

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 142 (2016)
Heft: 3: Cartographie de haute précision des infrastructures routières

Artikel: Des nuages sur la route
Autor: Vallet, Julien / Schaer, Philipp
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-630475>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

DES NUAGES SUR LA ROUTE

Le couplage d'un LiDAR mobile et d'un GPS à une centrale inertielle permet d'effectuer rapidement le relevé de grandes surfaces. Dans le cas d'infrastructures de transport, le recours à cette technique minimise les perturbations du trafic. La modélisation effectuée à l'aide des données ainsi acquises permet d'établir un état initial sur lequel planifier les travaux.

Julien Vallet et Philipp Schaer

La technologie LiDAR (Light Detection and Ranging) permet une mesure électronique de la distance, en se basant sur le temps de propagation de la lumière entre une source et un objet. A chaque mesure correspond un point situé à la surface de l'objet. En les multipliant, on obtient un nuage de points qui décrit la forme de l'objet en 3D.

Si l'utilisation du LiDAR en mode cinématique est apparue il y a environ vingt-cinq ans, c'est l'ouverture aux civils des techniques militaires de positionnement GPS et inertielle qui lui a permis de prendre son essor au début des années 2000.

Les nuages de points obtenus par LiDAR cinématique sont aujourd'hui monnaie courante dans les jeux de données à disposition des gestionnaires du territoire et ce à toutes les échelles: de la façade d'un bâtiment à un pays tout entier. Des milliards de points modélisent ainsi notre environnement et les applications sont innombrables: analyse d'obstacles, modélisation du terrain, simulation de risques naturels, planification et projet de construction.

L'acquisition terrestre est sensible aux obstructions du signal GPS (bâtiments, végétation). La surface couverte est restreinte, mais la densité d'information et le niveau de détail sont élevés. Elle se prête à la mesure d'objets linéaires de proximité de quelques dizaines de mètres de large. A contrario, l'acquisition aérienne pose peu de problèmes de géoréférencement GPS et permet de couvrir une plus grande surface, au prix d'une plus faible densité d'information. L'un des avantages du relevé cinématique par rapport aux relevés terrestres traditionnels est qu'il s'effectue sur route ouverte et ne perturbe donc quasiment pas le trafic.

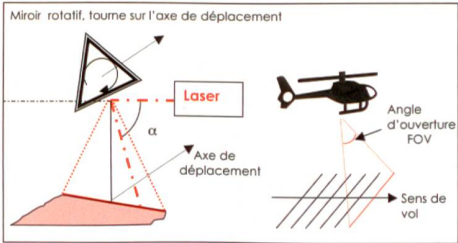
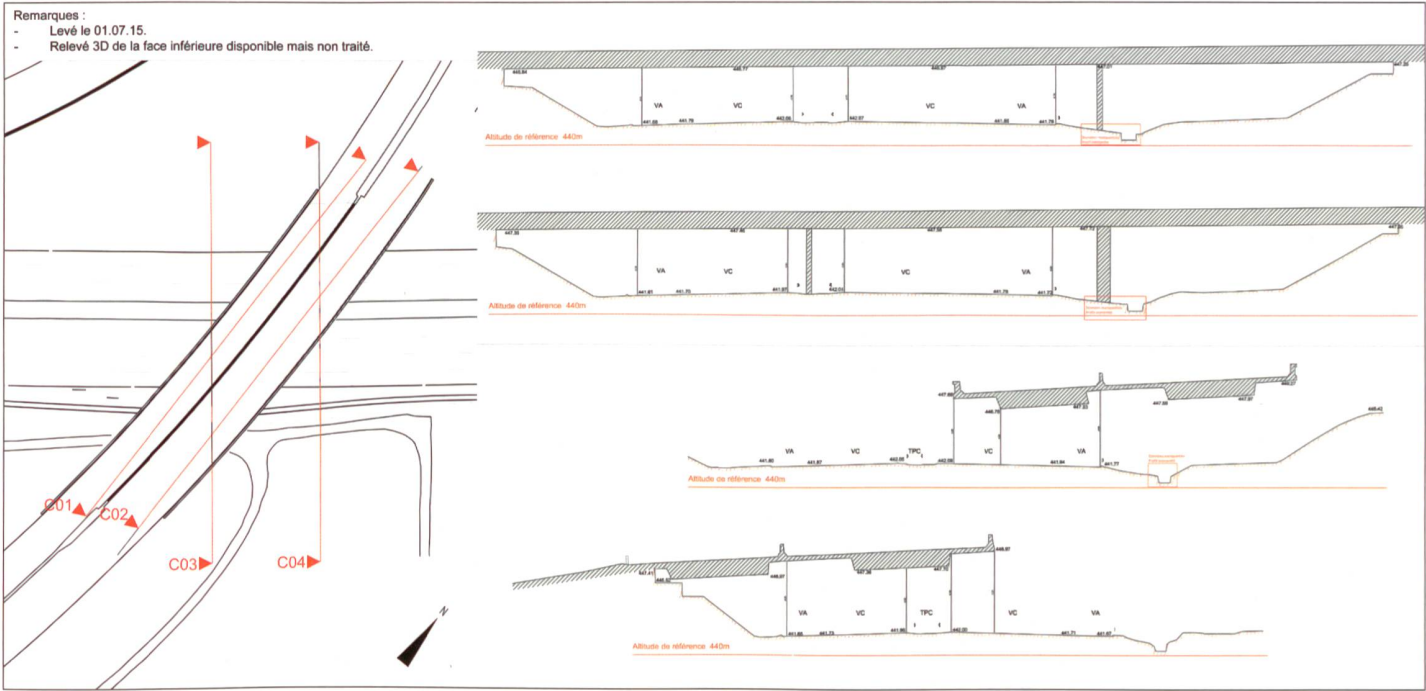
LiDAR et relevés des infrastructures routières

