B.3 Le levé laser aéroporté : techniques, applications et recherche

Olivier de Joinville, Sébastien Saur & Frédéric Bretar

Introduction, historique

Le levé laser aéroporté a vu le jour avec l'Airborne Profile Recorder (APR) en 1970. Cet appareil permettait d'enregistrer un profil altimétrique par avion et déterminait l'altitude d'un point en combinant les mesures de deux instruments : un altimètre barométrique et un distance-mètre radar. Jusqu'au début des années 90, les lasers profileurs faisaient des coupes altimétriques de terrain.

Une nouvelle technologie, les lasers scanneurs, a été développée dans les années 95. Elle permet d'effectuer un balayage perpendiculaire au mouvement du vecteur et donc de couvrir des zones de terrain plus vastes nécessitant moins de lignes de vol. Les systèmes laser aéroportés offrent une acquisition rapide et précise de points 3-D, en mesurant la distance entre un avion (ou un hélicoptère) et le sol. Ils suscitent depuis quelques années un intérêt grandissant auprès de la communauté scientifique et métrologique mondiale, d'autant plus que la rapidité d'obtention de données 3-D, la bonne précision altimétrique en tous milieux et leur coût abordable, les posent en concurrents très sérieux des techniques d'acquisition 3-D par restitution photogrammétrique ou par corrélation.

Dans le cadre de la production de modèles numériques de terrain, les systèmes laser aéroportés permettent *a priori* d'atteindre des performances difficilement accessibles par d'autres techniques, aussi bien sur le plan de la précision et de la densité qu'en ce qui concerne les rendements au km². Il apparaît donc naturel d'évaluer l'apport d'une telle technologie pour la réfection de la BD Alti, base de données altimétrique de l'IGN. Après un rappel sur le fonctionnement des principaux systèmes laser et de leurs applications générales, nous discuterons de l'évaluation des données issues d'un vol laser sur la ville d'Amiens puis nous présenterons le vol laser effectué en zone rurale (dans le Vaucluse) en vue d'évaluer l'apport de cette technique dans la réfection de la BD Alti, pour enfin donner un état de l'art des recherches à venir au laboratoire MATIS.

Fonctionnement et applications

Olivier de Joinville

Acquisition

Principe général

Le principe de fonctionnement des systèmes laser est simple [JOINVILLE et al 02] : une série d'impulsions est émise à très haute fréquence (jusqu'à 83 kHz), puis est réfléchie par le sol. La distance entre le sol et l'avion est ensuite évaluée en fonction de la mesure du temps de retour de l'impulsion. La plupart des systèmes fonctionnent dans des longueurs d'onde appartenant au proche infrarouge (de 1 000 à 1 500 nanomètres). Afin d'assurer une localisation spatiale précise de l'émetteur-récepteur laser, les LIDAR (LIght Detection And Ranging) utilisent un système de positionnement composé d'un récepteur GPS embarqué et d'une centrale inertielle (INS). Il est préférable en outre de disposer d'au moins une station GPS au sol, à proximité de la zone de vol, pour améliorer la précision géographique du capteur (figure B.3.1).

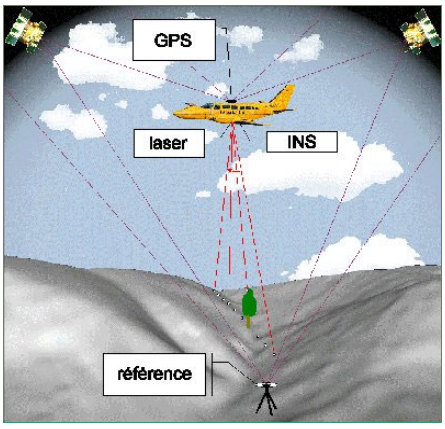


figure B.3.1
Principe d'acquisition des mesures laser.

Différentes techniques de balayage

Plusieurs méthodes de balayage du terrain ont été mises au point par les différents constructeurs afin d'optimiser la densité et l'homogénéité des points 3-D mesurés au sol.

Miroir oscillant

Le miroir est en rotation autour de l'axe de vol et crée des lignes en dents de scie. C'est le système le plus répandu (Optech et LHS), voir figure B.3.2, ci-dessous.

Faisceau de fibres

C'est le système adopté par la société allemande TopoSys. Il se présente sous forme d'un pinceau de fibres optiques (cent vingt-huit, actuellement) dans lesquelles les impulsions laser sont distribuées à très haute fréquence (83 KHz) par un moteur rotatif. Ce système performant présente malgré tout l'inconvénient d'avoir une répartition des points beaucoup plus dense dans le sens de la trajectoire de l'avion que dans le sens perpendiculaire (environ 20 cm à 1 000 m pour 1,2 m perpendiculairement à la trace), voir figure B.3.2, ci-dessous.

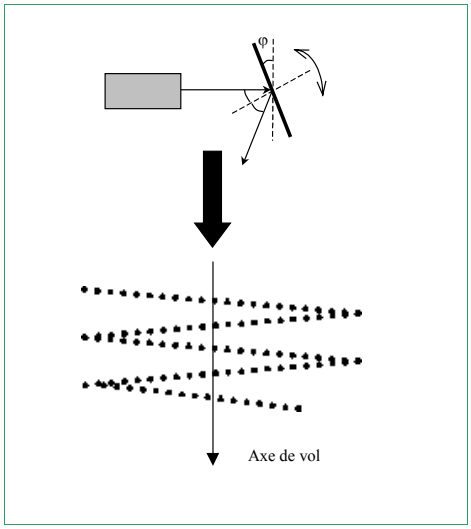


***figure B.3.2** : principe du miroir oscillant*

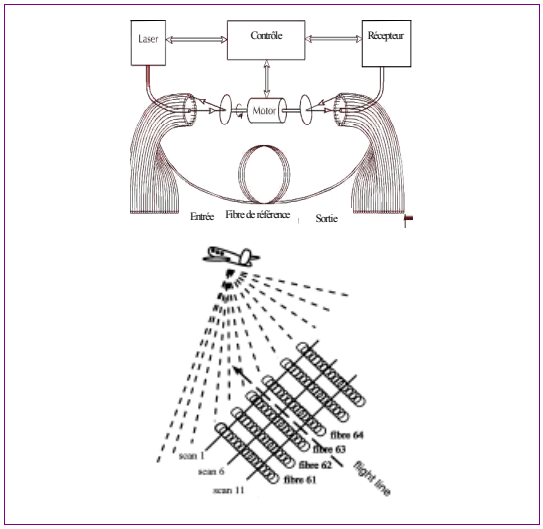


***figure B.3.3** : principe du faisceau de fibres (©TopoSys)*

Deux techniques sont actuellement étudiées par l'université de Stuttgart, elles visent à obtenir une répartition plus homogène au sol :

Miroir rotatif à axe incliné

Le miroir tourne autour d'un axe légèrement incliné, engendrant une déviation du faisceau et des traces elliptiques. Ce principe appelé ScaLARS et développé par l'université de Stuttgart semble améliorer l'homogénéïté de la répartition des points au sol.

Polygones en rotation

Ce système combinant plusieurs miroirs en rotation autour d'un axe produit des lignes parallèles. C'est en fait le même principe que celui du miroir oscillant, mais sans retour. Ce système assure une couverture assez homogène de la zone couverte.

Paramètres caractéristiques

Le tableau B.3.1, page suivante, décrit différents paramètres caractérisant les systèmes laser dont certains sont directement liés aux capacités de l'instrument (fréquence, divergence…). Si l'on veut, par exemple, faire du levé en zone urbaine, il faudra éviter d'utiliser un angle de balayage trop élevé afin de limiter le nombre d'occultations, même si cela nécessite un nombre de bandes supérieur.

