

# CARTOGRAPHIE HELI PORTEE AVEC UN SYSTEME LIDAR PHOTOGRAMMETRIQUE PORTABLE A LA MAIN: EXPERIENCES PRATIQUES EN MONTAGNE, ANALYSE DES PERFORMANCES ET DE LA PHASE DE CALIBRATION

**Julien Vallet**  
Helimap system SA  
Le grand chemin 73  
CH-1066 Epalinges, Suisse  
+41 21 784 3333  
julien.vallet@helimap.ch

## Résumé

L'acquisition en visée nadir de données LiDAR ou photogrammétriques atteint ses limites dans la couverture de terrains complexes ou de fortes pentes. Pour y remédier, le développement d'un système d'acquisition LiDAR-photo opéré manuellement depuis un hélicoptère a débuté en 1998 à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), avec pour tâche initiale la cartographie des avalanches. Ce système, en production depuis 2005, permet l'acquisition oblique ou verticale de données et plus de 130 vols ont été effectués depuis. La précision des données au sol est de 10 cm quelle que soit la pente. Au cours de ces nombreux projets, l'attention a été portée sur la fiabilité des données acquises et sur la stabilité des paramètres d'étalonnage. Il a pu être montré que les paramètres d'étalonnage relatifs au LiDAR sont stables alors que ceux associés à la caméra dépendent fortement des températures et de la manutention de l'équipement lors des transports. Des procédures de contrôle et de traitement ont pu être mises en place pour conserver une précision constante lors de chaque projet.

**Mots Clés:** LiDAR, photogrammétrie, hélicoptère, oblique, étalonnage, terrains complexes

## Abstract

Classical nadir setup for photogrammetry or airborne LiDAR reaches its limits when covering steep slopes or complex terrain. The resolution and accuracy of data are heterogeneous. The development of a helicopter-based handheld Lidar/photo system started in 1998 at EPFL to permit avalanche mapping. This system which is now in production since 2005, allows oblique or vertical mapping and about 130 projects were flown. The accuracy level of the data is about 10 cm at the ground level even in cliff or steep slopes. During those numerous projects, we focused on quality control of the data and especially on calibration stability check. It was shown that if the calibration of the laser is stable, the parameters related to the camera are tied to temperature and shipping. Thus, check procedures were established to avoid accuracy degradation.

**Keywords:** LiDAR, helicopter-based, Photogrammetry, calibration, camera, complex terrain

## 1. Introduction

Les relevés topographiques par technique LiDAR aéroportée font désormais partie du quotidien du topographe. Cette technique, apparue au milieu des années 1990, s'est très vite révélée d'une performance et d'une rapidité indiscutables, prédisant pour certains la fin du règne de la photogrammétrie. C'était aller un peu vite

car l'image reste un support indispensable tant pour l'interprétation que pour la restitution précise d'objets linéaires ou ponctuels. De manière similaire à la photogrammétrie, les instruments sont fixés à l'aéronef et l'acquisition est généralement faite en visée verticale (nadir). Cette configuration est suffisante pour de la cartographie de grandes surfaces et de reliefs doux mais elle atteint ses limites lorsque le terrain devient accidenté. En effet, l'effet de la pente va se traduire par une variation d'échelle sur le cliché, induisant une variation de la précision de mesure (e.g. Kraus 1998). Pour le LiDAR, la pente agit sur la dimension de l'empreinte au sol ainsi que sur l'angle d'incidence. En effet avec la pente, la taille de l'empreinte augmente et la différence de dénivelée dans l'empreinte s'accroît. Ceci dégrade la précision de la mesure de distance qui reflète une moyenne des distances vraies au sein l'empreinte. Plus la tache est grande, plus la distance est imprécise (Favey, 2001). Si pour des terrains plats on obtient des précisions de mesures plani/altimétriques de ~20/10 cm, celle-ci se dégrade à 30-40/20-30 cm pour une pente de 45°, et la précision peut être métrique en altimétrie au niveau de falaises (Vallet, 2002) La possibilité de faire varier l'orientation du capteur selon le relief survolé, pour réaliser une saisie oblique, voire horizontale, permet de diminuer l'écart entre la direction de visée et la normale au terrain et d'obtenir des données de qualité plus homogène. La cartographie du milieu montagneux ou des reliefs complexes représentant une faible part du marché de l'acquisition, les fabricants n'offrent pas de solutions adaptables facilement. C'est dans cet esprit qu'est né un système de cartographie portable à la main Helimap System® alliant LiDAR et imagerie numérique (Skaloud et al., 2005). Le but du présent article est de présenter tout d'abord ce système original, puis de faire le bilan de ses performances en se basant sur environ 130 expériences dont environ 60 en zone de montagne. Au cours de ces expériences, la précision absolue et

relative des données LiDAR et photogrammétriques ont été estimées. L'accent a surtout été mis sur l'analyse de la stabilité de l'étalonnage (caméra, montage, levier) et de son influence sur la qualité finale des modèles de terrain dérivés. Cet aspect est en effet souvent négligé par les fournisseurs de données. S'il est reconnu que la température influence les paramètres des instruments, il est intéressant ici de savoir dans quelle gamme les valeurs d'étalonnage oscillent. Cet aspect a déjà été abordé pour des caméras aériennes numériques grand format (Grenzdörffer, 2008). Enfin, l'intérêt du système développé sera illustré au travers de quelques applications nécessitant des modèles numériques de haute précision en terrain accidenté.

