

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural |
| Herausgeber: | Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF) |
| Band: | 99 (2001) |
| Heft: | 8 |
| Artikel: | Mesures photogrammétiques de volume de neige pour l'étude de la dynamique d'avalanche |
| Autor: | Vallet, Julien |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-235806 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

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

Mesures photogrammétriques de volume de neige pour l'étude de la dynamique d'avalanche

Les avalanches représentent un danger parfois non maîtrisé pour les activités humaines. Divers organismes dont l’Institut Fédéral pour l’Etude de la Neige et des Avalanches de Davos (SLF) cherchent à mieux comprendre le phénomène. Le site expérimental de la Vallée de la Sionne en Valais est le siège de la recherche sur les avalanches du SLF. Au cours des hivers 1999 et 2000, cinq avalanches majeures ont pu être artificiellement déclenchées sur le site. De nombreux paramètres nécessaires à la modélisation du phénomène ont été mesurés. La détermination, par photogrammétrie, des volumes de neige impliqués dans les avalanches est un des nombreux objectifs de cette étude de la dynamique d’avalanche.

Lawinen stellen für die menschlichen Aktivitäten eine oft nicht beherrschte Gefahr dar. Verschiedene Institutionen, darunter auch das Eidgenössische Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos, versuchen das Phänomen besser zu verstehen. Die Versuchsanlage im Vallée de La Sionne im Wallis ist der Forschungssitz des SLF für die Lawinenforschung. Im Laufe der Winter 1999 und 2000 war es möglich, fünf größere Lawinen an diesem Ort künstlich auszulösen. Zahlreiche für die Modellierung des Phänomens nötigen Parameter sind gemessen worden. Die photogrammetrische Bestimmung der in den Lawinenabgängen enthaltenen Schneemengen ist eines der zahlreichen Ziele dieser Untersuchung der Lawinendynamik.

Le valanghe rappresentano spesso un pericolo per le attività umane. Diversi organismi, fra cui l’Istituto federale per lo studio della neve e delle valanghe di Davos (SLF), cercano di capire meglio il fenomeno. Il sito sperimentale della Valle della Sionne, in Valsesia, è la sede della ricerca sulle valanghe dell’SLF. Durante gli inverni 1999 e 2000, sono state provocate artificialmente sul sito cinque valanghe di grandi dimensioni e si sono così potuti misurare molti parametri necessari per la modellizzazione del fenomeno. La determinazione fotogrammetrica dei volumi di neve implicati è uno dei numerosi obiettivi di questo studio sulla dinamica delle valanghe.

Au cours de ces deux hivers, un seul événement a fait l’objet d’une saisie complète, i.e. la mesure du volume pour la zone de déclenchement et de dépôt de l’avalanche. Les autres épisodes n’ont fait l’objet que de mesures photogrammétriques partielles. Ces mesures ont permis de mesurer les volumes de neige déposés et les hauteurs de cassure (plaqué de neige s’écoulant dans l’avalanche). La cassure de la plus grande avalanche atteint 2.10 m sur plus de 1000 m. Le volume total déposé par les trois avalanches de l’hiver 1999 atteignait 1 600 000 m³ avec des épaisseurs de 30 m. Les importantes différences de volume entre la zone de déclenchement et la zone de dépôt ont montré que les avalanches entraînaient de grandes quantités de neige lors de leur écoulement. De plus, la répartition spatiale de la neige déposée par l’avalanche fournit d’importantes informations quant à l’écoulement de neige dense.

Ces nombreuses mesures photogrammétriques ont apporté beaucoup d’informations utiles à l’étude des avalanches. Elles ont également contribué au développement d’un système photogrammétrique intégrant les techniques de navigation INS/GPS, permettant alors de s’affranchir d’une signalisation au sol, extrêmement difficile à planter dans ces zones.

J. Vallet

1. Introduction

La neige, «Or Blanc», bonheur des skieurs et des stations de skis, est quelquefois une source de danger non maîtrisé. Avalanches, congères sont des obstacles à la sécurisation des centres de loisirs hivernaux, de leurs accès et plus généralement du territoire alpin. Face à l’extension des activités humaines en ces territoires à

risques, l’homme tente de se protéger ou de prévoir les événements. En Suisse, l’Institut Fédéral pour l’Etude de la Neige et des Avalanches de Davos (SLF) effectue des recherches sur la dynamique des avalanches sur le site expérimental de la Vallée de la Sionne. Ce projet, unique en Europe, vise à développer des modèles d’écoulement d’avalanche, extrêmement utiles pour la cartographie des zones à risque ainsi que pour le dimensionnement des ouvrages paravalanches. Des avalanches sont déclenchées artificiellement

après d’importantes chutes de neige. De nombreuses mesures sont saisies et utilisées par la suite pour calibrer et améliorer les modèles.