La filiale OFROU d'Estavayer-le-Lac utilise toujours plus les relevés aériens dans le cadre des projets d'entretien UPlaNS¹ pour connaître la géométrie détaillée de l'infrastructure autoroutière et de ses environs, sur environ 100 m de large.

L'objectif des relevés est de disposer d'un modèle numérique de terrain (MNT) fiable. Ce modèle, mis à disposition sous forme informatique aux bureaux d'ingénieurs, permet à ces derniers d'établir des coupes à n'importe quel endroit et selon n'importe quelle direction en fonction de leurs besoins spécifiques (**fig. 1**).

L'OFROU exige une précision absolue d'environ trois centimètres et une précision relative de l'ordre du centimètre au sein du nuage de points. Comme l'on atteint ici les limites de précision du positionnement cinématique par technique satellite-inertielle, même dans les constellations satellitaires les plus favorables, il convient d'ajouter des points de calage au sol sur lesquels ajuster les données LiDAR pour en améliorer la précision. Sous certaines conditions, cette technique peut également s'appliquer dans les tunnels, dans lesquels le signal GPS est bien évidemment absent. C'est dans ce contexte qu'Helimap System SA a combiné les acquisitions aériennes et terrestres afin d'en allier les avantages (**fig. 4**).

1 Unterhaltsplanung Nationalstrassen (Planification de l'entretien des routes nationales)
www.astra.admin.ch/autobahnschweiz/01069/01095/index.html?lang=de
www.astra.admin.ch/autobahnschweiz/01069/01095/index.html?lang=fr



Mesurer des distances avec de la lumière

Le principe de mesure de la distance par LiDAR est le suivant: un faisceau laser est émis par l'appareil, réfléchi par l'objet puis capté par un détecteur (photodiode), ce qui permet de mesurer le temps de propagation de la lumière entre l'appareil et l'objet. Connaissant la vitesse de la lumière, on en déduit la distance selon la relation:

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

Mais, pour déterminer les coordonnées du point mesuré, encore faut-il connaître la position de l'appareil et l'orientation du faisceau laser au moment de la mesure. Les LiDAR actuels effectuant jusqu'à un million de mesures de distance par seconde, leur utilisation en mode cinématique implique de positionner et d'orienter l'appareil en tout temps et à une fréquence suffisante pour éviter des erreurs d'interpolation.

