

Relevé routier à très haute résolution par système LiDAR- Photogrammétrique hélicopté

J. Vallet
Helimap System SA

Résumé

1. Introduction

Depuis 10 ans, les technologies LiDAR (Light Detection And Ranging) et d'imagerie numérique ont considérablement changé le monde de la cartographie de précision. Que ce soit en mode statique ou dynamique (aéroporté ou terrestre), les nuages de millions de points et les images à très haute résolution (quelques cm) ont peu à peu envahi le marché de la mesure tridimensionnelle de l'environnement naturel et construit.

Le secteur des infrastructures (route, rail, électricité,...) est un des larges bénéficiaires de ces nouvelles techniques d'acquisition.

Elles permettent d'acquérir avec une précision décimétrique des données numérique 3D, non seulement du terrain, mais également de tout objet tels que bâtiments, végétation, câbles, panneau... De quelques points par mètre carré il y a encore 5 ans, les LiDAR actuels permettent d'atteindre des densités de plusieurs centaines de points par mètre carré. Les caméras numériques ne sont pas en reste non plus avec une course aux mégapixels permettant de produire des orthophotos avec des résolutions de 5cm ou moins.

Le secteur routier est de plus en plus demandeur de ce type de données car elles offrent une polyvalence pour de nombreuses applications: SIG routier, géométrie de base pour les aménagements, planifications, rénovations.

L'acquisition dynamique permet de travailler sur route ouverte, avantage incontestable pour les réseaux autoroutiers. Deux variantes dynamiques sont présentes: LiDAR embarqué sur un véhicule terrestre, et LiDAR aéroporté.

Dans les deux cas, la précision absolue est liée à celle du système de positionnement GPS-INS en mode cinématique, ce qui permet difficilement de descendre en dessous des 5cm (1 sigma).

La précision relative, ou bruit interne du nuage de points, va dépendre du type de LiDAR employé. Dans le cas du mode terrestre, la précision de mesure de distance des LiDAR est en général inférieure au cm alors qu'elle est de 2-3 cm pour les LiDAR aériens. Ces valeurs de précisions sont données pour une incidence perpendiculaire à la surface de réflexion. Lorsque l'incidence du rayon est oblique, la précision de la mesure de distance se dégrade proportionnellement à la distance combinée à la divergence du faisceau laser et à la réflectivité variable au sein de l'empreinte du faisceau [1].

Dans le cadre du plan de rénovation des autoroutes (Uplans), l'office fédéral des routes a requis un état initial de l'emprise de l'autoroute pour planifier les actions à entreprendre. Les exigences en terme de géométrie de la chaussée étaient fixées à une précision planimétrique relative (entre 2 points) de 2cm (1 sigma), une précision altimétrique relative de 3cm (1 sigma) et une précision absolue altimétrique < 5cm (1 sigma).

C'est dans ce contexte qu'une évaluation de l'acquisition hélicoptée de haute précision (< 5cm) a été entreprise sur deux tronçons autoroutiers de l'A9 afin d'estimer le potentiel de la méthode en terme de précision absolue et relative des points LiDAR (notamment sur la

chaussée) mais également sous l'aspect photogrammétrique (orthophotos et stéréorestitution d'objets).

2. Moyens et techniques mis en œuvre

Obtenir une précision de cartographie inférieure ou égale à 10cm par technique héliportée est un objectif désormais atteint par la plupart des systèmes d'acquisition à basse altitude (< 350m sur sol). En revanche, passer en dessous du seuil des 5cm demande des efforts importants et une mise en œuvre particulière.

2.1. Choix du matériel

Les deux relevés ont été effectués avec des équipements différentes génération:

Pour le premier relevé, le système Helimap System® I composé d'un scanner Riegl LMS-Q240i avec une cadence de mesure de 10'000 points/sec et une divergence de faisceau de 2.7 mrad, d'une caméra Hasselbald H1D de 22 Mpix (9 µm le pixel), focale de 35mm, et d'une unité inertielle iMAR de type tactique (HSI) [2].

Pour le second, un système dernière génération Helimap system® II composé du scanner Riegl VQ-480 avec une cadence de mesure de 25'000 à 150'000 points/sec et une divergence de faisceau de 0.3 mrad, d'une camera Hasselblad H4D de 50 Mpix (6 µm le pixel), focale de 35mm, et d'une unité inertielle iMAR de type tactique (HSII).