Parmi les nombreuses mesures effectuées sur le site (vitesse, pression...), la photogrammétrie est utilisée sur le site expérimental de la Vallée de la Sionne pour cartographier précisément les limites de chaque avalanche ainsi que pour mesurer la surface de la neige avant et après l’avalanche. En effectuant une différence

entre les deux états de surface, on peut déterminer les volumes de neige pour la zone de déclenchement et pour la zone de dépôt.

La photogrammétrie est une technique couramment utilisée pour les mesures de volumes entre deux états de surfaces d'un objet (Koelbl 91). Les études de glissements de terrains, la glaciologie... l'utilisent fréquemment pour des mesures précises de volume.

La précision sur la mesure de la surface a deux composantes: une composante aléatoire due à l'opérateur et au contraste des images et une composante systématique due à l'orientation absolue des photographies. La précision de l'orientation dépend essentiellement de la qualité et de la distribution des points d'ajustage. Il est donc nécessaire, afin d'éviter des erreurs systématiques entre deux épisodes, d'utiliser des points de contrôle identiques pour chaque épisode. La précision requise (20–30 cm) implique une couverture à grande échelle du site. Le grand nombre de photos nécessaires qui en découle requiert l'utilisation des techniques d'aérotriangulation pour l'orientation des clichés. Par la suite, la restitution et la mesure de Modèles numériques de Surface (MNS) est effectuée automatiquement au moyen de restituteurs numériques lorsque le contraste est suffisant. Dans le cas contraire, seuls les restituteurs analytiques sont employés pour les restitutions délicates (neige fraîche). L'utilisation de la photogrammétrie sur le site de la Vallée de la Sionne soulève néanmoins quelques problèmes, spécifiques aux mesures hivernales, difficiles à résoudre par l'emploi des procédures photogrammétiques standards:

- La neige fraîchement tombée est en général uniforme et présente un très faible contraste. La mesure précise de la hauteur de neige dans la zone de départ est difficile à effectuer.
- Le déclenchement d'une avalanche étant astreint aux conditions météorologiques, il est difficile de prévoir plus de 2 jours à l'avance le déroulement de l'essai. La méthode doit alors être très flexible à mettre en œuvre.



Fig. 1: Placement des points de contrôle en zone de départ.

- L'expérience de 3 années de déclenchements sur le site a montré que l'avalanche doit être déclenchée avant 9h30 le matin sans quoi les chances d'occurrence diminuent fortement. L'éclairage de la pente avant le déclenchement n'est alors pas propice à un contraste optimal pour la prise de vue.
- L'implantation et le maintien de points de contrôle au sol est délicat car il faut les placer dans des zones libres de neige, même après une importante chute, et hors de portée des avalanches. De plus, la mise en place sur le site est techniquement difficile (falaises, couloirs...). Le positionnement par système GPS est parfois impossible (en falaise), les techniques tachéométriques étant alors de mise.

Afin de pallier ces inconvénients, sans nuire à la flexibilité du système, le couplage d'un système de navigation intégrant GPS et système inertiel (INS) à la caméra a été parallèlement étudié. Un tel système à l'avantage d'être indépendant d'une signalisation au sol en fournissant directement les paramètres d'orientation externe pour chaque cliché.

Afin de répondre aux exigences de souplesse et de rapidité, nous avons opté pour un système basé sur l'emploi des ca-

méras aériennes manuelles moyen format (4x5") Linhof Aérotechnika et Tomtcs HIEI G4. L'emploi de l'hélicoptère (Alouette III, Lama) permet des prises de vues verticales ou obliques à grande échelle (1/5000).

Pour la signalisation au sol, 50 points de contrôle ont été répartis sur la zone de départ et dans la zone de dépôt. Il s'agit de plaques d'aluminium de 60x60 cm, fixées sur le rocher ou sur mât selon le terrain. Tous les points ont été mesurés par GPS ou levé tachéométrique avec une précision de l'ordre de 5cm. Le placement, parfois délicat, des points de contrôle est le fruit d'observations des zones «hors neige» durant les hivers 1994 à 1999 (fig. 1). Néanmoins, les points de contrôle doivent être contrôlés ou remplacés chaque année.

2. Les événements des hivers 1999–2000

Trois avalanches ont été déclenchées artificiellement en 1999 (fig. 2) et deux en 2000 sur le site de la Vallée de la Sionne. Le tableau 1 résume les travaux photogrammétriques effectués pour les épisodes majeurs.