***tableau B.3.1** : paramètres de vol des systèmes laser*

Paramètres techniques	
Fréquence des impulsions	Typiquement 10 à 30 kHz, jusqu'à 83 kHz.
Angle de balayage	Typiquement 10° à 45°, 75° maxi.
Fréquence de balayage	Quelques dizaines de lignes par seconde.
Nombre d'échos enregistrés par impulsion émise	Jusqu'à 5, en milieu forestier.
Fréquence d'acquisition des mesures GPS/INS	GPS : de 1 à 10 Hz, INS : 50-200 Hz.
Divergence du faisceau laser	De l'ordre de 0,5 mrad soit environ 10 cm au sol à 1 000 m.

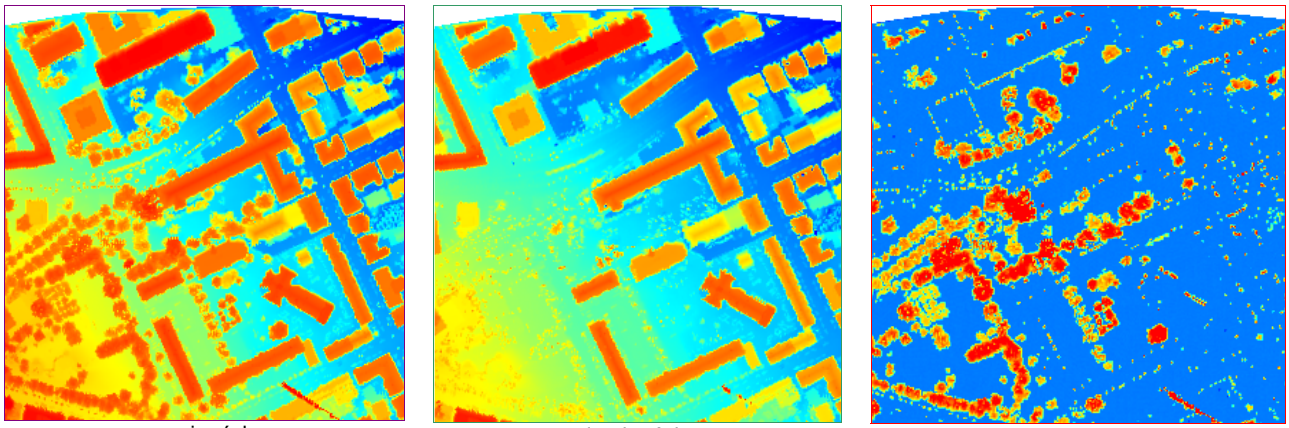
Paramètres de vol	
Hauteur de vol	De 100 jusqu'à 3 000 m, 6 000 m maxi.
Vecteurs	Hélicoptère ou avion.
Densité des points	De 0,1 à 5 points par m^2.
Largeur de bande	Environ 580 m pour un angle de balayage de ±20° et une hauteur de vol de 800 m. 2 400 m pour un angle de balayage de 45° et une hauteur de vol de 3 000 m.

On constate que la fréquence d'acquisition du GPS et de l'INS (respectivement ~1 Hz et ~100 Hz) est beaucoup plus faible que la fréquence d'acquisition des points (~50 kHz). Ceci suppose une interpolation de la position et des angles d'attitude de l'avion pour connaître la position et l'orientation du faisceau laser à chaque impulsion. La fréquence des impulsions combinée avec la vitesse de vol du vecteur permet d'obtenir une densité de points au sol se situant entre 0,1 et 5 points par m^2.

Des survols à très haute altitude (6 000 m) sont depuis peu possibles. Ils permettent de couvrir des surfaces très importantes, mais la densité de points au sol et la précision des mesures sont beaucoup plus faibles qu'à une altitude moindre. Il apparaît de plus qu'à cette altitude, la vitesse de l'avion est, en général, plus élevée et que le signal est fortement atténué par la traversée de l'atmosphère.

Echos multiples

Une des principales caractéristiques du laser est la séparabilité du faisceau, enregistré sous forme d'échos multiples : il arrive en effet fréquemment que le rayon se divise en deux parties : une partie est réfléchie par un objet en sursol (végétation, bâti) et l'autre atteint le sol pour s'y réfléchir. La plupart des systèmes n'enregistrent que deux échos. En faisant la différence des cartes altimétriques du premier et du dernier écho, on voit apparaître distinctement la végétation ainsi qu'une partie des bords de bâtiment.

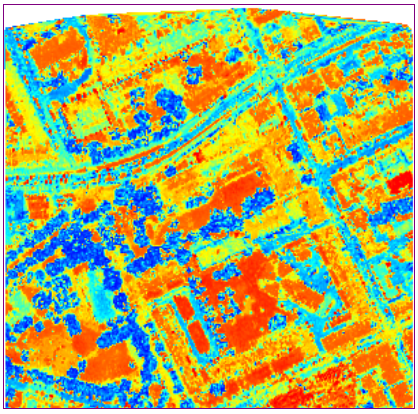


premier écho | dernier écho | carte des différences

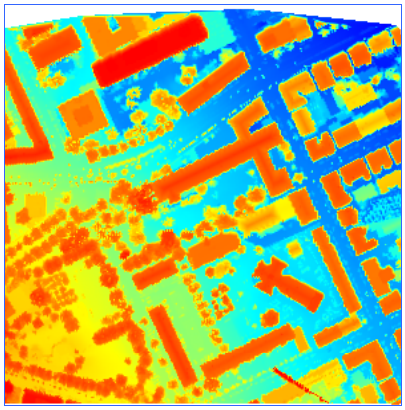
***figure B.3.4** : visualisation d'une carte altimétrique premier écho, dernier écho et d'une carte de différences*

Données de réflectance

Certains LIDAR aéroportés enregistrent de plus une information de réflectance. Celle-ci fournit une information sur la quantité de signal reçue et dépend essentiellement de la nature du matériau rencontré par le rayon laser. Elle n'est que peu corrélée aux cartes altimétriques comme le montre la figure B.3.5.



carte de réflectance



carte altimétrique

figure B.3.5 *: carte de réflectance et carte altimétrique*

Applications

En milieu forestier [HAUGERUD, HARDING 01]

À l'identique de la situation rencontrée sur les bords de bâtiments, le rayon peut pénétrer la végétation et réfléchir un ou plusieurs échos . Le premier représente souvent la canopée, tandis que le dernier écho se situe généralement au niveau du sol. La figure B.3.6 montre clairement les réflexions des sommets des arbres, distinctement des réflexions du sol.

figure B.3.6 *: coupe altimétrique laser en milieu forestier*

MNS de sites urbains

Les modèles numériques de surface restitués par laser aéroporté en milieu urbain sont essentiellement destinés aux opérateurs de télécoms, mais d'autres applications peuvent être envisagées, notamment la génération de modèles d'écoulements lors de crues ou la détection de changements. Comme nous le verrons dans la deuxième partie avec le vol sur la ville d'Amiens, les MNS laser en zone urbaine souffrent de quelques imperfections (contours rarement rectilignes, façades souvent lissées par les interpolations entre les points et donc rarement verticales...).

MNT

Il existe de nombreux logiciels de classification sol/sursol [KRAUS, PFEIFER 01] qui permettent de filtrer les points du sursol pour n'obtenir que des points contenant le sol et donc un MNT. Sur la figure B.3.8, page suivante, on voit que la partie inférieure gauche ne comprend plus ni les bâtiments, ni la végétation à la suite de son filtrage.