Position et orientation

Dans le cas d'un LiDAR en mode cinématique, l'utilisation d'un récepteur GPS en mode différentiel seul ne suffit pas. En effet, le GPS ne fournira que la position (avec une précision de 5 cm) et la vitesse, mais pas l'orientation. De plus, la fréquence de mesure (1-5 Hz) se révèle insuffisante pour des vitesses aussi élevées que celles d'un avion ou d'une voiture. Sans compter que lorsque le signal GPS est mauvais ou absent (tunnel, pont), le positionnement est impossible.

Il convient donc d'associer le GPS à une centrale inertielle. Composée de trois accéléromètres et de trois gyroscopes, elle permet de mesurer à une fréquence de 200 à 400 Hz les accélérations et vitesses angulaires selon

Classe de centrale	MEMS low cost	MEMS tactique	FOG tactique	FOG navigation
Dérive angulaire	5-10°/h	1-3°/h	0,1-1°/h	<0,01°/h
Dérive de position sans GPS (60sec)	1-10 m	20-80 cm	10-15 cm	10-15 cm
Précision position couplage GPS	10 cm	5-10 cm	5 cm	5 cm
Précision angulaire couplage GPS	0,1-0,2°	0,05°	<0,02°	<0,005°
Utilisation	Smartphone, photo, voiture	LIDAR aérien courte distance	LIDAR aérien + terrestre	LIDAR aérien + terrestre haute précision
Coût	50-1000 €	5-10 000 €	30 000 €	100 000 €

Acquisition hélicoptée	Acquisition terrestre
+ Acquisition rapide + Précision: 3-5 cm + Précision relative: 1-2 cm + Couverture: ~120 m + Orthophoto 2-5 cm + Haute densité (~200 pt/m²) + Aucune perturbation du trafic + Points de calage hors chaussée	+ Acquisition rapide + Précision: 3-5 cm + Précision relative: 1 cm + Couverture: ~20-30 m + Très haute densité: ~1200 pt/m² + Couverture 360°: tunnel, passages inférieur/supérieur, façades des bâtiments, etc. + Documentation des petits objets
- Pas d'information sous les ouvrages - Information incomplète sur le bâti et les petits objets	- Précision très sensible aux obstructions GPS (montagne, environnement urbain, forêt, etc.) - Couverture réduite - Perturbation partielle du trafic - Points de contrôle sur la chaussée

- 1
- La modélisation d'un ouvrage permet d'en extraire n'importe quel profil.
- 2
- Illustration du système de balayage par miroir rotatif d'un LiDAR (à gauche) et illustration de couverture aéroportée (à droite)
- 3
- Performance des centrales inertielles en fonction de leur classe pour un couplage avec GPS différentiel (post-traitement). MEMS: Microelectromechanical systems (système micro-électro-mécanique), FOG: Fiber Optic Gyroscope (gyroscope à fibre optique).
- 4
- Avantages et inconvénients des acquisitions hélicoptées et terrestres pour les relevés routiers.

chacun des axes x , y et z . Connaissant l'orientation et la position de la centrale à un moment donné, on obtient sa trajectoire par intégration sur le temps. Cela permet de garder sur une certaine durée une position et une orientation de qualité en l'absence de signal GPS. Mais les centrales inertielles ont un défaut: elles dérivent dans le temps, plus ou moins vite selon leur qualité. Elles doivent donc être recalées régulièrement par des mesures externes (GPS, odomètre). La précision de la trajectoire va dépendre de la qualité de la centrale (fig. 3), d'autant plus lors de coupures du signal GPS.

Scanner le paysage

Si l'orientation du faisceau laser est fixe par rapport au référentiel mobile, on ne mesure qu'une suite de points formant une ligne durant le déplacement du véhicule. Pour couvrir une surface, il faut donc dévier le faisceau avec un dispositif de balayage. Pour ce faire, on utilise généralement un miroir rotatif déviant le faisceau perpendiculairement au sens de déplacement. Chaque « scan » se traduit ainsi par une série de points formant une ligne perpendiculaire au sens de déplacement (fig. 2).

En ajustant la fréquence de balayage à la vitesse du véhicule, on peut couvrir un corridor possédant une densité de points homogène sur les deux axes (scan et déplacement).