## **2. Description du système**

### **2.1. Contexte**

Le développement de Helimap system® a débuté en 1998 dans les laboratoires de photogrammétrie et de topométrie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), en collaboration avec l'Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches de Davos (WSL-SLF) pour répondre à la problématique de mesure de volume de neige sur des sites avalancheux (Vallet, 2002). Les exigences étaient une haute précision de mesure (~10 cm) en terrain complexe, une rapidité de mise en œuvre pour les aléas météorologiques et un coût adapté à de petites surfaces. Basé au début sur des mesures photogrammétriques avec une caméra portable, le système s'est enrichi d'un scanner laser et d'une caméra numérique haute résolution, permettant une automatisation de la saisie du terrain, et de la production d'orthophotos, et par conséquent une réduction significative des coûts de traitement vis-à-vis de la photogrammétrie traditionnelle. Depuis 2005, le système est en exploitation par Helimap System SA et plus de 130 vols ont été réalisés, dont la moitié en terrain montagneux.

## 2.2 Le système

Le concept du système se base sur 5 points clés:

- La souplesse d'utilisation permise par l'hélicoptère qui peut évoluer dans les terrains les plus complexes
- L'obtention d'une précision quasi constante quelle que soit la pente: La précision et la résolution des données aéroportées standards (vue nadir) décroissent fortement à l'aval de fortes pentes. Seule une prise de vue oblique permet de s'affranchir de cet inconvénient. L'opération manuelle du système lui confère une totale liberté en rotation et translation permettant de s'adapter à la pente (fig. 1). Le système peut alors être utilisé en mode vertical ou en mode oblique (fig. 2).

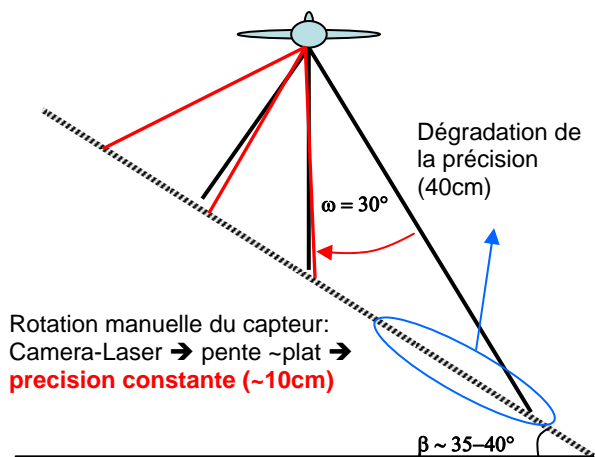


Figure 1: Concept de base du système: une opération manuelle pour s'adapter au terrain.  $\omega$  représente l'angle de roulis et  $\beta$  la pente.



Figure 2: opération verticale (nadir) et oblique du système

- Permettre une cartographie des zones inaccessibles. Ceci est réalisé grâce aux techniques de géoréférencement direct GPS-inertiel (GPS-INS) garantissant une précision de mesure de 10-15 cm sans points de calage au sol.
- Être opérationnel rapidement indépendamment du type d'hélicoptère. La plupart des systèmes aéroportés conventionnels requièrent des installations complexes. L'opération manuelle du système permet d'être sur site en quelques heures.
- Fournir des résultats rapidement: grâce au LiDAR, la mesure du terrain est totalement automatisée. Les premiers résultats peuvent être disponibles quelques heures après le vol.

## 2.3. Composants

Pour répondre aux exigences, le système a une conception modulaire intégrant 4 capteurs dans un bloc unique (fig. 3) formé d'une caméra CCD de 22 megapixels avec grand angulaire ( $57^\circ$ ) et focale fixe de 35 mm, d'un système de géoréférencement direct (GPS + unité de mesure inertielle) et d'un scanner laser Riegl 2D permettant la mesure de 10 000 points/sec. La distance maximale de mesure est de 300-400 m avec une ouverture de  $60^\circ$ , compatible avec la caméra. La longueur d'onde de 900 nm permet des mesures aussi bien sur neige que sur terrain nu et végétation. Le temps d'installation du système est d'environ 30 minutes sur la plupart des hélicoptères.