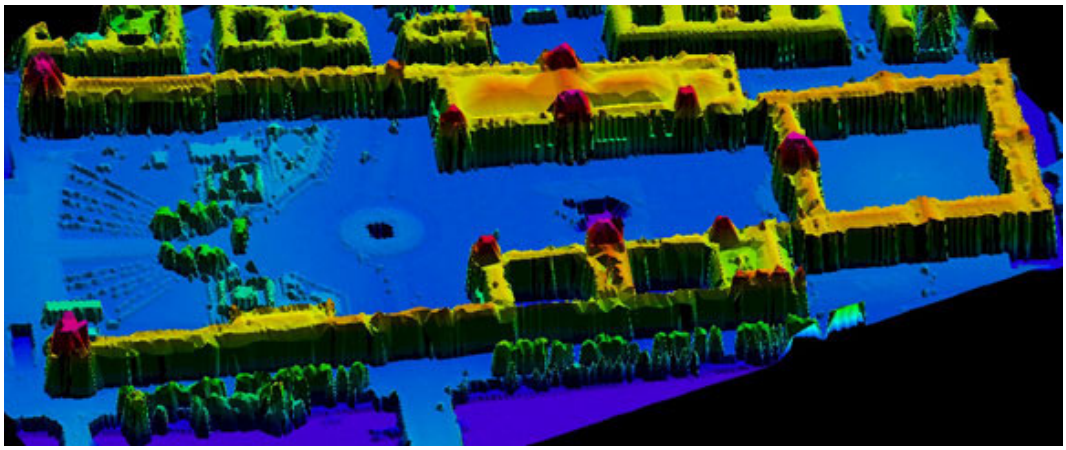


figure B.3.7 *: modèle 3-D du Louvre dérivé d'un nuage de points laser*

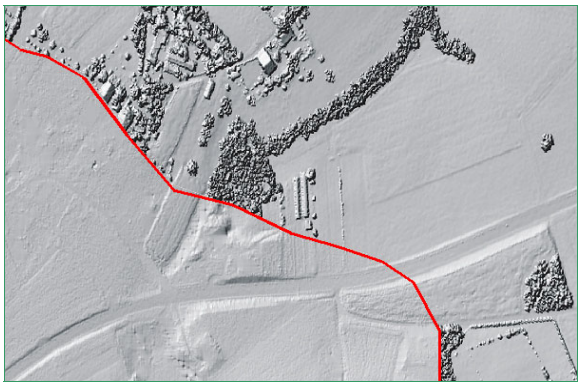


figure B.3.8 *: exemple de classification sol-sursol*

Surveillance de risques naturels et suivi de côtes

Le levé laser a déjà été utilisé pour l'étude de mouvements de terrain. Cette application profite, en plus de la précision, de la rapidité d'acquisition et de la disponibilité des modèles. De même, des applications existent pour la détection de changements suite à un tremblement de terre ou pour la prévision de risques d'inondation. La surveillance des côtes (figure B.3.9) peut se faire avec des lasers dédiés à la bathymétrie ayant un pouvoir de pénétration important dans l'eau très claire.

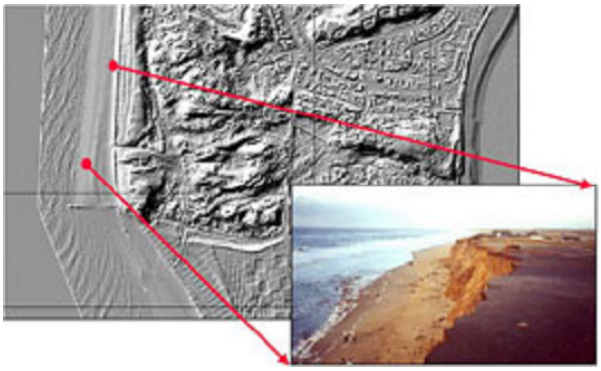


figure B.3.9 *: application du laser aéroporté pour le suivi des côtes (©TopoSys)*

Relevé de corridor

Le levé laser est également employé pour des projets linéaires de faible largeur, comme le levé le long de lignes à haute tension (figure B.3.10, page suivante), ce qui permet de localiser rapidement les obstacles (par exemple : des arbres) présentant un danger potentiel.

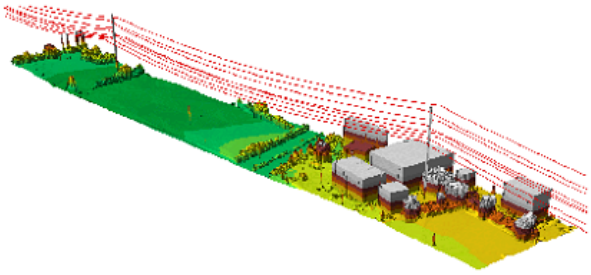


***figure B.3.10** : relevé d'une ligne à haute tension* (©TopoSys)

Projets de grande envergure

Deux projets à l'échelle nationale sont actuellement en cours. Ils concernent un pays très montagneux, la Suisse, pour l'amélioration de son MNT (précision de 30 à 50 cm) et un pays très plat, la Hollande, essentiellement pour le suivi de la montée des eaux aux abords des côtes [IRISH, LILLYCROP 99].

La reconstruction 3-D de bâtiments [VOSSELMAN, SUVEG 01], [HAALA, BRENNER 99] est une application qui fait encore partie du domaine de la recherche. Celle-ci peut se faire uniquement avec les points 3-D ou avec l'apport de données externes comme le cadastre.

Vol sur Amiens

L'IGN a sous-traité ce vol auprès de la société Toposys pour tester les performances du laser aéroporté en zone urbaine et péri urbaine. L'IGN possédant un chantier complet d'images numériques sur la ville d'Amiens, il semblait logique de faire ce vol-test sur la même zone. Ce vol s'est déroulé dans des conditions climatiques très favorables, à savoir un temps sec et clair ce qui a permis d'obtenir un pourcentage très important d'échos fiables.

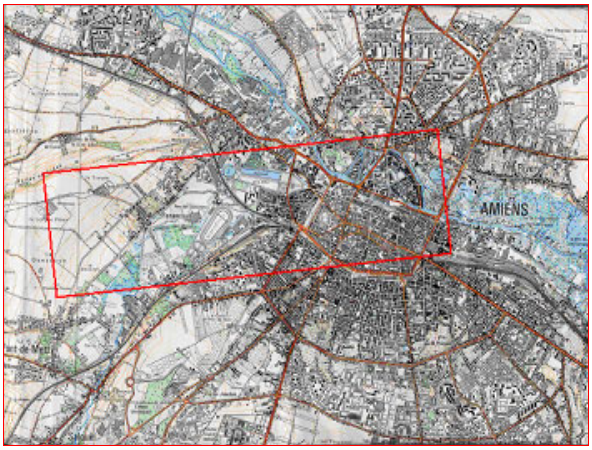


***figure B.3.11** : zone de survol laser sur Amiens*

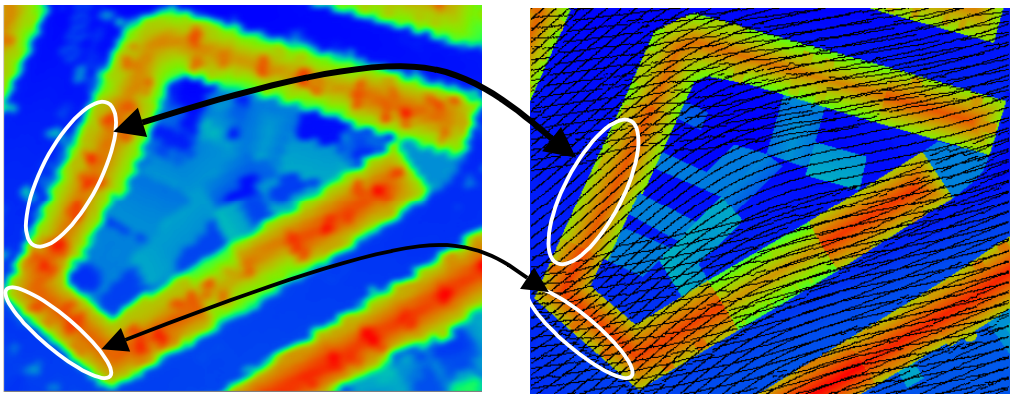
Caractéristiques techniques du vol

- quatorze bandes longitudinales d'environ 250 mètres de large chacune et une de contrôle dans le sens transversal ;
- GPS différentiel sur station de référence proche d'Amiens ;
- densité : environ 4 à 5 points par m² ;
- altitude : 1 000 m/sol ;
- superficie : environ 10 km².