Lorsque les données LiDAR, GPS et inertiel sont combinées, il est possible d'exprimer la position d'un point P en fonction des mesures intrinsèques de chaque capteur selon la relation (fig. 5):

$$X_P^E = X_{IMU}^E + R_{IMU}^E \cdot R_{ALS}^{IMU} \cdot (e_{IMU}^{ALS} + R(\alpha_P) \cdot d_P)$$

X_{IMU}^E : position de la centrale inertielle dans le système objet
 R_{IMU}^E : matrice de rotation de l'orientation des axes entre IMU (unité de mesure inertielle) et objet (angles mesurés par la centrale inertielle)

R_{ALS}^{IMU} : matrice de rotation (désalignement entre les axes du système LiDAR et du système inertielle)

e_{IMU}^{ALS} : bras de levier entre centrale inertielle et LiDAR

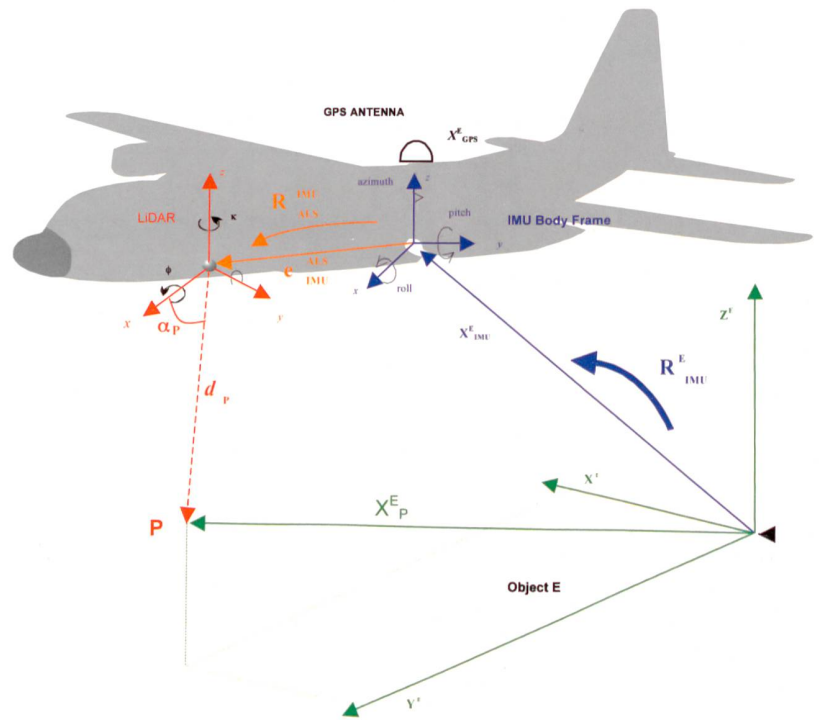
$R(\alpha)$: matrice de rotation de l'angle de rotation du miroir du LiDAR

d_P : distance mesurée par le LiDAR au point P

Méthodologie spécifique au projet de route

Restituer précisément tous les éléments géométriques d'un environnement routier (bords de murs de soutènement, bordures de routes, déformation de chaussée) nécessite une densité de points supérieure à 150 pt/m². Une acquisition cinématique à l'aide d'une voiture permet d'atteindre une densité d'environ 1200 pt/m² mais ne couvre que la chaussée et ses abords immédiats (5-10 m). Un relevé héliporté à basse altitude (~100 m/sol) offre une densité d'environ 200 pt/m² mais couvre une largeur de 100 à 150 m.

L'acquisition aérienne se prête idéalement à l'acquisition des sections de routes non couvertes car elle n'est pas sujette à des problèmes de visibilité GPS, un aspect qui peut s'avérer très limitant sur les routes alpines. Les données aériennes sont calées sur des points de contrôle disposés tous les 300-400 m, si possible hors emprise de la chaussée afin de perturber au minimum la circulation. Ces points sont en effet relevés par méthode traditionnelle (GPS différentiel RTK, GPS statique ou station totale) et doivent impérativement être plus précis que le relevé



5 Illustration du géoréférencement d'une mesure LiDAR cinématique (aérienne). E représente le système de coordonnées objet (par ex. système national). Le point P, mesuré par le LiDAR, est exprimé en fonction des mesures des différents capteurs (centrale inertielle et LiDAR)

LiDAR. Les données aériennes servent alors de référence au calage des données voiture sur ces courtes sections. Les données voiture permettent de compléter localement les informations relatives aux passages sous ponts et aux courts tunnels.

