

Détermination de volumes de neige pour l'étude de la dynamique

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 afin de mieux gérer le risque. Le site expérimental de la Vallée de la Sionne en Valais est le siège de la recherche sur la dynamique des 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. 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



Figure 1 : placement des point de contrôle en zone de départ.

fait l'objet que de mesures photogrammétriques partielles. Ces mesures ont permis de mesurer les volumes de neige déposés et les hauteurs de cassure (plaque de neige s'écoulant dans l'avalanche). La cassure de la plus grande avalanche atteint 2,10 m sur plus de 1 000 m. Le volume total déposé par les trois avalanches de l'hiver 1999 atteignait 1'600000 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 implanter dans ces zones. La réalisation d'un test combinant photogrammétrie et GPS a montré qu'il était possible d'obtenir une précision de 10-15 cm sur les mesures au sol sans l'emploi de point d'ajustage.

neige par photogrammétrie d'avalanche

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 dans ces territoires à risques, l'homme tente de se protéger et 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 génie 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 numériques.

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 photogrammétriques 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.
- L'expérience de 3 années de déclenchements sur le site a montré que l'avalanche doit être déclenchée avant 9 h 30 le matin sans quoi les chances d'occurrence diminuent fortement. L'illumination 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 délicate 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.

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 60x60cm, 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 5 cm. Le placement, parfois délicat, des points de contrôle est le fruit d'observations des zones "hors neige" durant les hivers 1994 à 1999. Néanmoins, les points de contrôle doivent être contrôlés ou remplacés chaque année.

■ ■ ■ 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 caméras aériennes manuelles moyen format (4x5") Linhof Aérotechnika et Tomtecs HIEI G4. L'emploi de l'hélicoptère (Alouette III, Lama) permet des prises de vues verticales ou obliques à grande échelle (1/5 000).

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 60x60cm, 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 5 cm. 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.

Les évènements des hivers 99-2000

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

Tableau 1 : Travaux photogrammétriques pour les hivers 1999 et 2000.

XX : réalisé, 00 : échec, - : non planifié.

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



© Photo SLF

Figure 2 : avalanche du 10.02.99. le mat à droite mesure 21m.

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 :

- 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 résumés ci dessous :

Le 10/02/99, l'épisode a pu être couvert dans sa totalité, i.e. avant et après l'avalanche. Toutefois, la fracture s'est propagée 700 m au sud de la zone signali-

sée et l'avalanche s'est déposée hors du périmètre d'étude. La moitié des points d'ajustage de la zone de dépôt ont été détruits.

Le 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 et quatre jours 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.

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

Le 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

■ 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 restitu-teurs analytiques. La qualité optique de ces derniers permet une restitution plus précise pour les zones à faible contraste. Les mesures ont été effectuées 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.

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

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

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	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 :10000 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

systematique qui se répercute directement sur le volume. C'est pourquoi il est fondamental d'utiliser pour chaque épisode les mêmes points 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.

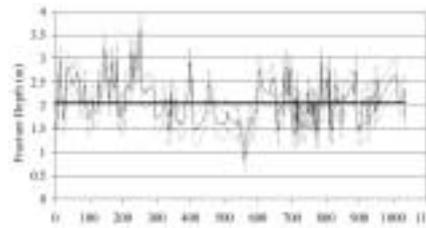
■ Mesure de la hauteur de la cassure

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

Figure 3 : Cassure du 25/02/99. La hauteur moyenne est de 2.1m sur 1km de long.



Figure 4 : Hauteur de la cassure pour le 25/02/99



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 tassement du manteau neigeux, de l'ordre de 45 cm, a dû 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 février 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.

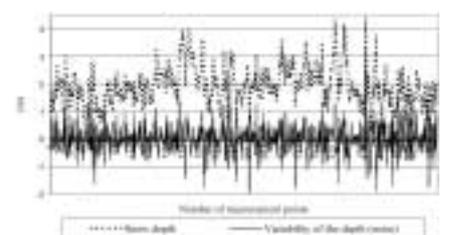
■ Mesure de volumes de la zone de départ du 10/02/99

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.

Figure 5 : Bruit sur la mesure de hauteur de neige



■ ■ ■ 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 15cm tandis qu'en zone faiblement contrastée, cette erreur pouvait aller jusqu'à 50cm. 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 (fig. 5).

Après déclenchement, la restitution de 2900 points pose peu de problème car le contraste est excellent. Seuls 1700 points ont pu être mesurés à cause du faible contraste de la neige fraîche sur le modèle avant déclenchement. 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 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.

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

Tableau 4 : Volume de la zone de départ estimé sur la base des hauteurs de fracture. Pour le 10/02, le volume a été mesuré.