Différents travaux d'évaluation de données laser ont déjà été effectués dans la littérature [CASELLA 01].

En ce qui nous concerne, les données (données brutes premier et dernier écho et MNS) ont été évaluées suivant le protocole suivant :

- *des évaluations intrinsèques* (sans référence), les données sont projetées sur une grille et l'on peut visuellement se rendre compte de la distribution des points dans l'espace. Les évaluations intrinsèques nous ont permis de constater que la répartition des points est assez inégale du fait du système lui même et du fait que certaines zones sont couvertes par une seule bande et d'autres par plusieurs. Cette répartition inhomogène laisse présager certains défaut dans les MNS, que l'on a pu constater en analysant la qualité des MNS créés par Toposys.



MNS Laser — Projection sur le MNS de référence

figure B.3.12 *: différence de contours en fonction de la densité de points*

- *des comparaisons du MNS laser avec un MNS de référence* (TRAPU) sur le plan altimétrique par mise en géométrie commune et différence pixel à pixel et sur le plan planimétrique par extraction de contours du MNS laser et comparaison avec le contour de référence ;
- différents types de toits ont été étudiés : plats, bipente et monopente ;
- les histogrammes d'erreurs (exactitude altimétrique) présentent un ou plusieurs modes. Certains sont bien centrés avec un biais très faible, ce qui indique que les résultats sont proches de la référence dans l'ensemble. D'autres font ressortir un biais provenant la plupart du temps du fait que le laser a détecté certains objets (cheminées, mansardes,…) qui n'apparaissent pas toujours dans la référence ;
- les écarts-types des erreurs sont assez peu élevés, en effet le laser est un système fiable : sur la même surface les mesures sont très peu bruitées ;
- *des comparaisons des MNS Laser avec des MNS de corrélation* : les MNS laser et de corrélation ont été comparés avec les MNS Trapu. Les statistiques font ressortir un bruit important dans les MNS multi-corrélation par rapport aux MNS Laser sur certains pans de toit, ceci provient du manque de robustesse du coefficient de corrélation multi-images dans les zones peu texturées.

Application à la BD Alti

Sébastien Saur

Introduction

Contrairement à la quasi totalité des applications actuelles des lasers aéroportés (modèles de forte densité et haute précision), notre objectif est ici la constitution d'une base de référence altimétrique, de précision métrique, et d'une densité après traitements de l'ordre d'un point tous les cinq mètres, environ. Les besoins en réfection portent principalement sur les zones de moyenne et haute montagne où la qualité BD Alti existante est la plus faible.

Le test s'est déroulé du 19 août au 3 septembre 2002 en collaboration avec la société LH Systems (Leica Helava Systems), selon les modalités suivantes : prêt et installation d'un système ALS 40, démonstrations (manipulations et post-traitement des données) réalisées par LHS, l'IGN fournissant l'avion et finançant les vols. Les tests ont eu lieu sur des zones diverses selon des spécifications définies par l'IGN et compatibles avec l'objectif de réfection de la BD Alti.

Caractéristiques du matériel testé

Le système Leica Helava Systems ALS 40 embarqué présenté en figure B.3.13, page suivante, est constitué de trois éléments principaux : le scanner laser à balayage proprement dit (A), un rack informatique (B) et un ordinateur portable de pilotage (C).

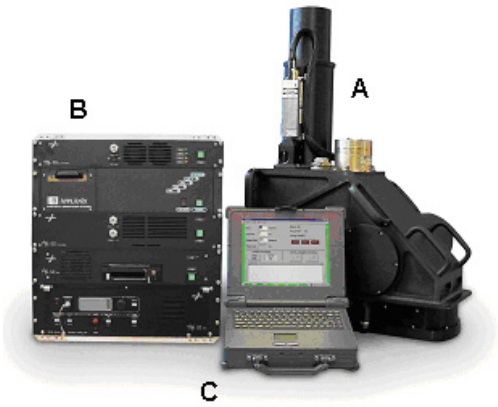


***figure B.3.13** : le laser aéroporté ALS 40*

Le scanner laser (A) est principalement constitué d'un émetteur laser à impulsion, d'un système de miroirs dont l'un est oscillant, d'un système de réception à diode et d'une centrale inertielle APPLANIX.

Le rack informatique (B) comporte le système de positionnement (récepteur GPS et centrale inertielle APPLANIX) avec le lecteur de carte PCMCIA pour le stockage de ces données, le périphérique de stockage des données laser (disque dur extractible) et l'alimentation de l'ensemble.

Le tout est contrôlé par l'intermédiaire du PC portable : tests de fonctionnement, commande du système… Ce PC fonctionne sous Windows 98 et peut être utilisé par l'intermédiaire de son écran tactile, ce qui en vol est plus pratique que le dispositif de pointage classique.

Les caractéristiques physiques du système sont les suivantes :

Angle de balayage	10 à 75°
Hauteur de vol	500 à 3 000 m 500 à 6 100 m avec un miroir oscillant plus large
Fréquence de balayage maximum	34,1 Hz à 45° d'angle de balayage (petit miroir) 24,4 Hz à 75° d'angle de balayage (petit miroir) 11,3 Hz à 45° d'angle de balayage (grand miroir) 8,8 Hz à 75° d'angle de balayage (grand miroir)
Fréquence maxi. des impulsions	15 à 50 kHz (en fonction de la hauteur de vol)
Nombre de retours enregistrés	1 à 3 (avec intensité) 1 à 5 (sans intensité)
Système GPS	Bi-fréquence 2 Hz
Système inertiel	Applanix AIMU 200 Hz

Fonctionnement

Installation

Le système laser a été relativement aisé à installer sur la trappe avant du Beechcraft Super King Air F-GALP de l'IGN, moyennant la fabrication par les ateliers du SAA de deux pièces métalliques permettant d'utiliser les trous de fixation existants pour les chambres RMK TOP. Le rack a été sanglé sur le coté gauche de l'appareil. Une antenne GPS bi-fréquence a été installée sur l'avion à côté du GPS de navigation.

Les photos suivantes (figures B.3.14 et B.3.15, page suivante) montrent l'installation réalisée.

figure B.3.14

Le rack informatique installé dans le Beechcraft.

figure B.3.15

l'ALS 40 et ses connexions avec le rack informatique.

Fonctionnement en vol

Système de positionnement

Afin d'obtenir la meilleure qualité de trajectoire possible, il faut être prudent quant à la station GPS de référence. Toute la géométrie est issue de ce calcul de trajectographie combinant les données GPS et inertielles, aucun processus d'ajustement (similaire à une aérotriangulation, avec points d'appui et points de liaison entre bandes) n'existait dans le cas présent.

La station de référence doit être constituée d'un récepteur bi-fréquence capable d'enregistrer à une fréquence d'au moins 1 Hz (2 Hz sont préférables, puisque le récepteur embarqué travaille à cette fréquence). De plus, il doit être à distance raisonnable de la zone à couvrir : à moins de 30 km du lieu d'initialisation du système (au sol ou en l'air) et à moins de 80 km de la zone à couvrir. Ceci peut être assuré par plusieurs récepteurs, par exemple plusieurs stations du réseau géodésique permanent (RGP). A l'heure actuelle, seules dix-sept stations du RGP enregistrent en permanence à une fréquence de 1 Hz, ce qui imposerait soit l'envoi d'opérateurs sur zone pour y installer un récepteur, soit la modification temporaire des paramètres de réception des stations du RGP. A terme, la densité prévue du RGP devrait être suffisante pour ce type d'application.