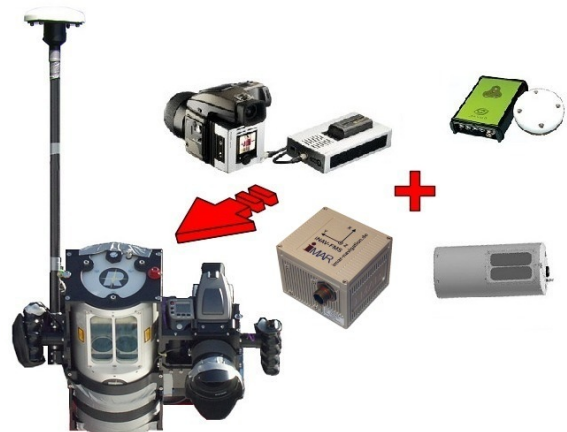


Figure 3: les composants et l'assemblage du système

### 3. Analyses de performance et stabilité de l'étalonnage

#### 3.1. Méthodologie

Les données issues des mesures sont des modèles numériques de terrain et de surface (MNT/MNS) de haute densité (1-10 points/m<sup>2</sup>) et des images numériques orientées. A partir de ces données, des analyses de précision relative et absolue peuvent être effectuées. Sur une base de 130 relevés, environ 30 ont fait l'objet de mesures comparatives au sol (GPS), 5 étaient des étalonnages officiels (démontage du système) et 120 ont fait l'objet d'une triangulation aérienne (mesures de points de liaison) mais sans points de calage au sol. Sur ces 130 relevés, environ la moitié concernait des relevés obliques de pentes raides ou de falaises. Pour ces derniers, il n'était évidemment pas possible de mesurer des points d'ajustage dans ces zones inaccessibles. Néanmoins, les résultats des analyses effectuées sur des pentes plus accessibles s'appliquent aux falaises car l'angle d'incidence de la visée est quasi constant quel que soit le terrain. Les analyses se sont portées sur les aspects suivants :

- Comparaison absolue entre points au sol et points laser. Pour ce faire, des relevés GPS de points ont été effectués sur différents types de surface (route, champ, neige) de rugosité différente. L'analyse de la planimétrie s'est effectuée par comparaison avec des lignes de ruptures (bord de mur par exemples).
- Comparaison relative entre nuages de points laser (lignes de vol) en fonction également de la rugosité du terrain. Les nuages sont soustraits entre eux pour établir une grille de différence.
- Analyse de l'effet du mode d'orientation des images sur la précision photogrammétrique: aérotriangulation classique (AT), AT avec GPS, AT avec

GPS-IMU, géoréférencement direct (pas d'AT).

- Analyse de la stabilité des paramètres internes de la caméra
- Analyses de la stabilité de la matrice de montage (boresight) entre IMU et laser et entre IMU et caméra). Le « boresight » représente le désalignement résiduel du montage entre les axes de référence de chaque capteur. Il s'agit de valeurs angulaires traduisant 3 rotations qui permettent d'aligner les axes.

#### 3.2. Précision du LiDAR

La comparaison entre des points au sol et le nuage de points a permis d'estimer la précision moyenne du nuage en fonction de la rugosité du sol pour une hauteur moyenne de vol de 270 m.. Les résultats sont représentés à la figure 4.

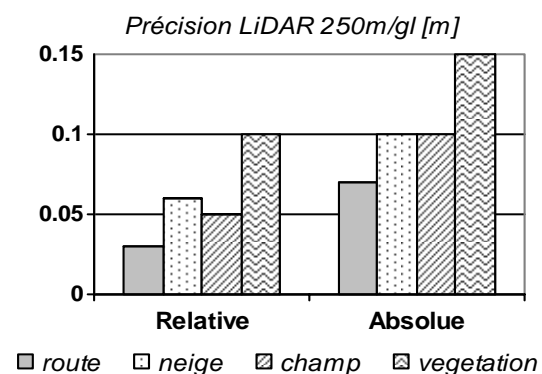


Figure 4 : Précision altimétrique interne et absolue (1) du nuage de points en fonction du type de sol (rugosité).

La précision altimétrique absolue d'une surface peu rugueuse est de l'ordre de 0,1 m, la précision (Caméra IMU Laser GPS) interne, à savoir la différence d'altitude entre 2 nuages de points provenant de 2 lignes de vol se recouvrant, est de l'ordre de 0,05 m. On note que sur l'asphalte, cette précision interne atteint le bruit de la mesure de distance (25mm). Des tests effectués à très basse hauteur de vol (80 m au-dessus du sol) ont permis, après lissage, d'abaisser la précision absolue à 0,025 m (1 sigma, sur 55 points d'ajustage mesurés sur l'asphalte). L'estimation de la précision planimétrique s'est effectuée sur des relevés de lignes de