En général, il n'est pas prévu de prendre en photo la zone de dépôt avant le déclenchement. Les raisons sont:



Fig. 2: Avalanche du 10.02.99. Le mat à droite mesure 21 m (SLF).

| Date | Zone | Avant | Après |
|----------|--------|---------------|--------------------|
| 10.02.99 | Départ | XX | XX |
| | Dépôt | - | XX |
| 25.02.99 | Départ | 00 (panne) | XX |
| | Dépôt | - | XX |
| 27.12.99 | Départ | 00 (spontané) | 00 (neige fraîche) |
| | Dépôt | - | XX |
| 20.02.00 | Départ | 00 (nuageux) | XX |
| | Dépôt | - | XX |

Tab. 1: Travaux photogrammétriques pour les hivers 1999 et 2000. XX: réalisé, 00: échec, -: non planifié.

- l'ombre dans la zone de dépôt au moment de la prise de vue (9h) diminue fortement la précision.
- la neige fraîche au sol ou tombée depuis la dernière avalanche constitue un volume négligeable du dépôt du fait de sa faible densité.

Les principaux épisodes sont détaillés ci-dessous:

10.02.99: Des photographies aériennes ont été prises avant et après l'avalanche pour la zone de déclenchement et la zone de dépôt. Toutefois, la fracture s'est propagée 700 m au sud de la zone signalisée et l'avalanche s'est déposée également hors du périmètre d'étude. La moitié des points de contrôle de la zone de dépôt ont été détruits.

25.02.99: Une défaillance de la caméra n'a permis aucune prise de vue avant l'avalanche. Des photos a posteriori ont pu être faites un jour après le déclenchement. Cette avalanche exceptionnelle a détruit 90% des points d'ajustage restants sur la zone de dépôt et s'est étendue sur une surface 2 fois supérieure au domaine d'étude. Des points de contrôle temporaires ont été placés et mesurés par GPS. Pour faciliter les mesures sur la zone de dépôt, le KSL (Koordinationsstelle für Luftaufnahmen) a effectué un vol 1:10 000 avec une camera Leica RC30.

Durant l'été 1999, tous les points de contrôle détruits ont été remplacés et complétés.

20.02.00: Aucune photo avant le déclenchement n'a pu être prise à cause du brouillard présent sur le haut de la pente.

La double cassure (2 avalanches) a été photographiée ainsi que la zone de dépôt.

3. Résultats

3.1 Précision de l'orientation externe

L'obliquité des images et le contraste de la neige fraîche de la zone de déclenchement requièrent l'emploi de restituteurs

analytiques. La qualité optique de ces derniers permet une restitution plus précise pour les zones à faible contraste. Les mesures ont été effectuée avec le restituteur analytique Wild S9AP et la compensation de bloc faite avec BLUH et BINGO. Pour la zone de dépôt, la station numérique Socet Set de LH Systems a été employée pour l'orientation et la restitution. La texture de l'avalanche permet l'emploi de la corrélation automatique pour le calcul du modèle numérique de surface. Une correction manuelle est apportée par la suite pour contrôler et corriger les éventuelles erreurs. Le tableau 2 présente les précisions obtenues pour les orientations (triangulation par faisceaux).

Cette précision est caractérisée par la RMS (Root Mean Square Error) sur les déviations aux points de contrôle. L'étape de l'orientation est alors cruciale pour le calcul de volume. Toute erreur sur l'orientation induit une erreur systématique qui se répercute directement sur le volume. C'est pourquoi il est fondamental d'utiliser pour chaque épisode les mêmes points

| Date, Zone, Période | Echelle, Image/bande Caméra | Distribution Qualité, Nbre de PC | RMS [cm] | |
|-------------------------------|-----------------------------------|--|----------|----|
| | | | X,Y | Z |
| 10.02.99 Fracture Avant | 1:4500 4/1 Linhof | 00 00 9 | 15 | 13 |
| 10.02.99 Fracture Après | 1:5000 3/1 Linhof | -- 00 5 | 25 | 27 |
| 10.02.99 Dépôt Après | 1:5500 9/2 Linhof | ++ ++ 11 | 35 | 22 |
| 25.02.99 Dépôt Après | 1:10 000 2/1 RC30 | 00 00 11 | 40 | 35 |
| 20.02.00 Fracture Après | 1:5000 6/1 Linhof | ++ ++ 13 | 20 | 17 |
| 20.02.00 Dépôt Après | 1:6000 6/3 Linhof | ++ ++ 12 | 25 | 18 |

Tab. 2: Qualité des orientations pour les principaux épisodes Avant et Après avalanche. ++: bon, 00: moyen, --: médiocre distribution/qualité des pt de contrôle (PC).

de contrôle lors de la phase d'orientation. La précision de l'orientation dépend de l'échelle et de la qualité et distribution des points de contrôle. Une bonne distribution et des points clairement identifiables et de coordonnées connues avec précision (++ tab.2) permettent une bonne orientation.