Date	30/01/99	10/02/99	25/02/99
Volume [m ³]	80'000	220'000	520'000

■ Mesure du volume dans la zone dépôt

Les mesures en zones de dépôt ne posent pas de problème de restitution car le contraste de l'avalanche est en général excellent. Seule l'orientation des images peut engendrer des erreurs à caractère systématique. Si l'on omet le cas du 25/02/99 ou tous les points d'ajustage ont été détruits, les hauteurs de neige ont toujours pu être mesurées avec une précision inférieure à 30 cm et 50 cm pour le 25 février 99. Les hau-

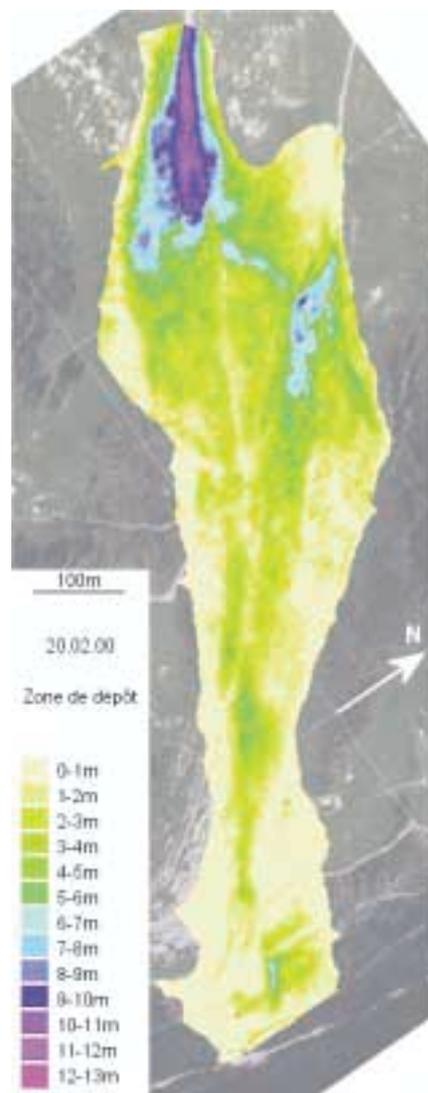
Tableau 5 : Volume des dépôts des principales avalanches et du cumulé (par rapport au sol). Volume de l'érosion visible entre deux avalanches. La surface fait rapport à l'étendue de l'écoulement dense et non de l'aérosol.

Date	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

teurs maximales mesurées sont de l'ordre de 12 à 17 m pour chaque avalanche. Les zones d'érosion entre les deux surfaces sont également visibles pour l'épisode du 25/02/99 surtout lors des changements de direction.

Pour l'hiver 2000, un contrôle sur les orientations a été effectué en mesurant

La figure 6 : illustre les résultats de la restitution pour l'épisode du 20/02/00.



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.

■ 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 (Salm et al., 1990).

D'un point de vue purement photogrammétrique, 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 contrôles 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 senseurs 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 15-20cm 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.

■ Le système

Le système se compose des mêmes caméras aériennes manuelles (Linhof, Tomtecs). Une structure en carbone-aluminium permet le montage rigide de l'unité inertielle 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.



La figure 7 : illustre le montage du système.



Toutes les données sont stockées sur disque dur pour le post traitement.

Chaque unité est synchronisée sur l'heure GPS au moyen du PPS (pulse per second) garantissant une précision de quelques microsecondes.

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) en supprimant le lien rigide entre l'hélicoptère et le block de capteurs.

L'opérateur joue alors le rôle d'amortisseur lors de la prise de vue.

- Éviter tout mouvement relatif entre les capteurs avec une structure rigide en aluminium-carbone.
- 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 par l'ajout de câbles de sécurité.

Le système doit évidemment être calibré à deux niveaux : individuel (cali- ■■■

Le système se compose des mêmes caméras aériennes manuelles (Linhof, Tomtecs). Une structure en carbone-aluminium permet le montage rigide de l'unité inertielle 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 au moyen du PPS (pulse per second) garantissant une précision de quelques microsecondes.

■ ■ ■ bration 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 à chaque mission, une calibration est effectuée pour contrôler la stabilité du système.

■ Résultats de la combinaison photogrammétrie-GPS

Nous avons réalisé un test sur le site avalancheux en utilisant le système développé. Nous avons utilisé d'abord uniquement le système GPS pour mesurer les coordonnées des centres de projection des prises de vues. Cette combinaison est relativement classique depuis plusieurs années et permet en théorie de n'utiliser aucun point d'ajustage pourvu que l'on ait au minimum 2 bandes d'images avec un recouvrement de 30-50% (Ackermann, 1994).

Nous avons effectué deux lignes de vol obliques dans la zone de départ d'ava-



Figure 8 : vecteurs résidus sur les points de contrôle (check point) pour l'orientation sans point d'ajustage.