ruptures brutales telles des bords de murs (GPS ou stéréorestitution). Les erreurs constatées pour des données acquises avec une hauteur de vol de 270 m étaient de l'ordre de 0,06 m pour chaque composante X et Y (1 sigma). Pour des relevés à très hautes densités (20-30 points/m<sup>2</sup>), cette analyse peut également se faire sur la base de l'intensité de retour de la signalisation au sol par exemple. En utilisant cette méthode sur un vol à 80 m au-dessus du sol, une précision planimétrique globale de 0,04 m à pu être estimée. Les analyses de précision ont également mis en évidence la dépendance entre précision et divergence du faisceau laser, spécialement sur des zones de réflectivité variable (route) et sur des discontinuités de terrain (murs, ponts, arbres). Nous avons pu constater des erreurs jusqu'à 25 cm en altimétrie et planimétrie sur des bandes axiales de route avec des vols obliques (autoroute à flanc de montagne) pour une divergence de 2,7 mrad à une distance de 280m (empreinte de 75cm). Pour une divergence 10 fois moindre (laser longue distance), l'erreur n'excédera pas ~5cm à la même distance.

Finalement, les analyses de précision se sont également portées sur l'étude de l'influence de la dynamique du vol durant l'acquisition. Il est reconnu que la réalisation régulière de manœuvres d'alignement (changement de direction avec accélération horizontale, Skaloud et al. 2000) permet d'améliorer la précision de l'azimut. En revanche, cette opération s'effectue au détriment de la précision sur les composantes planimétriques (position et orientation). Ceci a pour effet de générer des erreurs internes (stries) au sein du nuage de points. La figure 5 illustre la précision de l'azimut de vol. Cet aspect n'est a priori pas important pour un levé classique (ligne droite) mais doit être considéré lors d'un levé hélicopté en terrain complexe où il conviendra d'éviter de faire des virages brusques pendant la saisie des données.

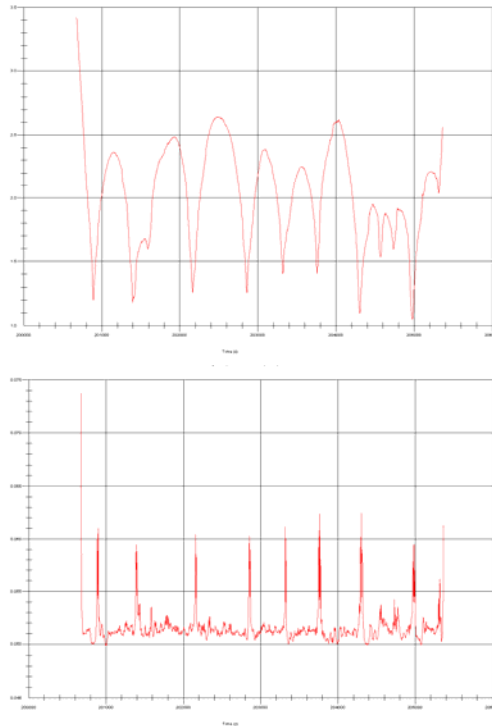


Figure 5: Influence de l'accélération sur la précision du positionnement (X en bas) et de l'orientation (Azimut en haut)

### 3.3. Précision photogrammétrique

Le géoréférencement direct est fréquemment vendu comme solution pour éviter la phase d'aérotriangulation. Selon les précisions requises sur le produit "image", l'aérotriangulation ne peut être évitée pour les raisons suivantes:

- des parallaxes résiduelles hétérogènes subsistent entre les différents modèles. Elles induisent de grandes difficultés à effectuer des mesures stéréoscopiques précises et peuvent provoquer des discontinuités dans les jointures des orthomosaïques.
- L'emploi de plus en plus répandu de caméras numériques haute résolution non métriques ne permet pas de garantir une stabilité suffisante des paramètres d'orientation interne et de la matrice de boresight (caméra-IMU) à long terme

Les analyses suivantes illustrent et confirment ce fait: l'aérotriangulation est nécessaire pour toute application de haute précision (<20 cm).

### 3.4. Analyse du mode d'orientation des images

Sur la totalité des projets effectués, une aérotriangulation a été systématiquement effectuée. Seuls les points de liaisons ont été mesurés et le bloc a été compensé en utilisant les paramètres GPS-IMU (Bingo-F). Pour certains cas nous avons des points d'ajustage au sol à disposition et ils ont été utilisés pour estimer la précision de mesure au sol sur les images (check point) et pour contrôler l'étalonnage de la caméra et du boresight IMU-caméra.

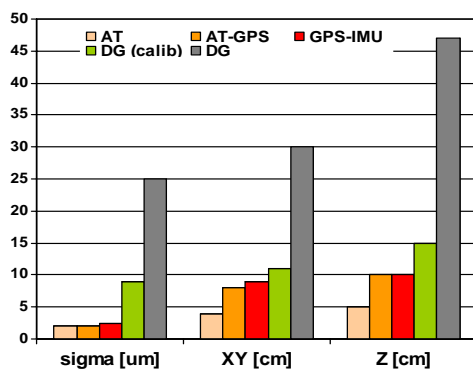


Figure 6 : Précision de mesure au sol de la photogrammétrie selon les 3 modes de calage utilisés (AT : aérotriangulation classique, GPS : aérotriangulation avec GPS, GPS-IMU : aérotriangulation avec GPS-IMU, DG : géoréférencement direct). Sigma représente la valeur  $\sigma_0$  a posteriori de la compensation de bloc (précision des mesures images). XY représente la précision planimétrique pour chaque composante X et Y, et Z représente la composante altimétrique.