3.2 Mesure de la hauteur de la cassure

La mesure de la hauteur de la cassure (fig. 3) ne nécessite qu'une mesure relative sur un même modèle. La mesure de cette ligne donne une information sur le volume de la plaque de neige qui s'écoule. La précision de l'orientation absolue n'a pas d'influence sur ce type de mesure. Seuls le contraste et l'échelle ont une influence. Sur des lignes de rupture aussi bien définies, l'erreur sur la mesure d'un seul point est de l'ordre de 10 à 15 cm. La hauteur est mesurée par paire de points «haut-bas», ainsi que par ligne.

Même avec une orientation externe de mauvaise qualité, il a été possible de mesurer précisément la ligne de rupture du 10.02.99. Pour le 25 février 99, la prise de vue a été effectuée 4 jours après le déclenchement. Le tassemement du manteau neigeux, de l'ordre de 45 cm, a du être pris en compte (mesure sur les stations automatiques voisines) et a introduit une erreur de l'ordre de ± 20 cm sur la hauteur de la cassure.

La figure 4 montre la cassure du 25 fé-

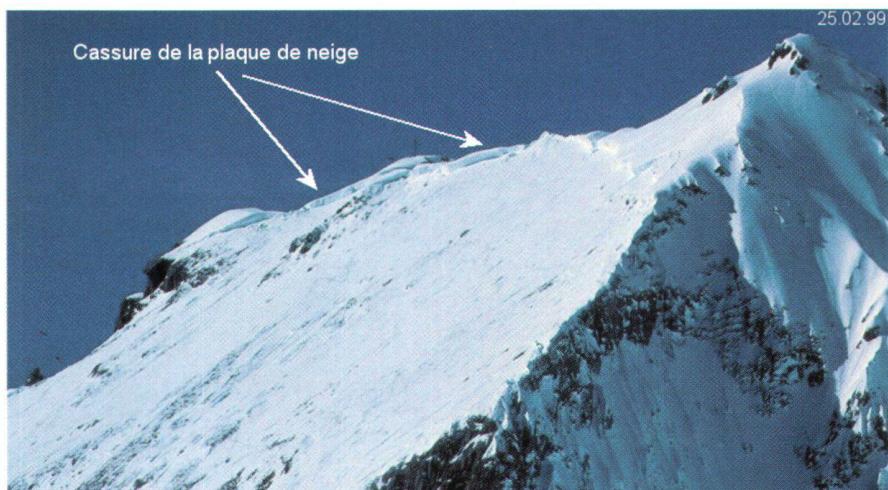


Fig. 3: Cassure du 25.02.99. La hauteur moyenne est de 2.1 m sur 1 km de long.

vrier 1999. Une hauteur moyenne de 2.10 m et des valeurs variant de 1.0 m à 3.5 m sur une longueur de 1 km.

3.3 Mesure des volumes de la zone de départ du 10.02.99

Les photographies ont été effectuées avant et après le déclenchement de l'avalanche. Pour les mesures volumétriques, l'orientation est l'étape fondamentale car elle induit des erreurs systématiques sur la mesure des surfaces, qui se répercutent directement sur les volumes. Ce type d'erreur influence plus le calcul du volume global que l'erreur de restitution sur un seul point (due à l'opérateur et au contraste). L'avalanche s'étant propagée hors de la zone signalisée, des points naturels ont été mesurés sur le premier modèle et ont

servi de points de contrôle pour la situation avant déclenchement. De cette manière, on réduit les erreurs systématiques entre les modèles. Une précision relative de 25 cm entre les deux surfaces a pu être obtenue.

A cette erreur systématique vient s'ajouter l'erreur commise lors de la restitution. Cette erreur dépend principalement du contraste de la surface neigeuse. Pour estimer le bruit qui entache la mesure d'un point, on effectue une analyse de variabilité en comparant la hauteur de neige d'un point avec ses voisins. On suppose alors que la hauteur de neige ne varie que faiblement d'un point à son voisin, les points étant mesurés tous les 4 m. La figure 5 montre les résultats de cette analyse pour les zones à faible contraste. Le bruit est d'environ 60 cm et revêt un caractère aléatoire.

Une autre méthode consiste à comparer plusieurs mesures de la même grille de points par différents opérateurs. Ces tests ont révélé que pour des zones avec un bon contraste, l'erreur sur la mesure d'un point était de l'ordre de 15 cm tandis qu'en zone faiblement contrastée, cette erreur pouvait aller jusqu'à 50 cm. Toutefois, ce type d'erreur n'affecte que faiblement le volume global car la moyenne du bruit sur toute la zone est de l'ordre de zéro (cf. fig. 4).