Type de calcul	RMS X [m]	RMS Y [m]	RMS Z [m]
GPS	0.15	0.11	0.09
GPS-1PA	0.12	0.10	0.15
GPS-2PA	0.11	0.09	0.15
GPS-3PA	0.11	0.08	0.12
GPS-4PA	0.12	0.09	0.12
GPS-6PA	0.10	0.08	0.10

Tableau 5 : RMS des résidus sur les points de contrôle en fonction du nombre de points d'ajustage utilisés.

lanche avec un recouvrement de 50%. Les mesures GPS, calculées avec GRAFNAV, ont fourni les coordonnées des antennes pour chaque prise de vue avec une précision inférieure à 5 cm. Nous avons effectué une aérotriangulation classique du bloc avec 130 points de liaison et 20 points d'ajustage. Lors de cette aérotriangulation, nous avons profité pour la calibrer les paramètres d'orientation interne de la caméra Tomtecs (focale, point principal, distortion...). Par la suite nous avons calculé les éléments d'orientation externe en introduisant les données GPS et en supprimant les points d'ajustage. Tous les calculs ont été faits avec le logiciel BINGO.

Les résultats présentés dans le tableau 5 et montrent que la précision sur les résidus aux points de contrôle (Check point) est de l'ordre de 10 cm avec une erreur systématique résiduelle de 10-15 cm (fig. 8).

Cette erreur systématique peut provenir de deux sources :

- Les points de contrôle au sol déterminés par lever tachéométrique pourraient être décalés par rapport aux mesures

GPS : les erreurs systématiques constatées sont orientées dans la même direction que le grand axe des ellipses d'erreur lors du lever des points.

- La grande différence d'altitude entre la station de référence et l'hélicoptère. La modélisation de la troposphère peut être à l'origine de cette erreur.

La présence de points d'ajustage permet de réduire les erreurs systématiques et apporte un contrôle non négligeable en cas de problème.

Le système est donc fonctionnel et assure une orientation sans point d'ajustage avec la précision requise.

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 mesurée avec une précision de 15-30 cm. La qualité et la quantité de points d'ajustage sont

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

cruciales pour la précision car elles influencent 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'utile, 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. Les tests effectués avec la détermination des coordonnées du centre de projection par GPS permettent une précision sur la mesure au sol de 10-15 cm sans l'emploi de point d'ajustage. Néanmoins il est conseillé d'utiliser 3 points d'ajustage comme contrôle sur les extrémités du bloc. Les tests intégrant INS/GPS sont actuellement en cours. ●

J. VALLET

Laboratoire de Photogrammétrie
EPF-Lausanne

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 photogrammétriques.

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

Nous n'oublions pas le laboratoire de Topométrie de l'EPFL qui collabore étroitement à ce projet.

Bibliographie

Koelbl, O., Castle 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.

Ackermann, F. (1994) *On the status and accuracy performance of GPS photogrammetry*, *Proceedings, ASPRS Workshop "Mapping and remote sensing tools for the 21st century"*, Washington D.C., pp. 80-90.

Salm, B., Burkard, A., Gubler, H. (1990) *Berechnung von Fließlawinen, eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen*. Mitteilungs des SLF Davos, N° 47.

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



ABSTRACT

Avalanches represent a natural hazard sometimes not controlled for the human activities. Various organizations whose the Federal Institute for Snow and Avalanche Research of Davos (SLF) performs researches to understand the phenomenon so as to better manage the risk. The experimental site of the Valley de la Sionne is the seat of avalanche dynamic researches of the SLF. During the winters 1999 and 2000, five major avalanches had been artificially released on this site. Many parameters are necessary must be measured to model the avalanche runoff. The photogrammetric determination of the volumes of snow implied in the avalanches is one of the many objectives of this study.

During those two winters, only one event made had been fully covered, i.e. the measurement of volume for the release and deposition area. The other events were partially measured. These photogrammetric measurements allow determining the volumes of deposited snow and the fracture height (snow slab creating the avalanche). The fracture of the greatest avalanche reached 2.10m on 1000m length. The total volume deposited by the three avalanches of winter 1999 reached 1' 600.000m³ with a thickness of 30m. The difference between the released and deposited volumes proved that avalanches entrain a large amount of snow in the avalanche track. This effect has not been taken into account in various existing avalanche dynamics models. Furthermore, the snow distribution in the deposition zone provides important information about the behaviour of a dense flowing avalanche in the runout zone. Those photogrammetric also contributed to a photogrammetric system development integrating the techniques of navigation INS/GPS, then making it possible to avoid ground signalisation which is extremely difficult to place in such dangerous areas. The experimental test combining photogrammetry and GPS showed that it was possible to achieve a precision of 10-15cm ground measurements without ground control point.