2.2. Méthode employée

La méthode utilisée se base sur un survol très basse altitude (80 à 100m sur sol) à l'aplomb de l'axe de l'autoroute ou des voies si celles-ci sont séparées ou décalées. A cette distance, la taille du pixel sol est inférieure à 2 cm (échelle de 1:2500) et la densité de points de ~12 point/m² pour le système 1, et de ~80 point/m² pour le système 2. Le tableau 1 résume les paramètres de vol.

	Vol HSI	Vol HSII
Altitude de vol [m]	80	100
Taille moyenne du pixel [cm]	2	1.8
Fréquence de scan [pt/sec]	10'000	75'000
Densité de point [pt/m ²]	~12	~80
Empreinte du faisceau au nadir [m]	~0.22	~0.03
Vitesse de vol [m/s]	10	10
Recouvrement [%]	60-70	60-70
Sigma Z photo théorique [cm]	2	2
Linéaire couvert [km]	40	35
Nombre d'image au km	~30	~25

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques techniques de vol.

La précision du positionnement du capteur étant astreinte à la précision de la trajectoire GPS-INS (~6 cm par composante), il convient d'utiliser des points de calage au sol afin de recalibrer le nuage et les images. Deux points de calage sur des surfaces planes et lisses ont été disposés tous les 400-500m le long de l'autoroute. Ces points ont été mesurés par GPS statique pour garantir une précision inférieure à 2 cm en altimétrie.

Le survol a été planifié de manière à avoir les constellations GPS optimales (nombre de satellite et DOP) durant tout le vol. Les stations de bases servant de référence pour le vol ont

été placées de manière à avoir des bases maximale de ~15km. La différence d'altitude entre les stations de bases et l'hélicoptère a été minimisée à ~300m pour réduire au maximum les effets troposphériques.

Tout le géoréférencement des données a été effectué dans le référentiel CHTRF95, puis les données ont été ensuite calculées dans le système de coordonnées LV95, système altimétrique NF02 (Reframe).

2.3. Traitement et données produites

Les images ont fait l'objet d'une aérotriangulation en utilisant les paramètres d'orientation directe (GPS-INS) combiné avec les points d'ajustage. Un réétalonnage de la focale et du point principal de la caméra a été effectué sur une zone de calibration le même jour.

Une stéréorestitution des structures linéaires (bords de murs et ponts) a été faite puis combinée au nuage de points. A partir de la, une orthophoto avec un pixel de 2cm a été calculée pour servir de base à la mesure planimétrique des éléments de la chaussée (largeur de voie, bande d'arrêt d'urgence, fissures, joints...).

Le nuage de points a fait l'objet d'une classification minutieuse du sol, puis un lissage a été appliqué sur les chaussées afin d'éliminer le bruit. Enfin, le nuage a été recalé altimétriquement sur les points d'ajustage selon une procédure similaire à une correction de géoïde.

Au final, un modèle numérique de terrain (MNT) haute densité, les lignes de rupture des éléments construits et l'orthophoto haute résolution ont été fournis (fig.1)