Après déclenchement, la restitution de 2900 points pose peu de problème car le contraste est excellent. Ce fichier de point

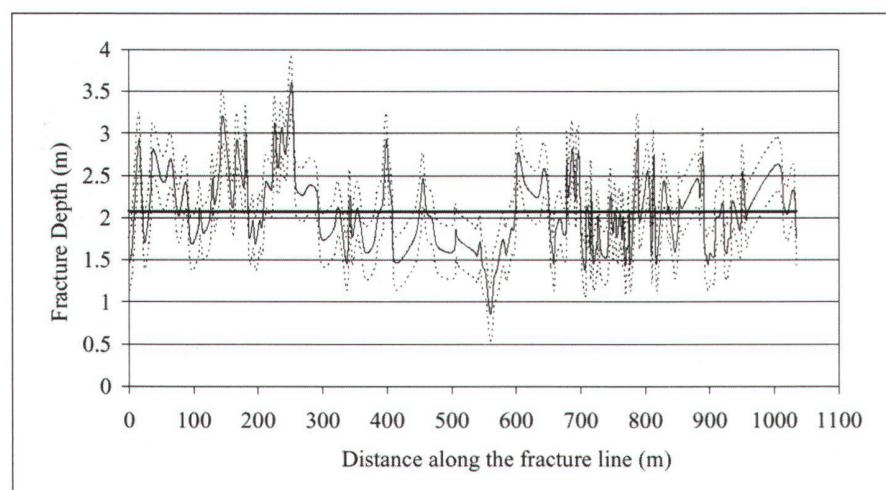


Fig. 4: Hauteur de la cassure pour le 25.02.99.

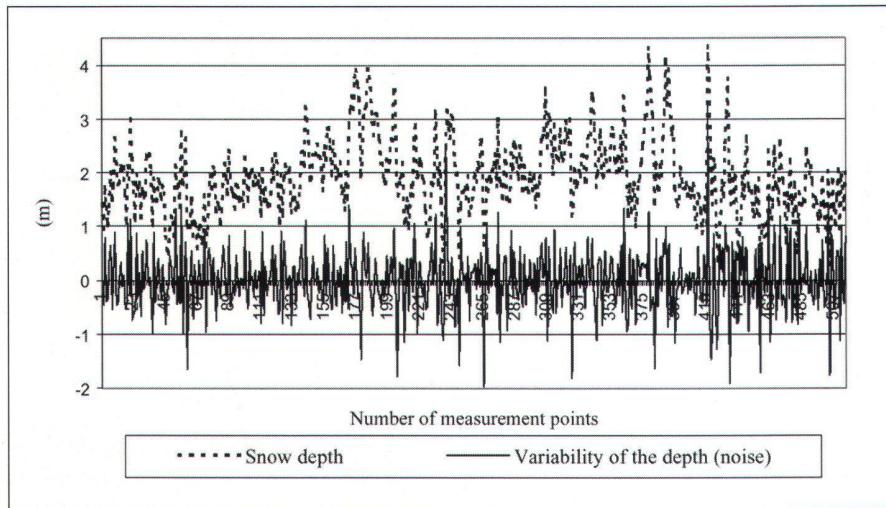


Fig. 5: Bruit sur la mesure de hauteur de neige.

| | Volume [m ³] Avalanche / total | Volume [m ³] érosion visible | Surface [ha] |
|----------|---|---|--------------|
| 10.02.99 | 467 000 / 694 000 | — | 32 |
| 25.02.99 | 877 000 / 1 589 000 | 18'000 | 49 |
| 20.02.99 | 500 000 / 741 000 | — | 25 |

Tab. 3: Volume des dépôts des principales avalanches et du cumulé (par rapport au sol). Volume de l'érosion visible entre deux avalanches. La surface fait rapport à l'étendue de l'écoulement dense et non de l'aérosol.

| Date | 30.01.99 | 10.02.99 | 25.02.99 |
|--------------------------|----------|----------|----------|
| Volume [m ³] | 80 000 | 220 000 | 520 000 |

Tab. 4: Volume de la zone de départ estimé sur la base des hauteurs de fracture. Pour le 10.02, le volume a été mesuré.

a été réintroduit pour être mesuré sur le modèle avant déclenchement, mais seuls 1700 points ont pu être mesurés à cause du faible contraste de la neige fraîche. Même si la mesure des volumes est incomplète, d'importantes informations peuvent en être déduites. Les hauteurs maximales de neige ne se situent pas au niveau de la fracture mais plus bas dans la pente, en dessous des rochers les plus raides et dans les couloirs. Le calcul du volume sur la surface mesurée donne une hauteur moyenne de plaque de 1.20 m soit 35 cm de plus que la hauteur moyenne de la cassure (tab. 3).

Sur la base de ces mesures de cassure et d'images vidéo permettant d'estimer la taille de la plaque, on a pu estimer les vo-

lumes de départ pour les épisodes du 30 janvier et 25 février (tab. 4).