La figure 6 illustre la précision au sol pour les différents modes de compensation-orientation pour une échelle de 1 :8000 (270 m au-dessus du sol, pixel de 7 cm, vol mixte vertical-oblique). Seule l'aérotriangulation classique fait l'usage de points d'ajustage.

Nous avons différencié pour le géoréférencement direct les cas où l'analyse est faite le jour de l'étalonnage et les cas où il n'y a pas d'étalonnage le jour du vol (utilisation des valeurs d'étalonnage précédentes). Il en ressort que sans point d'ajustage et avec une aérotriangulation, la précision de mesure au sol est de 0,1 m en

Z tandis qu'en utilisant le géoréférencement direct, celle-ci se dégrade rapidement à 0,4-0,5 m. Cela est dû à l'instabilité de la matrice de montage qui est sensible à la température, au transport, et aux vibrations. Cela montre qu'il est absolument nécessaire d'effectuer une aérotriangulation, pour pallier ces effets et garantir une précision de 10-15 cm. Cette dernière peut être effectuée partiellement sur un bloc de taille réduite si le produit final se réduit uniquement à l'orthophoto.

### 3.5. Stabilité de la calibration

#### 3.5.1. Méthodologie

Les effets notés au paragraphe précédent montrent qu'un contrôle régulier des paramètres d'étalonnage doit être fait. Sur 120 vols aérotriangulés, nous avons ré-estimé le boresight à chaque compensation et noté la température. A chaque fois que le système a été transporté sur de longues distances (avion, voiture), un étalonnage avec points d'ajustage a été effectué pour contrôler la focale, le point principal et les boresight camera et laser.

#### 3.5.2. Résultats

La figure 7 illustre l'évolution de la focale avec la température. Les grands déplacements y sont également reportés en vert. La corrélation, assez logique, entre la focale et la température montre qu'un contrôle à toute son importance au fil des saisons. La plage de variation est de l'ordre de 30  $\mu\text{m}$  ce qui peut engendrer des erreurs de 20-30 cm en altimétrie à 300 m au-dessus du sol si un contrôle n'est pas fait.

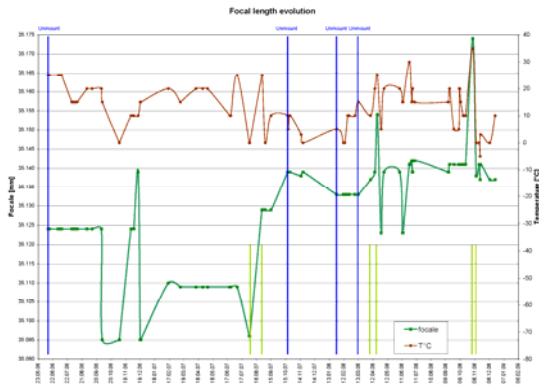


Figure 7 : évolution de la focale avec la température et les transports. Les étalonnages complets (démontage) sont représentés par les traits en bleu, les voyages par avion par les traits en vert. La courbe verte illustre la variation de focale, la courbe brune la température.

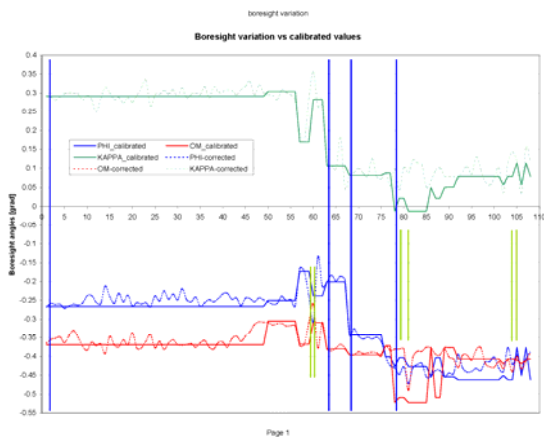


Figure 8 : Evolution du boresight caméra par rapport à la valeur de l'étalonnage. Lors de chaque aérotriangulation, la valeur des angles du boresight est ré-estimée par rapport à la valeur de l'étalonnage utilisée pour le géoréférencement direct. La courbe rouge représente Omega (roulis), la bleue Phi (tangage) et la verte Kappa (azimut). La courbe en pointillés représente la variation de chaque composante de boresight par rapport à la valeur d'étalonnage utilisée dans le calcul GPS-inertiel. Les traits verticaux bleus signalent les étalonnages complets (démontage), les verts de transport par avion.