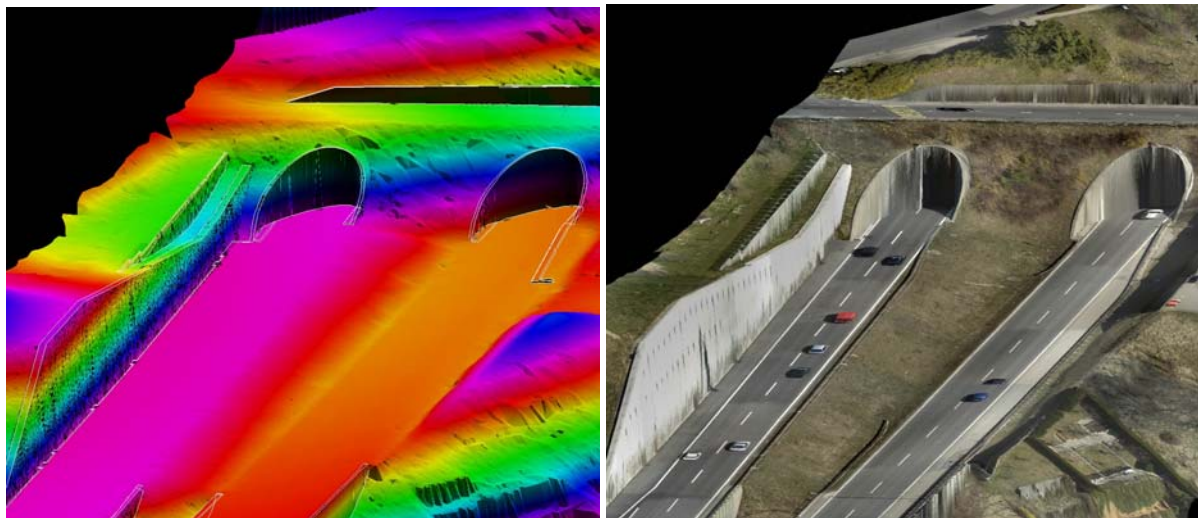


Figure 1 : MNT et lignes de rupture à gauche et Orthophoto drapée sur le MNT à droite sur l'A9 entre Vennes et Chexbres.

3. Résultats et analyses

Le traitement des données du deuxième vol étant en cours, les analyses n'ont pas encore pu être effectuées. Les résultats du premier vol sont présentés ci dessous.

3.1. Précision du nuage de point

Une fois le nuage de point filtré et le sol extrait, un lissage des chaussées a été effectué (tolérance de $\pm 1.5\text{cm}$). Les résultats de la comparaison altimétrique entre les points d'ajustage de la chaussée (61) et le MNT laser fournit les résultats figurent dans la figure 2.

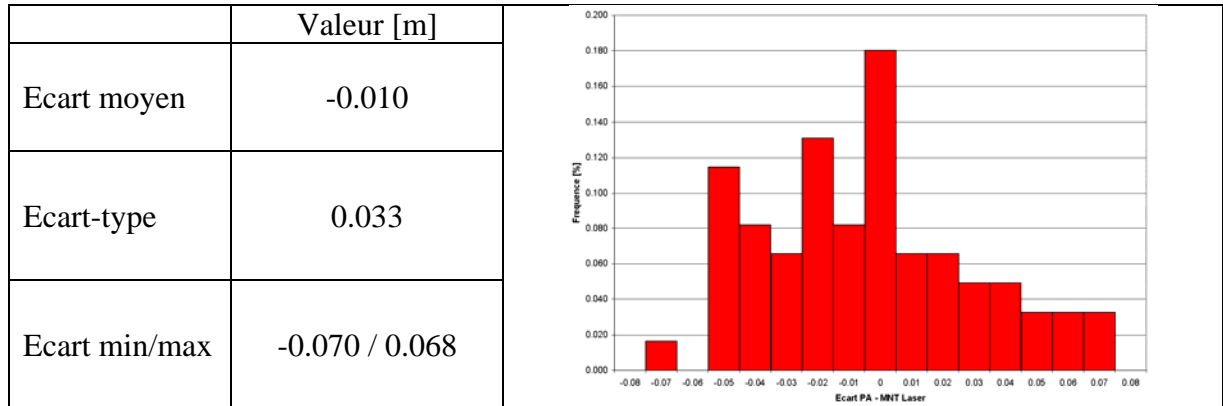


Figure 2: Distribution en fréquence (%) des écarts altimétriques entre MNT laser lissé et points d'ajustage

La précision (1σ) altimétrique absolue du MNT LiDAR est donc inférieure au 5cm fixé. Elle est de 3.5cm, ce qui correspond à la précision de mesure de distance du laser (3cm pour HS1). Le recalage du MNT sur les PA permet de réduire ces écarts au niveau des points même. Il aurait fallu avoir des points de contrôle intermédiaire pour valider l'effet du recalage. C'est ce qui est prévu sur le second vol en cours de traitement.

3.2. Précision photogrammétrique

Il était intéressant de comparer l'apport des points d'ajustage dans le géoréférencement des images. Le calcul de compensation a d'abord été lancé avec les points au sol comme contrôle indépendant (avec GPS-INS), puis comme point d'ajustage (PA), puis les coordonnées des points de liaison ont été comparées. Les résultats figurent dans le tableau 2.

	AT avec PA			AT-IMU avec point de contrôles indépendants		
σ_0 [μm]	2.52			2.50		
RMS des résidus aux PA [m]	0.011	0.009	0.010	0.031	0.043	0.037
Ecart max. [m]	0.042	0.024	0.028	0.07	0.08	0.11
Précision de mesure au sol [m]	0.016	0.013	0.022	0.031	0.027	0.046

Tableau 2. Résultats de l'aérotriangulation selon l'utilisation de PA ou non.

