'utilisation d'un drone.

Un **système de stockage des données pérenne** (dizaines de gigaoctets par plan de vol) est à prévoir pour le déchargement des données une fois le vol fini (la télétransmission est possible mais n'est pas courante). Pour le traitement des données, des moyens techniques et des **logiciels spécialisés** et adaptés au stockage et à la gestion de grandes quantités de données sont nécessaires.

MÉTHODOLOGIE

Choix de la solution adaptée

Il est important de choisir la solution adaptée aux objectifs, aux conditions du site et aux moyens techniques disponibles pour traiter les données. Le choix de la technique, des paramètres de vol (vitesse et durée de vol, altitude, zone de

vol) et du porteur (drone, avion, ULM, hélicoptère) dépendent essentiellement de l'objectif attendu de l'étude : selon la taille des objets à détecter et le contexte du site (hauteur de la végétation, relief et encaissement du terrain, verticalité éventuelle des versants, ...), la résolution attendue est définie et les conditions de vol sont adaptées.

		PHOTOGRAMMÉTRIE	LIDAR
On souhaite mesurer le relief d'un sol sur :	Un terrain végétalisé.	NON, pas adapté aux terrains végétalisés.	OUI, adapté aux terrains végétalisés.
	Un terrain non végétalisé avec des variations abruptes et étroites de profondeur.	NON, sensibilité aux conditions d'éclairage.	OUI, les faisceaux laser pénètrent au fond des vallées même si l'éclairage est faible.
	Un terrain non végétalisé sans variations abruptes de relief.	OUI, car moins coûteuse que le LiDAR et offre une vue plus continue du relief et de la couleur du sol.	NON, plus coûteuse que la photogrammétrie.
On souhaite obtenir :	Une image du site comme fond d'interprétation.	OUI, couleurs et rendu visuel plus intuitifs.	NON, le LiDAR n'offrira jamais une représentation du terrain de manière aussi intelligible qu'une photo aérienne en couleur.
	Un support numérique 3D photoréaliste pour animer des discussions de chantier et des prises de décision en temps réel.	OUI, les maillages texturés photoréalistes permettent un partage avec des navigateurs web.	NON, le traitement des données est plus conséquent que la photogrammétrie nécessitant une grande puissance informatique et des logiciels spécialisés.
	Un modèle numérique de terrain ou de surface pour identifier un réseau d'écoulement des eaux d'un site partiellement végétalisé.	NON, moins performant que le LiDAR.	OUI, permet de mettre en évidence le schéma d'écoulement des eaux à la surface du terrain (indice d'érosion, fossés, ...).
Autres points forts		Système léger se satisfaisant de petits porteurs.	Possibilité d'obtenir des informations sur la nature des objets avec l'intensité du signal réfléchi.
Autres points faibles		Nécessite de planifier un plan de vol avec un recouvrement suffisant entre les photos pour extraire le relief de manière fiable (incluant impérativement des vues obliques).	Le poids du LiDAR impose des porteurs à charge utile plus grande Plus faible disponibilité chez les sous-traitants car beaucoup plus coûteux qu'un appareil photo.

Comparaison entre photogrammétrie et LiDAR selon les objectifs de l'étude.

Pour le LiDAR, la densité de points souhaitée doit être spécifiée dans le cahier des charges ainsi que la somme totale minimum des tirs atteignant le sommet de la végétation par unité de surface. Plus la densité de végétation est forte, plus la densité de points à acquérir au LiDAR doit être élevée. Pour atteindre des densités de points plus élevées, l'opérateur peut jouer sur l'altitude de vol (plus bas = plus dense), la vitesse de vol (plus lent = plus dense), le croisement des lignes de vol (croisé = plus dense) et le recouvrement entre lignes (recouvrement plus grand = plus dense).

Néanmoins, la meilleure précision possible n'est pas forcément recherchée car une plus grande précision des données génère un plus grand nombre de données à stocker et à traiter.

Technique	Précision	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée
LiDAR	Densité de points	1 pt/m ²	25 pts/m ²	50- 100 pt/m ²	200 pts/m ²
	Distance entre les points de mesures	1 m	20 cm	14 à 10 cm	7 cm

← ———— + Altitude de vol ———— -
+ Vitesse de vol ———— -

Exemple de relation entre précision des données et paramètres de vol pour le LiDAR.

Pour la photogrammétrie, la résolution au sol est obtenue à partir des informations mentionnées dans le mémoire technique de l'opérateur du drone.

$$\text{résolution au sol} = \text{dimension photosite} \times \frac{\text{longueur focale de l'objectif}}{\text{distance capteur - sol}}$$

Le LiDAR et la photogrammétrie peuvent être utilisés simultanément afin d'améliorer l'interprétation des données.