3.4 Mesure du volume dans la zone dépôt

Avalanche du 10.02.99:

Les orientations et les restitutions ont été effectuées avec une précision de 30 cm. La hauteur maximale mesurée était de l'ordre de 15 m au fond du vallon de la Sionne.

Avalanche du 25.02.99:

Cette avalanche d'une ampleur exceptionnelle a détruit tous les points de contrôle de la zone de dépôt. L'orientation n'a pu être alors réalisée qu'avec une précision de 50 cm. L'excellent contraste

n'a posé aucun problème pour la restitution. Les hauteurs maximales de l'ordre de 17 m sont situées au pied du bunker ainsi qu'au terme du dépôt, 1 km plus bas. Les zones d'érosion entre les deux surfaces, après l'arrêt de l'avalanche, sont également visibles notamment lors de francs changements de direction de l'avalanche.

Avalanche du 20.02.00:

L'orientation de 3 bandes de 2 images a été faite avec succès pour une précision d'environ 25 cm. Le dépôt ayant commencé très haut, le volume de neige a été mesuré par rapport au sol sur la partie non commune à la référence du 27.12.99. Si on calcule le volume sur la partie commune au 27.12 et au 20.02, on obtient 231 000 m³ de dépôt. La figure 6 illustre les résultats de la restitution.

Pour l'hiver 2000, un contrôle sur les orientations a été effectué en mesurant des points communs entre les modèles d'hiver et les modèles d'été. Les écarts n'excèdent pas 15–20 cm (sur sol brut). Les volumes mesurés sont présentés dans le tableau 5.

3.5 Discussion des résultats

Les résultats ci-dessus ne couvrent pas la zone d'écoulement de l'avalanche. En effectuant un bilan de masse sur la base des volumes calculés – la densité de la neige a été mesurée *in situ* soit 250 kg/m³ pour la neige fraîche et 500 kg/m³ pour le dépôt – on remarque alors que la masse de neige déposée est largement supérieure à la masse de neige de la plaque de départ. Ceci prouve qu'il y a un accroissement important de la masse dans la zone d'écoulement qui correspond au volume de neige fraîche sur tout le trajet de l'avalanche. Pour l'avalanche du 30 janvier, l'entraînement a été moindre car une avalanche spontanée était partie un jour avant collectant une partie de la neige dans la zone d'écoulement.

Cette conclusion est fondamentale pour la modélisation. La plupart des modèles développés jusqu'alors négligeaient cet entraînement de neige.

D'un point de vue purement photogram-

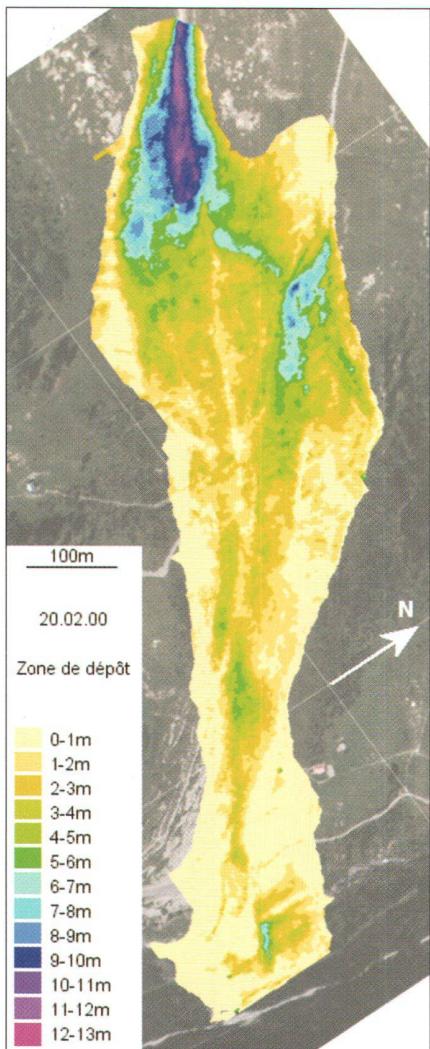


Fig. 6: Cartographie des dépôts issue des restitutions. Avalanche du 20.02.00.

métrique, ces sessions de mesures ont montré le potentiel de la méthode au niveau de la flexibilité, de l'orientation et de la restitution. Ces principales limites sont le manque de contraste dans certaines zones et la difficulté de maintenir des points de contrôle stables et durables. De plus, les développements futurs des modèles nécessiteront également des mesures dans la zone d'écoulement où une signalisation durable n'est pas envisageable.

4. Intégration INS/GPS

Parallèlement aux mesures photogrammétriques effectuées sur le site, nous nous

sommes penchés sur une solution utilisant un système de navigation INS-GPS afin de déterminer en vol les paramètres de l'orientation externe de la caméra, sans l'aide de point d'ajustage, la flexibilité du système restant une priorité.