Le gain des PA est de 50% sur la valeur de la précision de mesure au sol estimée.

La comparaison des coordonnées aux points de liaison montre également l'effet bénéfique des points d'ajustage sur le géoréférencement par rapport au GPS-INS seul. La figure 3 illustre la différence en X Y et Z des points de liaison. L'écart moyen est nul en planimétrie mais une composante systématique de -2 cm est présente en altimétrie. Il est également possible de voir une tendance qui évolue au cours du temps (l'axe des abscisses montre les points de liaison selon l'ordre chronologique du vol). Ces oscillations reflètent la précision de la trajectoire qui évolue progressivement dans le temps en fonction des constellations GPS et de la dynamique de vol.

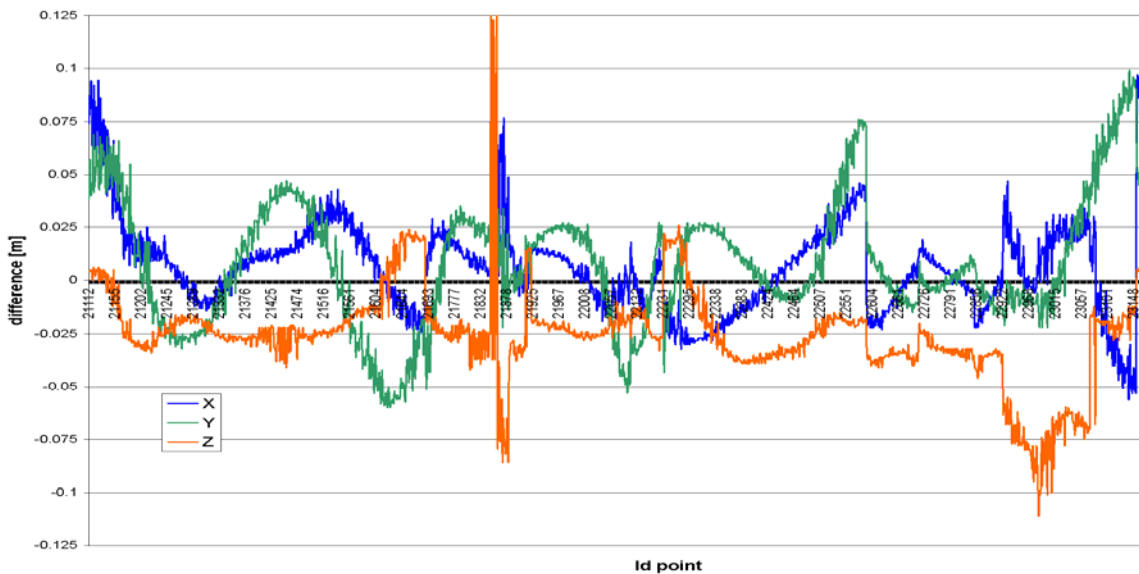


Figure 3: Ecart des coordonnées X Y et Z des points de liaison entre l'aérotriangulation avec points d'ajustage et orientation GPS-INS et aérotriangulation avec GPS-INS seul.

3.3. Précision planimétrique de l'orthophoto

L'orthophoto a été calculée avec une résolution (taille du pixel) de 2cm. Les écarts entre les points d'ajustage et leur position sur l'orthophoto n'excèdent pas 3.5cm, pour un écart-type de 1.7cm. La précision absolue est donc inférieure aux exigences des 3cm (1σ). La figure 4 illustre un extrait d'orthophoto de la chaussée.



Figure 4: échantillon d'orthophoto avec pixel de 2cm.

3.4. Résultats préliminaires de vol 2

Etant en cours de traitement, les données du vol 2 sont incomplètes mais il apparaît déjà certains avantages:

- le lissage est inutile car l'empreinte au sol de la tache laser est plus focalisé (d'un facteur 10), et le bruit résiduels sur la mesure de distance est moindre. Le niveau de détail de très petit relief est donc plus élevé avec HS2 (fig. 5). Il est semble donc possible de visualiser des zones de tassement sur la chaussée.
- La densité de mesure de 80 point/m² permet quasiment de s'affranchir de ligne de rupture. En doublant la densité par une cadence plus élevée du LiDAR, cette tache serait superflue.