D'autre part, le comportement de la centrale inertielle dépend de la longueur des axes de vol. Plus l'axe sera long, plus la dérive dans la mesure des angles et des accélérations sera importante, ce qui dégradera le positionnement des points au sol. Les axes réalisés sur le Vaucluse faisaient 17 km de long. On n'a pas noté d'effet de dérive de la centrale Applanix, qui auraient pu se traduire par des décalages altimétriques et planimétriques entre bandes plus importants aux extrémités. Toutefois, dans l'optique de la réfection de la BD Alti, les axes de vol seraient certainement plus longs et donc ces problèmes seraient à étudier plus en détail.

Contrôle de l'ALS 40

Le PC portable fournit des indicateurs de fonctionnement des différents éléments du système (émission laser, réception laser, inertiel, GPS, enregistrement). Toutefois, il faut noter que lors de la panne du système de détection survenue jeudi 22 août, le seul message était que le système recevait zéro retour. De plus, les tests au sol effectués avant le décollage n'ont pas mis le problème en évidence : en effet, l'ALS 40 possède deux systèmes de détection, un pour le vol et l'autre pour les tests au sol ...

Paramétrage de l'ALS 40

Quatre paramètres sont à définir avant l'acquisition des données : angle de balayage, fréquence de balayage, fréquence des impulsions et intervalle de distance. Ce dernier paramètre permet de filtrer automatiquement des retours qui ne sont évidemment pas au sol (nuages, par exemple).

En principe, le choix des paramètres s'effectue au sol à l'aide du logiciel de planification fourni. Toutefois, il est parfois nécessaire d'ajuster en vol les paramètres choisis pour se donner une marge de sécurité. En cours d'acquisition, on peut contrôler les distances mesurées au nadir et de chaque côté de la fauchée, le système de positionnement GPS et inertiel et le taux de retours.

Les vols effectués avec l'ALS 40

Vol de calibration

L'objectif du vol de calibration est de déterminer certains paramètres du système : systématismes dans la mesure de distance, erreurs d'alignements entre la centrale inertielle et le scanner laser, position relative de l'antenne GPS et de l'INS.

Pour cela, on survole quatre fois une même zone sur laquelle on dispose de points de contrôle connus en X, Y et Z. On a utilisé la base de Creil et son polygone d'essai (trente-cinq points connus à quelques millimètres, déterminés en 1991). Les quatre axes de vol sont perpendiculaires deux à deux, à deux altitudes différentes (on a volé à 1 500 et 3 000 pieds au-dessus du sol) et en sens inverse à chaque passage (par exemple nord-sud et ouest-est à 1 500 pieds, puis sud-nord et est-ouest à 3 000 pieds).

Un premier vol commencé le 22 août a été interrompu lorsqu'une panne sur l'ALS 40 a été constatée. La calibration a été réalisée le lendemain après réparation du système.

Vol sur Paris et le Mont Pagnotte

À la demande de Leica France, on a effectué un axe de vol au-dessus de Paris entre la Défense et le Louvre, à l'altitude limite (6 600 pieds), avec un angle de balayage de 45° (22,5° de part et d'autre de l'axe vertical), ce qui donne une densité de points au sol d'un point pour 5 m².

Le Mont Pagnotte est une zone boisée à proximité de Creil. Ce vol est destiné à estimer les performances du laser à haute altitude sur une zone boisée. Un seul axe de vol était prévu avec des caractéristiques identiques à celles utilisées sur le Vaucluse (3 000 m, 45°, un point pour 8 m²).Ce vol a eu lieu le samedi 24 août entre 18 et 20 heures, en raison du trafic aérien et des conditions météorologiques. Au retour de ce vol, un axe à 3 000 m a de nouveau été réalisé au-dessus du site de Creil pour contrôler la calibration.

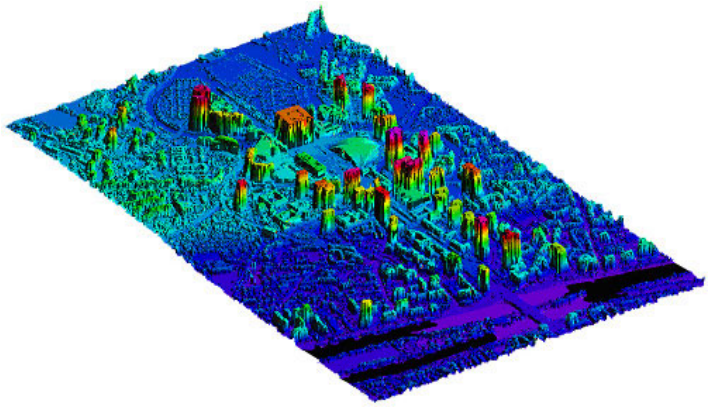


***figure B.3.16** : MNE sur le quartier de la Défense, vol laser du 24 août 2002*

Vol sur le Vaucluse

Initialement, il était prévu de traiter une seule zone de moyenne montagne dans des conditions qui pourraient être celles de la réfection de la BD Alti par laser. Le site des dentelles de Montmirail (département du Vaucluse) a été choisi pour son relief accidenté (600 m de dénivelée sur 120 km²), et pour la disponibilité de données BD Topo qui pourront servir de référence.

Les paramètres choisis pour le vol sont les suivants :

- angle de balayage : 45° ;
- hauteur de vol : 3 000 m ;
- fréquence de balayage : 26 Hz ;
- fréquence des impulsions : 22 kHz ;
- recouvrement entre bandes : 20% ;

- largeur de fauchée utile : 2 100 m, soit cinq axes de vol ;
- densité de points au sol : 1 point / 8 m² en moyenne.

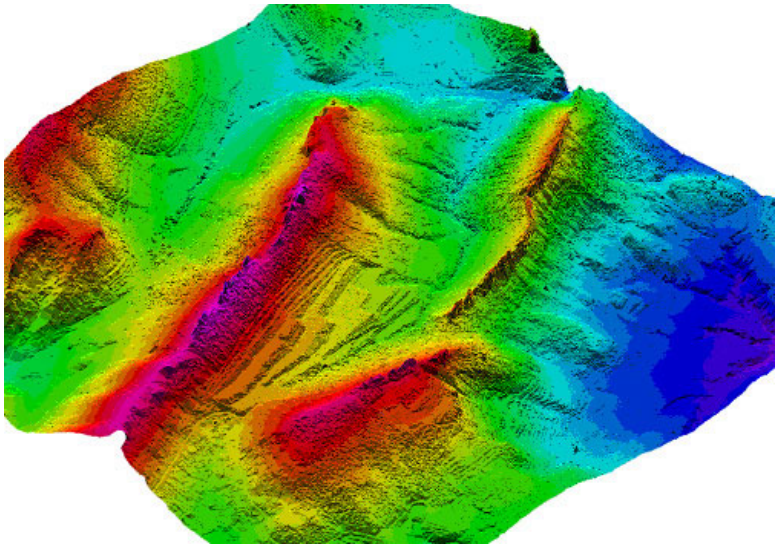


figure B.3.17 *: dentelles de Montmirail (Vaucluse, extrait) vol laser du 3 septembre 2002*

Résultats

La comparaison avec les points de contrôle a été faite en réalisant sur chaque zone une classification du sol à partir des points laser, puis une triangulation dans laquelle les altitudes correspondant aux points de contrôle sont interpolées.

Comparaison avec les points de contrôle

Lors du vol de calibration, les résultats obtenus ont montré un écart altimétrique moyen (interprété comme un biais) sur les points de contrôle du polygone de Creil de l'ordre de 80 cm avec un écart-type de l'ordre de 7 cm (pour des hauteurs de vol à 450 m et 900 m). Le biais a pu être totalement compensé par le processus de calibration.