L'intégration de ce type de capteurs dans la photogrammétrie n'est pas une nouveauté en soi. Des systèmes commerciaux existent déjà (Applanix) et de nombreux tests ont révélé des précisions de l'ordre de 15–20 cm pour le centre projection et 20–30 arc seconde pour l'attitude (Skaloud 99, Cramer 99). Toutefois, cette intégration était jusqu'alors effectuée sur un aéronef (avion, hélico) avec un montage fixe et des caméras grand format, pas assez souple d'utilisation pour les applications nivologiques. Sur la base de ces expériences hivernales, nous avons développé un système manuel combinant caméra manuelle et système INS-GPS.

4.1 Le système

Le système reste composé d'une caméra aérienne manuelle Linhof Aerotechnika ou Tomtecs HIEI G4. (format 4x5 in et 5x5 in). Une structure en carbone-aluminium permet le montage rigide de l'unité inertiale Litton LN200 et de l'antenne GPS Leica SR500 sur la caméra. Le tout forme un seul bloc, aucun mouvement relatif n'étant possible entre les senseurs. L'INS mesure les accélérations et les vitesses angulaires à une fréquence de 400 Hz tandis que le récepteur GPS bi-fréquence (L1, L2) enregistre la position à 10 Hz. Toutes les données sont stockées sur disque dur pour le post traitement.

Chaque unité est synchronisée sur l'heure GPS. Ceci permet d'obtenir l'heure de la photographie avec une précision de 1 ms.

L'INS est synchronisé via le système d'acquisition INS-GPS (VME bus).

4.2 Montage et fonctionnement

Afin de préserver les performances théoriques d'un tel système, nous avons du concevoir le montage selon les critères suivants:

- réduire au maximum les vibrations (altère les performances de l'INS)

- éviter tout mouvement relatif entre les capteurs
- permettre la manipulation manuelle du système en préservant 6 degrés de liberté pendant la prise de vue
- répondre aux critères de sécurité de l'hélicoptère.

Pour ce faire, l'INS est monté directement sur le corps de la caméra, via la structure en aluminium-carbone. L'antenne GPS est fixée sur cette structure avec un tube carbone de 1 m (fig. 7). L'ensemble est relativement léger et très rigide. Les vibrations pendant la prise de vue sont amorties par l'opérateur qui manipule le système (fig. 7).

Pendant le vol de transition, le système est fixé à l'hélicoptère (fig. 7) et subit de faibles vibrations. Lors de la prise de vue, le système est détaché de l'appareil et permet des prises de vue verticales ou

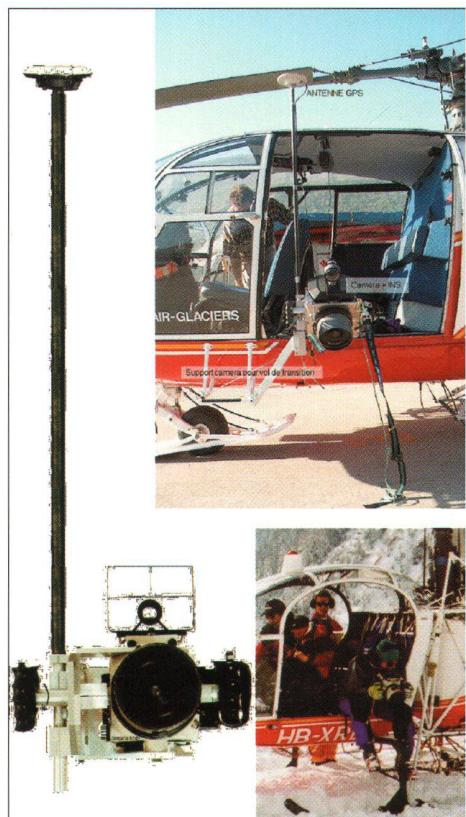


Fig. 7: Le bloc caméra-INS-GPS. Montage sur Alouette III: le système est fixé à l'alouette pendant le vol d'approche, puis détaché pendant la prise de vue. Les vibrations sont amorties par l'opérateur.

obliques. Des câbles assurent la sécurité du système pendant cette phase.

Une seconde antenne GPS est fixée sur la queue de l'appareil et fournit une valeur approximative de l'azimut pendant la phase d'initialisation de l'INS (phase de transition).

L'hélicoptère utilisé est une Alouette III. L'absence de patin et la porte coulissante laisse une grande visibilité.

Le système doit évidemment être calibré à deux niveaux : individuel (calibration des biais, orientation internes...) et ensemble (détermination des offsets entre les capteurs). Cette seconde étape s'effectue *in situ* en réalisant une aérotriangulation sur une zone très bien signalisée. Par ailleurs avant et après chaque mission, une calibration est effectuée pour contrôler la stabilité du système.