La figure 8 illustre la variation du boresight caméra par rapport à la valeur de l'étalonnage. On remarque que celui-ci évolue dans une plage de  $0,05^\circ$ . La corrélation avec la température est plus délicate à établir et il semble que c'est plus la structure d'assemblage caméra-IMU qui soit en cause. En effet, le boresight laser ne change pas. La liaison laser-IMU est plus

simple et plus rigide. La caméra est en effet constituée de nombreux éléments démontables : Dos numérique, optique, corps. Ces derniers sont assemblés via des vis et une structure en aluminium mais les dilatations semblent avoir une plus grande influence.

Nous avons également essayé de comparer le boresight avec l'obliquité des prises de vue mais aucune corrélation n'a pu être établie entre ces 2 paramètres.

#### 4. Expériences en milieu montagneux

Conçu à la base pour les mesures de volumes de neige sur site avalancheux de fortes pentes (SLF Davos), le champ d'application s'est largement diversifié à d'autres domaines tels la cartographie de corridors (rivière, route...). Néanmoins, la caractéristique première du système d'être opérable de manière oblique reste un avantage unique pour la cartographie des topographies complexes. La haute résolution spatiale des données laser permet dans ces conditions d'obtenir des modèles numériques de terrain homogènes avec une précision d'environ 10 cm quelle que soit la pente. C'est dans ce contexte précis que de nombreuses expériences ont été effectuées dans les domaines suivants :

- mesure de volumétrie et évolution de surface ;
- analyses morphologiques et trajectographie ;
- inventaire des dégâts.

##### 4.1. Volumétrie / évolution

En réalisant des mesures épisodiques, il est possible d'extraire les différences de surface et donc les volumes déposés ou érodés. Dans le domaine des avalanches et de la modélisation de la fonte de neige (SLF-Davos, ETHZ), les volumes de neige sur site on pu être déterminés avec une erreur inférieure à 5% (Gruber et al, 2000, Sovilla et al. 2006). L'erreur constatée sur l'altitude des surfaces dans les zones sans évolution était inférieure à 10 cm (figure 9).

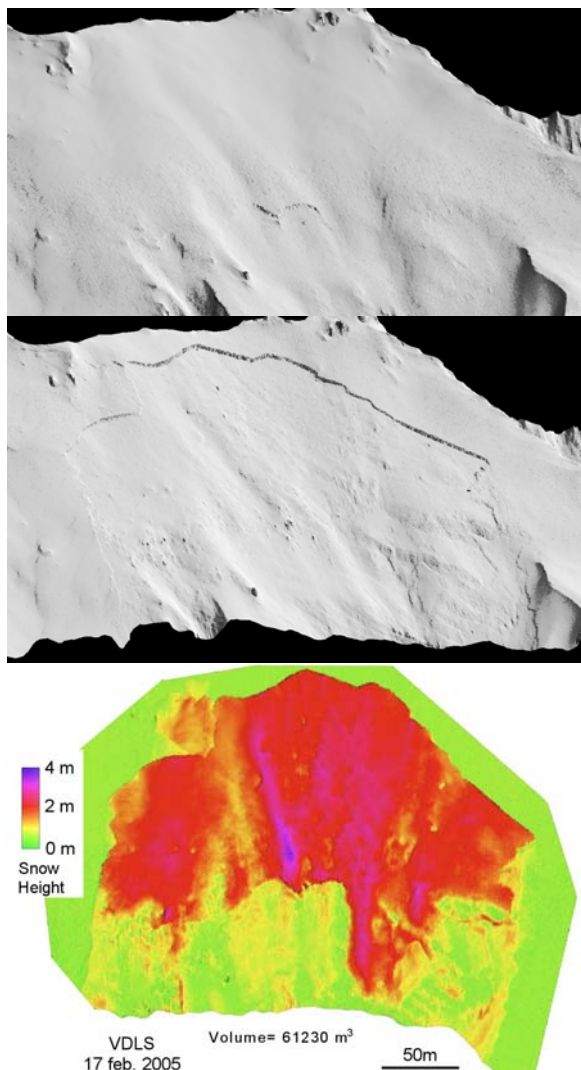


Figure 9 : Mesure de volume de neige de sites avalancheux. Surface avant puis après l'avalanche. Carte de répartition des épaisseurs et volume de neige.

#### 4.2. Analyse morphologique

La densité des données laser permet de voir des détails morphologiques invisibles avec les modèles de terrain issus de la photogrammétrie classique. Un relevé effectué sur une zone de glissement au dessus du lac de Monteynard (Knieb et al. 2009) a permis de mettre en évidence de petites ondulations du sol caractéristiques d'affaissement de flanc de montagne, jusqu'alors invisibles avec des mesures traditionnelles (fig. 10).