Les données LiDAR sont également combinées avec des prises de vue aériennes en haute résolution qui permettent, par des procédés photogrammétriques, de produire des orthophotos. Avec sa haute résolution, cette imagerie permet une meilleure interprétation de l'objet cartographié (fig. 6 et 7) et de mettre en avant des détails comme les regards ou des fissures.

L'acquisition des données LiDAR en milieu couvert (tunnels et galeries) est plus problématique en raison de l'absence de couverture GPS durant un grand laps de temps. La centrale inertielle dérive et, sans moyen externe de recalage, la précision des données se dégrade au cours du temps.

Dans ce cas, la technique la plus répandue consiste à placer des points de calage (deux points tous les 50 m au maximum) pour créer un modèle de déformation du nuage permettant de le réajuster. Cette technique nécessite cependant de nombreux points de calage, une tâche coûteuse et souvent délicate car impliquant une fermeture ou une modération de la circulation, sans compter la difficulté d'accès. Elle présente également l'inconvénient de corriger a posteriori les erreurs de trajectoire de la centrale inertielle.



CARACTÉRISTIQUES ET MATÉRIEL UTILISÉ POUR LES RELEVÉS HÉLIPORTÉS

- LiDAR Riegl VQ480i avec fréquence de 275 000 pt/sec et centrale inertielle de classe navigation
- Densité de ~200 pt/m²
- Altitude de vol sur sol: ~120 m/sol
- Largeur couverte par passage: ~120 m
- Couverture image avec pixel de ~1.5 cm permettant la réalisation d'orthophotos avec pixel de 2 cm
- Vitesse de relevé: 40 km/h
- Utilisation d'un point de calage tous les ~300-400 m
- Précision de mesure avant calage: ~3 cm en Z, ~3-4 cm en XY



CARACTÉRISTIQUES ET MATÉRIEL DU SYSTÈME MOBILE TERRESTRE IGI-SAM UTILISÉ POUR COMPLÉTER LES ZONES COUVERTES

- 2 LiDAR FARO Focus 3D avec fréquence de mesure de 250 000 pt/sec et centrale inertielle de classe navigation
- 1 LiDAR Riegl VZ400 en complément pour la couverture des accotements avec fréquence de mesure de 150 000 pt/sec.
- Densité de ~1200 pt/m²
- Largeur couverte: chaussée + ~20 m de part et d'autre sur sol plat
- 2 caméras 8 Mpix en vue arrière pour la documentation du mobilier routier
- 4 vidéos HD synchronisées avec la trajectoire pour documentation routière à 360°
- Vitesse d'acquisition: ~40-50 km/h
- Précision de mesure avant calage (sous bonne couverture GPS): ~3 cm en XYZ

Estimant qu'une correction au niveau du calcul de la trajectoire est préférable, Helimap System SA a développé un algorithme de recalage de cette dernière en utilisant des points de contrôle mais avec une distribution plus faible que le cas standard (un point tous les 200-400 m).

En fait, la densité des points de calage et la longueur de la section couverte traitable vont dépendre de la qualité de la centrale inertielle. Sur une centrale de type navigation, les dérives angulaires sont si faibles (<0.01°/h) qu'il est possible de rouler sous couvert quasi sans limite (au bout d'une heure, les angles auront dérivés de ~0.01°, soit une erreur de position de moins d'un millimètre à 5 m) – la limitation pouvant être la dérive de l'horloge de la centrale qu'il n'est pas possible de recalculer au moyen du signal de l'horloge GPS.

La position, quant à elle, dérive beaucoup plus vite. Il convient donc de la recalculer régulièrement. La technique développée se déroule de la sorte (fig. 8):

- calcul de la trajectoire sans calage externe dans le tunnel;
- génération du nuage de points sur la base de la trajectoire initiale;
- identification des points de calage dans le nuage de points (ce sont en général des rectangles ou des cercles de peinture de 20-30 cm, identifiables grâce à l'intensité de retour du signal LiDAR) et calcul du vecteur déplacement entre les coordonnées LiDAR et celles des points de calage;