Les premiers tests sont en cours de réalisation avec la caméra Tomtecs.

5. Conclusions

Les résultats obtenus durant ces deux hivers ont clairement montré le potentiel de la photogrammétrie pour la détermination des dépôts d'avalanche et pour la mesure de cassure. Sous condition d'un bon contraste et de points de contrôle bien répartis, la hauteur de neige peut être me-

surée avec une précision de 15–30 cm. La qualité et la quantité de points d'ajustage sont cruciales pour la précision car elles influent de manière systématique sur le volume.

Toutefois, les mesures effectuées dans la zone de déclenchement ont démontré les limites de la méthode. Les forts vents, le manque de contraste sur certaines parties, la difficulté de placer et de maintenir une signalisation adéquate en condition hivernale, sont les facteurs limitant. Le manque de contraste influe essentiellement sur la mesure locale de la hauteur (bruit aléatoire de l'ordre de 60 cm) mais le volume global n'en est que peu affecté. Ces mesures ont montré également que la mesure de la cassure, bien qu'utille, n'est pas représentative de l'épaisseur moyenne de la plaque. Des accumulations importantes se produisent en effet dans les couloirs sous jacent à la cassure.

Ces données ont également mis en exergue l'entraînement de neige lors de l'écoulement de l'avalanche, phénomène négligé par la plupart des modèles.

Finalement, ces expériences ont permis de développer un système combinant photogrammétrie et système de navigation, permettant de s'affranchir des points de contrôle. Ce système est actuellement en phase de test.

Remerciements

Nous tenons à remercier M. W. Ammann, F. Dufour et U. Gruber du SLF Davos pour la collaboration fructueuse entretenue avec eux depuis 1997 et pour le financement partiel de ces études et travaux photogrammétiques.

Nous remercions également la Société Tomtecs AG pour le prêt de la camera HIEI et leur grande disponibilité.

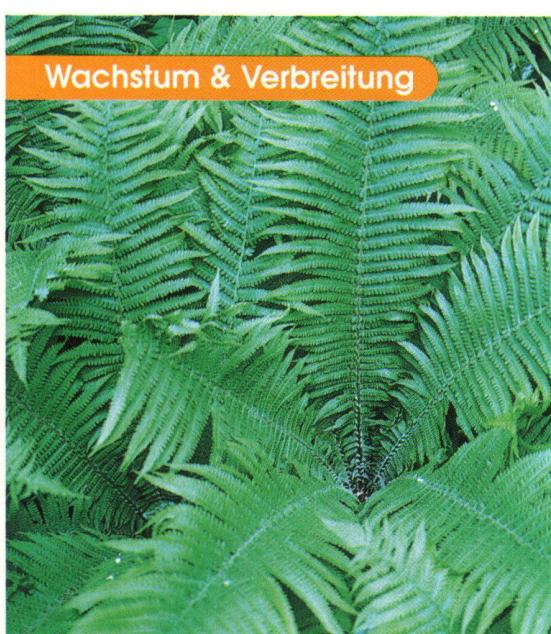
Bibliographie:

Koelbl, O., Castelle, T: (1991) Utilisation des moyens photogrammétriques pour la saisie de l'évolution des dépôts de neige, Symposium CISA IKAR Chamonix.

Cramer, M. (1999). Direct Geocoding – is Aerial Triangulation Obsolete? Photogrammetric Week 47, Stuttgart, September 20–24, pp. 59–70.

Skaloud, J. (1999). Optimizing Georeferencing of Airborne Survey Systems by INS/DGPS, UGGE Report 20126, DGE, The University of Calgary.

Julien Vallet
DGR-IGEO-PHOT EPFL
CH-1015 Lausanne
julien.vallet@epfl.ch



Die Anforderungen an Ihr Versorgungsnetz wachsen. Transparenz und Aussagekraft sind gefordert.

Um Ihr Versorgungsnetz heute für die Anforderungen von morgen fit zu machen, müssen Sie den Überblick behalten. Das Geoinformations-System LIDS™ von BERIT liefert Ihnen auf Knopfdruck alle relevanten Informationen über Ihr Netz. Deshalb setzen bereits über 250 Unternehmen auf BERIT-Technologie. Viele tausend Kilometer Leitungsnetze und Millionen von Netzobjekten werden mit LIDS™ dokumentiert und verwaltet. Und es werden täglich mehr. Mit unserem Partner in Ihrer Nähe zeigen wir Ihnen gerne, wie unsere innovative Technologie auch bei Ihnen zur Entfaltung kommt. Fordern Sie uns!



www.berit.ch
Info@berit.ch
(+41) 061-816 99 99