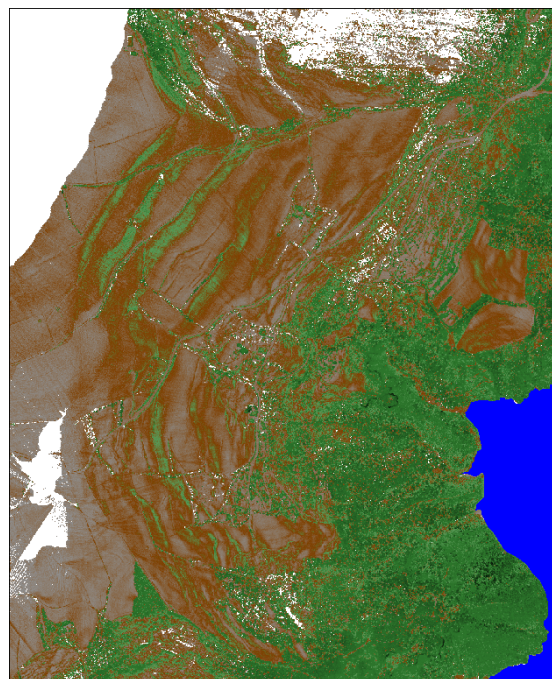


Figure 10 : Glissement de terrain d'Avignonet (Trièves). La figure illustre la variabilité locale d'altitude calculée par analyse de voisinage. Cette technique permet de mettre en évidence des microreliefs. Les « vagues » en vert et en marron illustrent des plissements. Les stries perpendiculaires à l'axe de la pente révèlent le bruit interligne (ou bruit inter-scan).

D'une manière générale, les mesures permettent d'interpréter des déformations de surface, d'identifier des failles et, combinées à des données géophysiques, de modéliser en 3D la structure du sol. Grâce aux mesures obliques la morphologie des couches dans les zones verticales ou surplombantes peut être extraite. L'imagerie s'intègre au processus en étant drapée sur le modèle 3D formant une image 3D ou l'on peut mesurer la position des strates (Buckley et al. 2008). La figure 11 représente un relevé de falaise effectué pour des études géomorphologiques au Spitzberg (CIPR-Uni. Bergen/UNIS).

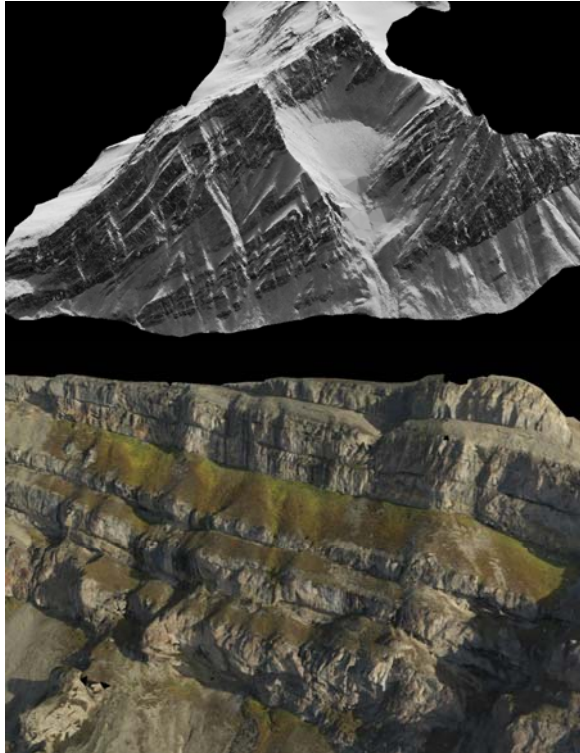


Figure 11 : Modèle 3D des falaises de Mediumfjellet (Spizberg). L'identification et le géoréférencement précis des différentes strates et plis, combinés à des mesures géophysiques, permettent de caler et valider un modèle structural 3D. L'image du haut montre un modèle ombré 3D d'un versant d'environ 700 m de haut. L'image du bas illustre un drapage des images sur les triangles du modèle 3D. De cette manière, il est possible d'avoir une représentation tridimensionnelle de la falaise (surplombs inclus) intégrant la haute résolution de l'image (5 à 10 cm). L'extraction des différentes couches peut alors s'effectuer directement sur l'image drapée.

#### 4.3. Inventaires des dégâts

La flexibilité du système offre la possibilité d'être opérationnel en très peu de temps. Il est alors possible de cartographier et de faire un état des lieux d'une zone sinistrée juste après l'événement à l'origine des dégâts. Ce genre de données peut s'avérer très utile pour estimer les dommages (indemnisation, assurances) mais également pour la compréhension du phénomène (en vue de modélisation par exemple) et améliorer les protections. C'est ainsi qu'un état des dégâts a pu être établi et une volumétrie des zones érodées et déposées dans le torrent a pu être

mesurée le lendemain des inondations survenues à Einsiedeln en juin 2007 (fig. 12). D'une manière générale, des résultats basiques comme le modèle numérique de terrain peuvent être obtenus quelques heures après la fin du vol.