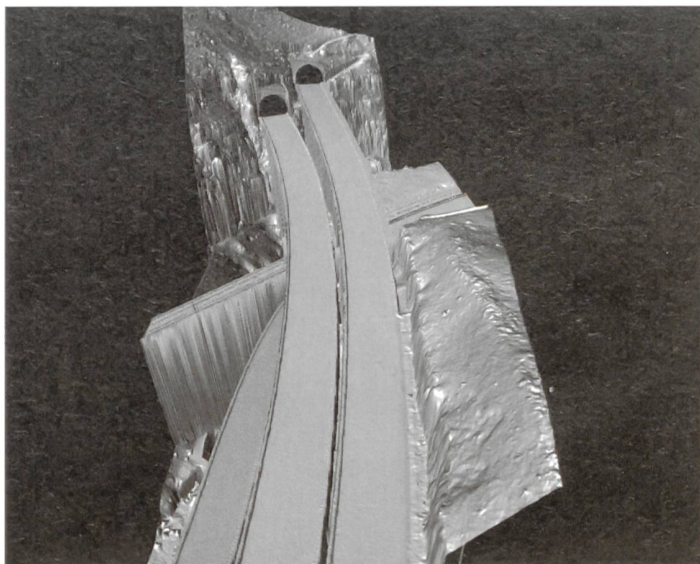
- identification du temps correspondant au point LiDAR voisin du point de calage (le temps GPS sert de référence à toutes les mesures: LiDAR, centrale inertielle, caméra, etc.);
- obtention d'un vecteur correction de la position à un temps GPS donné;
- application de la correction à la trajectoire au temps donné, ce qui donne une position de correction;
- second calcul de la trajectoire avec les positions corrigées comme recalage externe;
- calcul du nuage de points final avec cette deuxième trajectoire.

Dans le cas de zones particulièrement complexes empêchant une acquisition cinématique, on utilise un LiDAR statique posé sur un trépied et dont la position est déterminée par une station totale

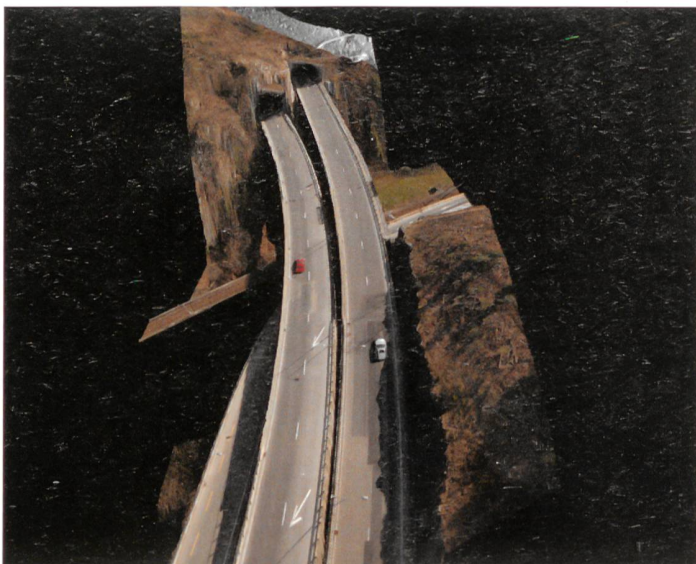
Traitement des données

Les données acquises sont ensuite traitées selon les processus suivants (fig. 9):

- Les données aériennes sont ajustées sur les points de calage.
- Les données voiture sont ensuite ajustées sur les données aériennes.
- Le nuage global final est filtré afin de ne garder que les points appartenant au sol, pour créer ensuite un modèle numérique de terrain (MNT); les points du sursol