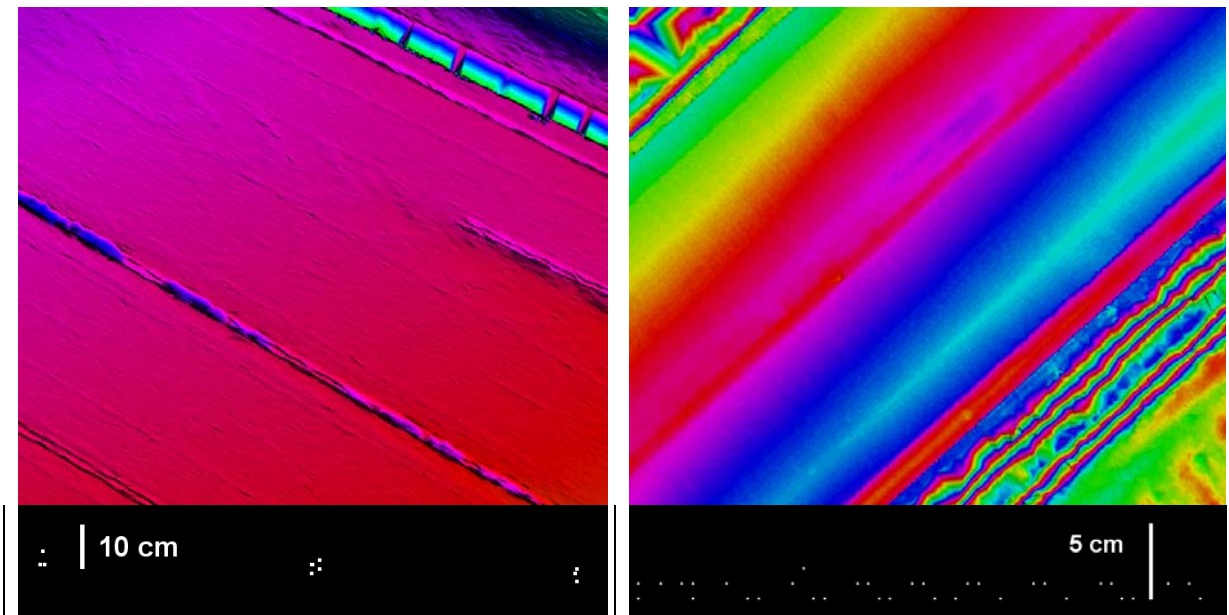


Figure 5: Bruit de mesure pour chaque type de laser HS1 à gauche et HS2 à droite. On voit nettement pour HS1 des microreliefs générés par le bruit (3-4cm) sur le nuage non lissé. L'empreinte du faisceau au niveau sol fait également apparaître du relief sur les bandes de peinture (zèbra, ligne axiale). À droite, on peut déceler de probables zones tassement sur certaines bandes de roulement tandis que le bruit est nettement plus faible (~1 cm sur nuage brut).

4. Conclusion

Le LiDAR hélicopté n'est a priori pas la technique la plus utilisée pour des relevés de très haute précision (<5cm) car l'avion n'est pas adapté à des vols bas. Il était donc intéressant de voir le potentiel de la technique pour des vols à basse altitude (<100m) effectué avec Helimap System.

Les vols réalisés ont montré qu'il était possible d'obtenir, grâce à l'emploi de points d'ajustage, un très haut niveau de précision absolue de mesure au sol, de ~3-4 cm avec le LiDAR, et de ~2cm par photogrammétrie sur des objets bien définis.

Les analyses de précision du second vol sont en cours de traitement et semblent encore plus prometteuses avec un nuage moins bruité et une très haute densité.

Il aurait été intéressant de comparer de tels relevés avec un relevé terrestre dynamique du point de vue de la précision. En effet, la technique terrestre offre les avantages d'être moins bruitée sur la mesure de distance, et d'avoir des données dans des tunnels et sous les ponts. En revanche, les contraintes par rapport à l'hélicopté sont qu'il faut faire un passage par voie, que le signal GPS est nettement plus soumis aux obstructions (arbres, murs), qu'il est impossible de faire des orthophotos et que la couverture des abords externes de la voie n'est peu ou pas possible. Pour certains types d'applications à haute précision, les deux techniques semblent probablement complémentaires.

Références

- [1] Vosselman G., Maas H-G., Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Whittles Publishing, 2010
- [2] Skaloud J., Vallet J., Keller K., Veyssière G. and Kölbl O., 2006 An Eye for Landscapes - Rapid Aerial Mapping with Handheld Sensors, GPS World, Vol. May 2006, Nr. 17 (5), pp. 26-32, 2006.