Lors du contrôle de la calibration réalisé le lendemain, l'analyse des points de contrôle donne un biais résiduel de 2 cm avec un écart-type de moins de 10 cm, pour un vol à 3 000 m au-dessus du sol. Sur la zone du Vaucluse, les écarts altimétriques entre les données brutes (points non filtrés) et les six points de contrôle réalisés par GPS font apparaître une erreur moyenne de 22 cm pour un écart-type de 20 cm. L'erreur moyenne relativement forte peut provenir uniquement du faible nombre de points de contrôle disponibles et donc ne pas être significative. Seule la comparaison des données laser avec d'autres MNT (BD Topo, par exemple), même s'ils sont intrinsèquement moins précis, pourra permettre d'obtenir des statistiques plus robustes.

Comparaison avec les données BD Topo

Sur Paris, on a comparé les données laser avec le réseau routier de la BD Topo (plus de 12 000 points).

Du fait de l'étendue de la surface survolée sur le Vaucluse (120 km²), on a sélectionné trois zones représentant des types de paysage différents : falaises, collines boisées et plaine. La comparaison a été faite par rapport au MNT BD Topo.

	Vaucluse			**Paris**
Laser - BD Topo	**Plaine**	**Collines**	**Falaises**	**Réseau routier**
Moyenne des écarts	-0,80 m	-0,26	-0,47	-0,31 m
EMQ à 100%	1 m	2,25 m	2,67 m	1,75 m
EMQ à 98%	0,90 m	1,98 m	1,86 m	1,13 m

Les écarts les plus forts donnent toujours un MNT laser plus bas que le MNT BD Topo. Ce résultat s'explique par le fait que la classification du sol a tendance à la sous-détection : tous les points détectés sont effectivement au sol, mais certains points au sol ne sont pas détectés, en particulier dans les zones de rupture de pente importante et convexe : crêtes, talus, quais, routes en remblai, etc. Certaines crêtes très acérées ont même été tronquées d'une cinquantaine de mètres en hauteur et ont dû faire l'objet de corrections spécifiques. L'absence d'outil fiable de contrôle et de correction a empêché de traiter ces zones de façon exhaustive.

Globalement, les écarts constatés sont de l'ordre de la précision estimée des données BD Topo. La description du terrain est bien entendu plus détaillée, du fait de la forte densité de points au sol (figure B.3.18). C'est particulièrement visible sur les thalwegs encaissés et les falaises abruptes (lorsqu'elles ont pu être correctement corrigées).

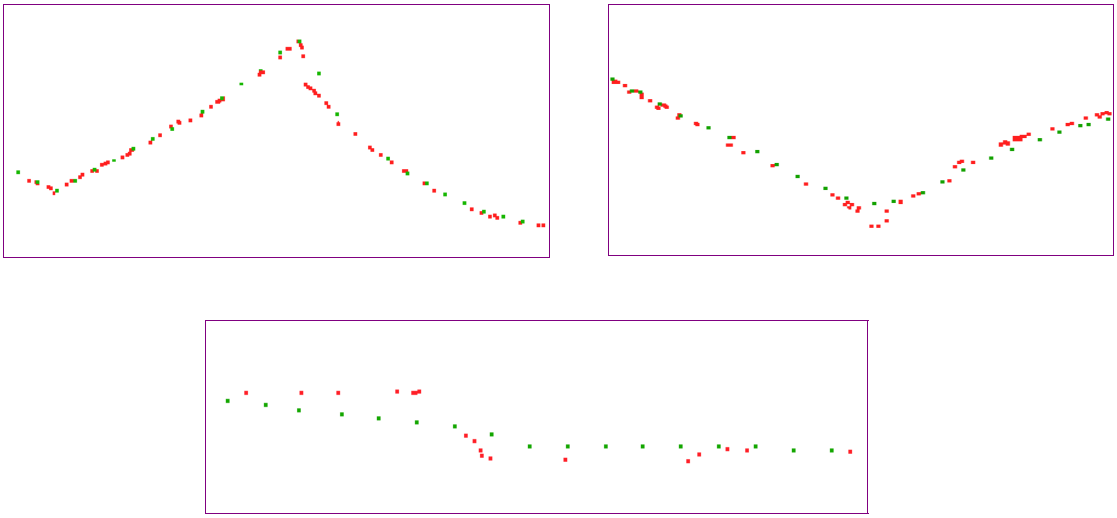


figure B.3.18 *: quelques profils comparant MNT laser (rouge) et MNT BD Topo (vert)*

Remarque sur la cohérence entre bandes

Le chantier du Vaucluse comprenait cinq bandes (l'une d'elles a même été volée deux fois). Si globalement et compte-tenu des objectifs attendus en terme de précision (métrique), la cohérence entre bandes semble satisfaisante, un examen plus approfondi a mis en évidence des écarts altimétriques sur les inter-bandes. Ces écarts (que l'on ne peut mesurer de façon fiable qu'en terrain dégagé et relativement plat) sont en général de l'ordre de 20 à 30 cm et jusqu'à 60 cm. Ils semblent relativement constants sur toute la longueur des inter-bandes. Il semble qu'il s'agisse d'un systématisme en roulis (rotation autour de l'axe de vol). Ce défaut devrait en principe être compensé lors de la phase de calibration.

Quoiqu'il en soit, cela met en avant la nécessité de disposer d'un processus logiciel d'ajustement des bandes entre elles, à partir de points de liaison et éventuellement de points d'appui. Il faut remarquer que les sociétés privées qui réalisent un tel ajustement utilisent des logiciels « maison » et que ce sujet fait encore l'objet de nombreuses recherches [LATYPOV 02].

Rendements et coûts

Acquisition

Dans les conditions du test, le rendement à l'acquisition est de 370 km²/h. Si l'on compte 5 heures de vol utile, on couvre 1 850 km² par jour, soit 55 000 km² par an, sur la base de 30 jours de vol. En comptant le coût de vol, l'amortissement du laser et la maintenance, on arrive à 32 400 € par jour de vol, soit environ 17,4 €/km².

Post-traitements

D'après l'expérience des vols test, on peut estimer qu'un jour de vol correspond à deux jours de calcul (trajectographie et nuage de points). A cela s'ajoutent une semaine de classification semi-automatique et quatre semaines de corrections interactives sur stations de photogrammétrie numérique. Le coût des post-traitements est donc d'environ 4,60 €/km².

Bilan

Un système ALS 40 pourrait donc permettre de produire 55 000 km² de MNT par an, pour environ 22 €/km². On ne compte pas ici les coûts liés à la formation du personnel, à l'ingéniérie nécessaire pour la mise en production, aux frais généraux, etc.

Prix des prestataires

Les Pays-Bas ont fait réaliser entre 2000 et 2002 leur nouveau modèle numérique de terrain (nommé AHN, un point pour 16 m², EMQ en Z 15 cm) pour une somme totale d'environ 11 M€, soit 450 €/km². Les sociétés contactées au moment de la préparation du vol test nous ont fourni des devis entre 276 €/km² et 750 €/km² pour une zone peu étendue (50 km²).

Ces chiffres sont cependant difficilement comparables avec l'estimation réalisée. Ils ne concernent, en effet, que des chantiers réalisés à basse altitude, avec une densité de points et une précision finale très supérieures à ce que l'on souhaite obtenir dans la cadre de la réfection de la BD Alti.

Comparaison avec d'autres techniques

À titre indicatif, en restitution altimétrique BD Topo, les rendements atteints sont de l'ordre de 40 à 100 ha/h en montagne selon le type de relief, soit entre 45 et 112 €/km². Les processus de corrélation automatique sur images aériennes pourraient atteindre des coûts comparables à ceux du laser pour les phases de calcul, par contre les contrôles et corrections interactives sont sensiblement plus lourdes, d'une part, du fait de la plus faible densité de points, et d'autre part, par le comportement moins favorable sur les zones boisées.

Bilan

La précision théorique du système annoncée par son constructeur semble assez réaliste : les écarts-types aux points de contrôle (après calibration) obtenus avec une hauteur de vol de 3 000 m (contrôle de la calibration sur Creil et points de contrôle sur le Vaucluse) donnent un écart-type altimétrique inférieur à 25 cm.