Réalisation d'un relevé

Les étapes de réalisation d'un relevé sont :

- Autorisation préalable par la DGAC (si survol par drone),
- Acquisition des données sur le terrain selon un plan de vol avec un appareil, une hauteur et une vitesse de vol adaptés à la surface à couvrir et aux contraintes du site.

Traitement des données

- Pour la photogrammétrie, les images sont analysées par des logiciels adaptés pour détecter des points correspondants entre les différentes photos. Les prises de vue 2D sont agrégées et interprétées. Un maillage et une texture sont appliqués sur les données brutes ce qui permet d'obtenir l'orthophotographie et le Modèle Numérique de Surface (MNS).
- Pour le LiDAR, les traitements reconstruisent la position précise du porteur, puis ajustent les bandes de vol pour



recréer un relief continu. Les nuages de points obtenus sont classés en fonction des objets ayant réfléchi le signal lumineux. Les intensités du signal sont calibrées.

- En cas de couplage des 2 techniques, les nuages de points peuvent être colorisés avec les photos, ce qui améliore l'interprétation intuitive des nuages de points 3D.
- Post-traitements :
 - Estimation des volumes et des amas pointés.
 - Génération d'un modèle 3D de la zone photographiée
 - Réalisation des visuels : plans, vecteurs, etc.

Points de vigilance :

- Les conditions météorologiques ont une incidence sur les mesures et peuvent conduire à un report de la mission ;
- Il est fortement recommandé de faire appel à des experts pour assister le maître d'ouvrage dans la rédaction du cahier des charges afin de vérifier la prise en compte de toutes les contraintes spécifiques liées au site pouvant impacter la qualité des données, avant et pendant l'acquisition. L'entreprise réalisant l'acquisition sur site est généralement différente de celle réalisant l'interprétation.

AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

AVANTAGES

Investigations

- Méthode non intrusive et non destructive,
- Rapidité d'acquisition,
- Surface importante à moindre coût,

Résultats d'interprétation

- Approche volumétrique,
- Vue en couleur et en relief du sol,
- Suivi de la végétation,
- Suivi de phénomènes érosifs.

INCONVÉNIENTS

Investigations

- Restriction de vol possibles, en fonction du lieu du levé,
- Nécessité d'une bonne géolocalisation,
- Besoin de personnel compétent et expérimenté pour l'acquisition,

Résultats d'interprétation

- Données générées nécessitant du matériel adapté avec beaucoup d'espace mémoire,
- Besoin de personnel compétent et expérimenté pour le traitement.

MATURITÉ DE LA TECHNIQUE



La technique est mature mais encore peu utilisée dans le domaine des sites et sols pollués. Des projets de recherche et développement sont en cours pour permettre d'améliorer les techniques d'acquisition et le traitement des données dédiés aux différents métiers, et la mise à disposition des informations dérivées des données.

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

Selon les conditions du site et les objectifs, il faut compter entre une demi-journée et quelques jours d'acquisition des données (couverture possible de plusieurs hectares en quelques heures). Les résultats interprétés sont généralement fournis

1 mois après. Il est néanmoins parfois possible d'obtenir une version rapide et de qualité moindre sous une semaine pour préparer une phase de terrain. Le faible nombre d'opérateurs et de spécialistes peut ajouter une contrainte temporelle.

PHASE

INVESTIGATIONS

TRAITEMENT

Délai associé

⌚ ⌚ ⌚ > ⌚ ⌚ ⌚

⌚ ⌚ ⌚ > ⌚ ⌚ ⌚

⌚ : jour / ⌚⌚ : semaine / ⌚⌚⌚ : mois

ÉLÉMENTS DE COÛTS

Les prix des prestations photogrammétriques complètes commencent à quelques centaines d'euros pour des superficies volables en une demi-journée de terrain. L'augmentation de technicité des acquisitions (LiDAR, couplage LiDAR et photogrammétrie), des produits attendus (nuages de points

3D, colorisés, classifiés, MNS, MNT, maillages texturés, lien vers un environnement de visualisation en ligne) et de la superficie couverte accroissent les tarifs qui peuvent atteindre jusqu'à 30 000 €.

PHASE

INVESTIGATIONS

TRAITEMENT

Coût associé

€€€ > €€€

€€€ > €€€

€ < 100 € / €€ < 1000 € / €€€ > 1000 €

POUR EN SAVOIR PLUS – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Article sur le site Yellowscan - LiDAR vs. RADAR - 2020
 [2] Article sur le site ABOT - Bien choisir son drone pour la photogrammétrie (abot.fr) - 2019
 [3] Article sur le site PROPEL RC - Photogrammétrie vs LiDAR : un guide de comparaison détaillé - 2024
 [4] Article sur le site GIS Geogaphy - LiDAR vs. Photogrammetry : A Guide to Mapping Technologies