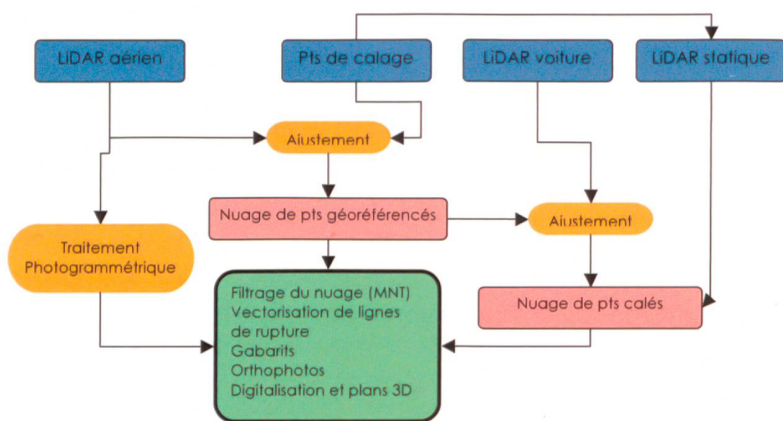
6a



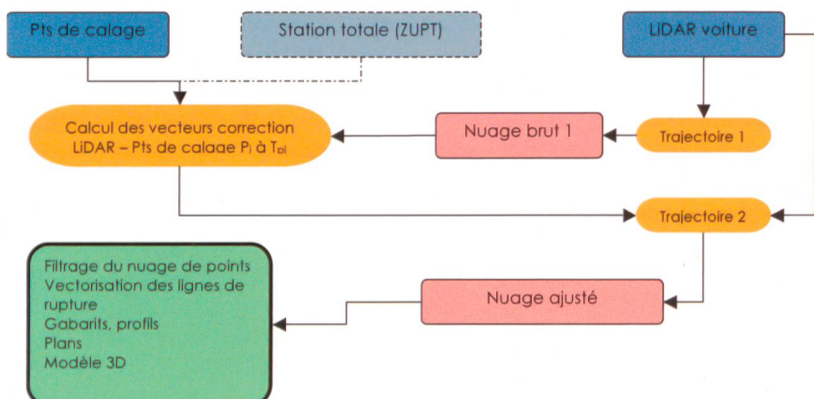
6b



7



8



9

- 6a MNT des viaducs de la Suze (A16)
- 6b Drapage des orthophotos sur le MNT des viaducs de la Suze (A16)
- 7 Combinaison d'un nuage de points et d'images orientées (A13, Thusis)
- 8 Processus de traitement des différentes sources de données LiDAR
- 9 Processus de traitement spécifique aux longs tunnels

peuvent également être classés en végétation, bâtiment, voûte de tunnel, etc.

- Le volume de données étant très important pour un nuage de points nominal, il convient de le dé-densifier en éliminant les points inutiles (par exemple sur les surfaces lisses); les discontinuités du terrain (bords de murs, bords de ponts, bordures, porches de tunnel) sont vectorisées sous forme de lignes de rupture et utilisées comme lignes de contrainte dans le MNT, ce qui permet également de réduire le volume de points finaux utilisés dans ce dernier.
- Les images sont traitées selon un processus photogramétrique classique (aérotriangulation + orthorectification) pour produire des orthophotos à très haute résolution (2 cm).
- Les orthophotos sont ensuite utilisées en combinaison avec le MNT pour digitaliser en 3D tous les éléments du mobiliers urbains: regards, grilles, pieds de panneaux, signalisation horizontale, bornes, délinéateurs. Cette digitalisation est ensuite mise en plan.
- Les données acquises en voiture dans les zones couvertes sont utilisées pour extraire les gabarits de passages sous ponts ou pour modéliser en 3D le pont ou le tunnel dans sa totalité.

Le rendu final des données est très semblable aux standards du passé. Mais comme les nuages de points LiDAR

sont extrêmement riches en information et offrent, au contraire des techniques traditionnelles, une couverture continue des objets, il est possible de dégrader l'information native (par exemple dé-densification) pour s'adapter à des applications métier. Avec comme avantage de pouvoir retrouver en tout temps l'information de détail.

Dans un avenir proche, on peut imaginer des logiciels de génie civil, de modélisation hydraulique capables de gérer en natif les nuages de points LiDAR et d'exploiter ainsi toute la richesse de l'information disponible.

Julien Vallet, dr. ing. dipl. EPFL, Helimap System SA

Philipp Schaer, dr. ing. dipl. EPFL, Helimap System SA

Votre expert en génie civil et en travaux publics spécialisés.
Excavations, Pieux, Ancrages, Terrassement,
Constructions hydrauliques.

jms-risi.ch



JMS RISI AG

Rapperswil-Jona: +41 55 286 14 55, Baar: +41 41 766 99 33, Sion: +41 27 322 63 60, info@jms-risi.ch