Les comparaisons effectuées avec les données BD Topo disponibles montrent des écarts moyens entre les deux types de données de l'ordre de la précision attendue du MNT BD Topo. Les écarts les plus forts sont dus soit à des thalwegs mieux marqués dans le MNT laser, en particulier en zone boisée, soit à des défauts de filtrage des points laser, au niveau de rupture de pentes marquées. Ces constatations renforcent la nécessité de disposer d'outils de corrections interactives.

Les performances atteintes sont nettement supérieures à celles que l'on peut obtenir par photogrammétrie sur des zones de montagnes comparables. Le laser aéroporté apparaît donc comme une technique adaptée à la constitution d'une base de données altimétrique nationale, tant du point de vue de la qualité du MNT produit que des rendements et des coûts de production, à condition d'adapter les caractéristiques d'acquisition et les post-traitements aux spécifications.

En effet, par soucis de productivité et d'adéquation à nos besoins en précision, il convient de choisir une hauteur de vol d'au moins 3 000 m et un angle de balayage d'au moins 45° permettant de réduire le nombre d'axes de vol. Il faudra également utiliser au maximum l'automatisation de l'élimination du sursol et limiter les corrections interactives pour bénéficier pleinement des avantages de cette technique par rapport à la photogrammétrie traditionnelle ou numérique.

La recherche en matière de laser aéroporté

Frédéric Bretar

Introduction

Les travaux de recherche concernant le laser aéroporté sont inscrits dans une thèse effectuée au laboratoire MATIS en collaboration avec l'École Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris et qui s'intitule : « Étude du couplage photogrammétrie-LIDAR aéroporté ». Compte tenu des performances mentionnées précédemment, le laser aéroporté est susceptible de faire partie, à terme, des techniques de base des sciences géographiques, au même titre que la photogrammétrie.

Les compétences et l'expérience acquises au sein de l'Institut Géographique National dans le domaine de la photogrammétrie sont capitales dans le cycle de production de toute carte. Loin d'entrer en concurrence avec cette technique, l'information fournie par les systèmes laser complèterait de manière significative les imperfections contingentes aux méthodes automatiques mises en œuvre dans les processus de fabrication de MNT, par exemple.

Cette thèse a pour but d'évaluer les performances du couplage des données altimétriques précises du laser et des données provenant de la photogrammétrie, fournissant à terme une géométrie 3-D « parfaite », combinée à l'information radiométrique correspondante, permettant ainsi une identification visuelle de la scène en question. Ce travail s'attachera essentiellement en premier lieu à estimer et à modéliser le décalage des données LIDAR par rapport à la mise en place photogrammétrique. Puis dans une seconde période, une fois le référencement effectué, une pléiade d'applications pourra être développée, de l'utilisation des intensités laser dans un contexte qui nous est propre aux améliorations des algorithmes de discrimination sol/sur-sol.

Estimation et correction du décalage des données LIDAR

Les données laser se présentent sous la forme d'un nuage de points 3-D géo-référencé. Dans un souci de cohérence globale et de maximisation de la précision finale, nous voudrions utiliser ces données brutes comme entrée de nos calculs. Le caractère primaire de ces données n'est cependant que supposé. En effet, le traitement consistant à coupler les données GPS embarqué avec la station fixe, les données angulaires des mesures inertielles et les temps de réponse du système laser peuvent mener à l'accumulation de certaines erreurs, d'un certain biais planimétrique et/ou altimétrique.

Il ne s'agit pas dans cette thèse de refaire une chaîne complète de calcul de la position des points 3-D du nuage. Les calculs très complexes de couplage Inertie-GPS restent la priorité et la légitimité des fournisseurs de données laser. Il s'agit plutôt d'estimer les erreurs *a posteriori* de ce pré-traitement, pour corriger de manière définitive le caractère absolu du nuage. Ce nuage de points n'est pas échantillonné sur une grille régulière; cette disposition est entièrement liée à la géométrie d'acquisition, ce qui, pour nos données test d'Amiens, fournit une inégale densité de points dans les directions transversales et parallèles au vol.

Nous disposons d'un MNS interpolé à partir des points bruts, ré-échantillonné à une résolution de 50 cm. Ce MNS, en plus des erreurs liées au référencement, subit de nombreuses opérations d'interpolation et de lissage qui nous sont inconnues, influençant directement la précision finale. Difficilement utilisable pour quantifier de manière précise les erreurs de positionnement, le MNS laser permet néanmoins de constater les décalages vis-à-vis d'une référence, ici le TRAPU rasterisé. La figure B.3.19, ci-dessous, représente une vue tri-dimensionnelle du MNS laser interpolé(en vert), et la reconstitution 3-D du modèle TRAPU correspondant (en rouge). On constate nettement que le MNS laser est décalé par rapport au TRAPU dans les trois directions de l'espace. Ces erreurs de superposition, sans parler de l'interpolation, sont pourtant liées à des paramètres physiques en théorie mesurables.

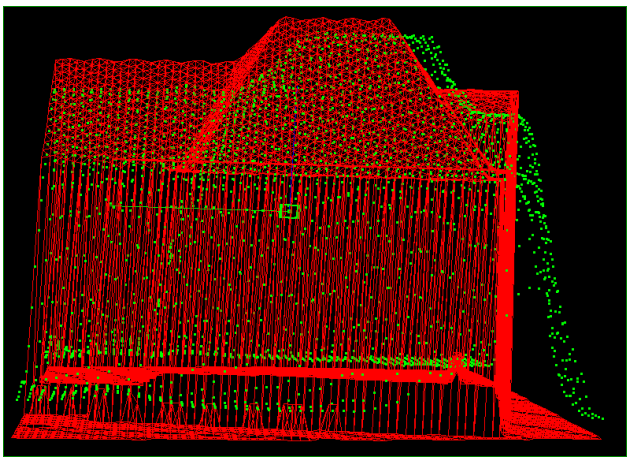


figure B.3.19

Représentation 3-D du décalage entre les données TRAPU (en rouge) et le MNS laser interpolé (en vert).

Il s'agit de multiples imprécisions dans la mesure, ainsi que de l'influence des conditions extérieures :

- erreurs internes au système laser ;
- atmosphère non stable au moment du survol ;
- surface du sol très hétérogène (végétation, plans d'eau, objets mobiles) ;
- caractéristiques du terrain (rugosité, pente, qualité des réflecteurs) ;
- mauvaise trajectoire GPS ;
- dérives au niveau de la centrale inertielle ;

- problèmes lors de l'intégration ;
- …

Nous voudrions modéliser de manière précise les décalages à l'aide d'une transformation géométrique simple, la composée d'une translation et d'une rotation. Même si nous pouvons estimer une mesure du décalage entre le nuage de point et notre référence (TRAPU), cette dernière ne sera que très rarement disponible. C'est alors par l'intermédiaire de la photogrammétrie, dont nous estimons la précision adéquate à nos besoins, que nous allons mesurer ces erreurs.

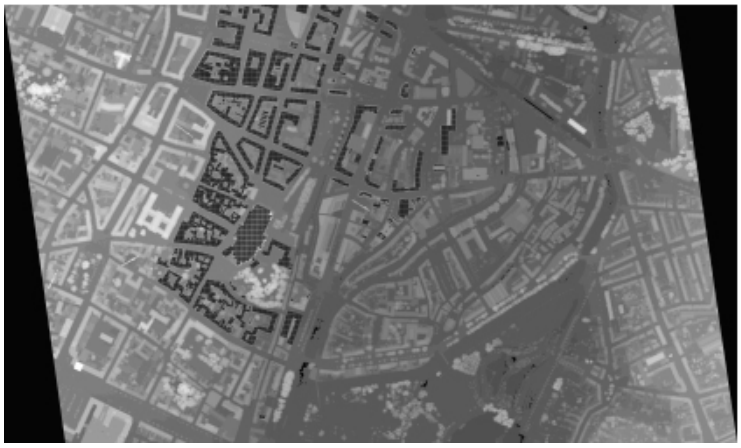


figure B.3.20

MNS laser du centre ville d'Amiens.
Les bâtiments noirs représentent la superposition du TRAPU au MNS laser.