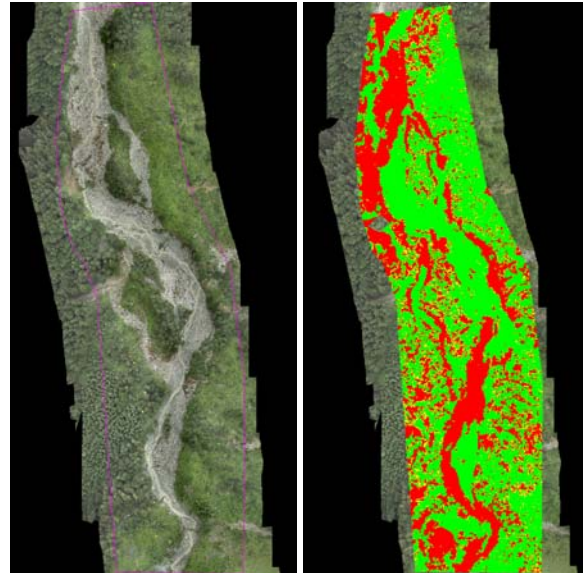


Figure 12: Le lendemain de l'événement, un passage sur la zone sinistrée a permis de faire un état des lieux (zone d'érosion (rouge), dépôt (vert))

## 5. Conclusions

La capacité d'un système Laser/photo aéroporté de pouvoir effectuer de la cartographie oblique s'avère fondamentale pour travailler dans des terrains complexes et tourmentés en garantissant une résolution et une précision constantes. Au travers de nombreuses réalisations, le système Helimap démontre que le concept est fonctionnel. La précision de cartographie est de l'ordre de 10 cm (précision combinée X,Y,Z) que ce soit en plaine ou dans des falaises verticales. Néanmoins, pour que cette précision soit garantie, des précautions sont nécessaires particulièrement pour la partie photogramétrique. L'aérottriangulation est indispensable pour fournir un géoréférencement précis (<10-15 cm) de l'imagerie. Elle permet de contrôler et estimer les paramètres d'étalonnage de la caméra qui fluctuent au gré des saisons et des déplacements. Les paramètres d'étalonnage du laser sont nettement plus

stables et aucune variation notable n'a été décelée au cours des 130 projets. La question naturelle vient alors, pourquoi persévérer avec la photogrammétrie qui semble le maillon faible dans l'utilisation du géoréférencement direct? Tout simplement, car aucun nuage de points, aussi dense soit-il (100-200 points/m<sup>2</sup>), n'est actuellement capable d'approcher la densité d'information d'une image (700-800 pixels/m<sup>2</sup>). L'image apporte également l'interprétation sur l'objet ce qui reste encore très limité avec le LiDAR et la mesure de l'intensité. Au final, il est souvent plus simple de mesurer 1 point ou 1 ligne par photogrammétrie que de tenter d'extraire ces derniers d'un nuage de plusieurs millions de points. Les deux techniques sont donc réellement complémentaires. Le laser apporte le gros du travail de modélisation, la photo complète et apporte les détails.

## Références

- Buckley S.J., Vallet J., Braathen A., Wheeler W.*, Oblique helicopter-based laser scanning for digital terrain modelling and visualisation of geological outcrops. ISPRS – Beijing. July 2008.
- Favey E.*, Investigation and improvement of Airborne Laser Scanning technique for monitoring surface elevation changes of glaciers. Ph-D Thesis - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich ETHZ, 2001.
- Grenzdörffer, G.*: Medium format digital cameras - A EuroSDR project. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.: Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008. , 2008. - ISBN ISSN 1682-1750, S. 1043 - 1050.
- Gruber, U, Vallet, J.* Avalanche mass balance measurements at Vallée de la Sionne. Annals of glaciology Vol. 32. International Glaciology Society. 2000.
- Knieb U., Bievre G., Jongmans J., Pathier E., Schwartz S., Villemin T.* Combined geophysical and remotesensing investigations to study the kinematics of two clayey landslides in the Trièves area (French Alps). EGU General Assembly 2009, Autriche. 2009
- Kraus K., Waldhäusl P.*, Manuel de photogrammétrie, Principes et procédés fondamentaux, Edition Hermès, 1998
- Skaloud J. and Schwarz K. P.*. Accurate Orientation for Airborne Mapping Systems. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, pages 393-402, 2000.
- Skaloud J., Vallet J., Keller K., Vessyere G. and Kölbl O.*, Helimap System®: Rapid large scale mapping using handheld LiDAR/GPS/INS/CCD sensors on helicopters. ION GNSS 2005 Congress. Long Beach CA. 2005
- Sovilla, B.; Burlando, P.; Bartelt, P.*, Field experiments and numerical modeling of mass entrainment in snow avalanches. J. Geophys. Res. 111, F03007, doi:10.1029/2005JF000391: 16 p. 2006.
- Vallet J.*, Saisie de la couverture neigeuse de sites avalancheux par des techniques aéroportées. Thèse EPFL N° 2610. 2002