Il importe que nos deux systèmes de mesure aient une parfaite cohérence spatiale. Toute la difficulté du problème vient du fait que nous comparons de données de nature différente (image dense et nuage de points clairsemés). Les homologues des points laser ne sont pas connus sur l'image.

À partir d'un (ou plusieurs) couple(s) stéréoscopiques, deux techniques sont envisagées :

- dans l'espace objet : mesures de distances entre le MNS laser et le MNS de (multi-)corrélation. Deux approches pourront être étudiées :
  - soit on considère d'abord le nuage de points 3-D laser, puis son équivalent, le MNS raster qui en découle. Il s'agira d'établir des correspondances entre des hypothèses de points homologues, afin de trouver la meilleure transformation ;
  - soit on considère le fitting de deux nappes, le MNS laser triangulé, puis le MNS de corrélation. Il faudra dès lors définir une mesure pertinente de correspondance entre les nappes.

- dans l'espace image : mesures à partir d'un coefficient de corrélation. Il s'agit là de projeter les points laser bruts, affectés d'une certaine transformation (typiquement une translation pour commencer) dans les deux images, puis étudier les variations d'un coefficient de corrélation sur des fenêtres de chaque image du couple étudié. Le maximum de corrélation devrait correspondre à la transformation optimale permettant de passer de la géométrie laser (espace-objet) à la géométrie photogrammétrique (espace image).

L'étude de ces transformations a une vocation globale sur une bande laser. Nous voudrions étudier les variations de ces déformations afin de les relier aux paramètres physiques de l'avion, comme l'attitude du capteur au moment de la mesure. La nouveauté de ces travaux sur la zone d'Amiens (figure B.3.20) ne nous permet malheureusement pas encore de conclure sur l'aspect quantitatif de ces déformations. Ainsi, si nos hypothèses se confirment, la photogrammétrie permettra de recaler le nuage de points laser sur une référence commune au chantier. Le couplage envisagé semble donc pertinent dans la mesure où toute estimation extérieure de la précision géographique du laser n'est pas facilement quantifiable. Une fois recalé, nous disposerons d'une géométrie 3-D de base ouverte à de nombreuses applications. De son côté, le laser apporte une densité de points fiables bien supérieure à celle obtenue par des méthodes photogrammétriques. La précision altimétrique reste meilleure du fait même du moyen de mesure (un temps de parcours), alors que les MNS issus de la photogrammétrie sont le résultat d'une corrélation, toujours sensible aux artefacts radiométriques et géométriques.

Perspectives

Un intérêt certain du laser réside dans son pouvoir de séparation sol/sur-sol. En effet, nous avons vu qu'un rayon laser pouvait pénétrer tout ou partie de la couverture végétale d'un terrain, permettant l'enregistrement de plusieurs réflexions d'une même impulsion laser.

Le dernier écho de chaque impulsion représente en général un point sur le sol. Ces échos multiples (principalement deux, les autres étant de trop faible intensité) fournissent alors une carte du sol et du sur-sol. Les algorithmes de discrimination sol/sur-sol ne sont pas encore assez génériques pour qu'une solution globale soit couramment utilisée. L'usage d'images aériennes pourrait être d'une aide précieuse dans la séparation des zones contenant de la végétation de celles qui en sont vierges. Il serait aussi opportun d'utiliser la réflectance de l'impulsion laser, cette information étant assez peu employée [MAAS 01]. Porteuse d'une information très spécifique et ayant un spectre étroit, nous regarderons s'il est possible de mettre en correspondance des éléments reconnus dans des images aériennes et ceux détectés dans des images d'intensité.

Conclusion

Les systèmes laser présentent les avantages suivants :

- *forte précision altimétrique* : les systèmes laser reposent sur une mesure de distance extrêmement précise et permettent donc d'obtenir des données altimétriques fiables ;
- *mesures indépendantes de l'éclairement :* le laser est un système actif qui peut être utilisé de nuit ou par temps sombre, ce qui offre beaucoup plus de possibilités de vol qu'en imagerie optique. En revanche il est déconseillé de voler par grand vent pour ne pas perturber la stabilité du vecteur et du capteur ;
- *utilisation des échos multiples* en milieu urbain et surtout en milieu forestier (bonne pénétration dans la végétation) ;
- *rapidité de préparation, d'acquisition et de traitement :* les données sont immédiatement numérisées lors du vol puis elles sont analysées au sol. Cependant il est fortement conseillé de réaliser un travail s'apparentant à un travail de stéréo-préparation même sommaire.

D'une manière générale, les points critiques de la technologie laser sont les suivants :

- en l'absence de processus d'ajustement des bandes, toute la qualité géométrique est issue de l'emploi combiné du DGPS et de l'INS. Les moyens de contrôle sont donc limités. En cas de problème sur un élément (station de référence au sol par exemple), tout le vol peut être inexploitable ;
- les données laser seules sont difficilement exploitables. Il est nécessaire de disposer d'outils de contrôle et de corrections des données laser s'appuyant sur des données externes (photogrammétrie numérique en générale) ;
- de plus, on peut noter une répartition souvent inégale des points provenant à la fois de la nature du balayage et du recouvrement (certaines zones sont comprises dans deux bandes, d'autres dans une seule).

Les vols sur Amiens, Paris, la forêt de Pagnotte et les dentelles de Montmirail ont montré les capacités élevées du laser dans des milieux variés et dans des conditions de vol très différentes. Les études de coût sont également prometteuses. Quant au couplage avec les systèmes imageurs, les recherches en cours sont destinées à mettre en évidence la complémentarité des deux systèmes afin de capitaliser les savoir-faire de l'IGN en matière de photogrammétrie.

Références

[CASELLA 01] V. Casella : *Accuracy Assessment of Laser Scanning Data : a case study,* 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, Egypt, 6-10 January 2001.

[HAALA, BRENNER 99] N. Haala and Brenner : *Extraction of buildings and trees in urban environments,* ISPRS, Vol. 54, pp. 130-137, 1999.

[HAUGERUD, HARDING 01] R.A. Haugerud and Harding : *Some algorithms for virtual deforestation of lidar topographic survey data,* ISPRS Workshop on Airborne Laserscanning, Annapolis, Octobre 2001.

[IRISH, LILLYCROP 99] J.L. Irish and W.J. Lillycrop : *Scanning laser mapping of the coastal zone : the SHOALS system,* ISPRS, Vol. 54, pp. 123-129, 1999.

[KRAUS, PFEIFER 01] K. Kraus, N. Pfeifer : *Advanced DTM generation from LIDAR data,* ISPRS Workshop on Airborne Laserscanning, Annapolis, octobre 2001.

[LATYPOV 02] D. Latypov : *Estimating relative lidar accuracy information from overlapping flight lines,* ISPRS, Vol. 56, pp. 236-245, 2002.

[MAAS 01] G. Maas : *On the use of reflectance data for laser scanner strip adjustement,* ISPRS Workshop on Airborne Laserscanning, Annapolis, Octobre 2001.

[VOSSELMAN, SUVEG 01] G. Vosselman and I. Suveg : *Map Based Building Reconstruction from Laser Data and Images*, Ascona 2001, juin 2001.

Publication

[JOINVILLE et al 02] O. de Joinville, B. Ferrand & M. Roux : *Levé Laser aéroporté : état de l'art, évaluation, traitement des données et comparaison avec des systèmes imageurs*, in Bulletin n°166 de la SFPT, pp. 72-81, laboratoire MATIS, IGN-SR 02-009-C-ODJ, 2002.