

Cemagref, UNITE DE RECHERCHE ETNA
2, rue de la papeterie
BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex
TEL. 04.76.76.27.27
TELEFAX : 04.76.51.38.03

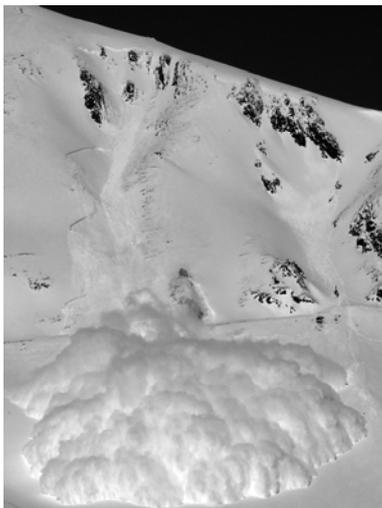
LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE ET GEOPHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT
C.N.R.S., UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I
BP 96, 38402 ST MARTIN D'HÈRES CEDEX
TEL. 04.76.82.42.00
TELEFAX : 04.76.82.42.01

**Photogrammétrie numérique & risques naturels :
Application à la dynamique des avalanches et aux chutes de séracs**

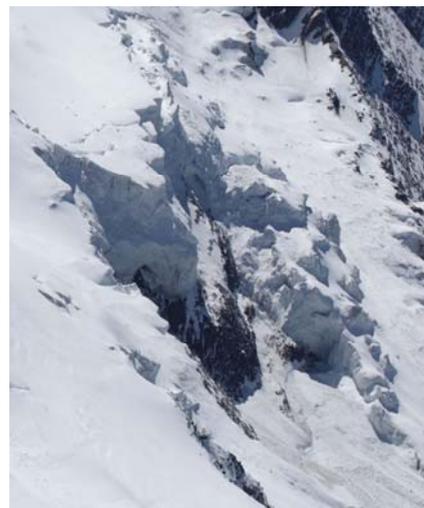
Synthèse effectuée pour le Pôle Grenoblois Risques Naturels

**E. THIBERT⁽¹⁾, C. VINCENT⁽²⁾, A. SORUCO^(1,2)
M. HARTE^(2,1), R. BLANC⁽³⁾, R. HENO⁽⁴⁾**

- (1) Cemagref UR ETGR, Grenoble
- (2) LGGE, CNRS-UJF, Grenoble
- (3) Sintegra, Meylan
- (4) ENSG-IGN, Champs sur Marne



Avalanche artificielle au
Lautaret



Séracs de Taconnaz

Résumé. Ce projet a pour objectif de développer un outil de photogrammétrie numérique de terrain pour suivre des phénomènes dynamiques responsables de risques naturels en montagne (avalanche, chute de séracs). Cette technique permet en effet d'obtenir des modèles numériques de terrain à partir d'une grande distance d'observation (jusqu'à plusieurs km) sur une durée d'acquisition instantanée (fraction de seconde) et demeure peu onéreuse par rapport à la photogrammétrie aérienne ou au laser-scan aéroporté. La répétition des prises de vues dans le temps (plusieurs images/seconde à une image/jour) peut être facilement adaptée à la dynamique du phénomène étudié et ainsi permettre de mesurer des vitesses d'évolution de la topographie du terrain (écoulement, fracturation, affaissement, basculement). Pour la mise au point de cet outil (choix des optiques, calibration, logiciels d'aérotriangulation des clichés et de restitution, quantification de l'erreur de mesure), nous avons travaillé sur le site de déclenchement d'avalanche du Cemagref au Col du Lautaret. Les tests de calibration montrent qu'il est possible d'atteindre une précision de 1 à 3 pixels sur les coordonnées des points mesurés avec du matériel photographique réflex de grande série (format FX et DX). Notre outil photogrammétrique a ainsi permis de mesurer les vitesses du front d'une avalanche déclenchée artificiellement. Cette technique permettra à terme de valider/calibrer des modèles d'écoulement d'avalanche (loi de frottement, érosion/dépôt). Cet outil photogrammétrique a été également mis en œuvre sur le site de Tacconnaz (vallée de Chamonix) afin de suivre la dynamique des séracs qui déclenchent d'importantes avalanches l'hiver. Nous avons ainsi pu calculer le volume d'une importante chute de sérac survenue dans la nuit du 12 au 13 août 2010. À terme, ce suivi photogrammétrique devrait permettre la prévision des plus importantes chutes de séracs (crevasses précurseurs, limite d'équilibre de la lèvre des séracs, volume et fréquence de rupture). Ces travaux s'effectuent dans le cadre de 2 projets Interreg « GlariskAlp » et « Dynaval » (Alcotra Interreg IIIa). Le financement accordé par le Pôle Grenoblois Risques Naturels a permis d'équiper le site de Tacconnaz pour le suivi opérationnel et de réaliser les calibrations des systèmes photogrammétriques.

1. Contexte & objectifs

1.2 Contexte de recherche: Le site de déclenchement d'avalanche du Lautaret

Le Cemagref utilise depuis 1972 le site de déclenchement d'avalanche du col du Lautaret (Fig. 1). Initialement consacré à la mise au point de dispositifs de déclenchement, puis à l'étude de sollicitation des avalanches sur les ouvrages de génie civil, le site est également aujourd'hui dédié à l'étude de la dynamique des avalanches. Afin d'accéder aux lois d'écoulement de la neige, la caractérisation des écoulements nécessite, entre autre, de déterminer les vitesses de l'avalanche. Actuellement, celle-ci est mesurée localement sur les dispositifs d'instrumentation (vitesse Eulerienne), à l'endroit où sont également mesurés les hauteurs d'écoulement et les pressions. L'approche Lagrangienne consiste à suivre l'écoulement depuis la zone de départ jusqu'à la zone de dépôt de l'avalanche. Des paramètres tels que le volume (surface et hauteur de la zone de départ), la vitesse de l'écoulement et la hauteur du dépôt dans la zone d'arrêt sont des données clés, indispensables pour valider les modèles numériques simulant les écoulements. La mesure des volumes de neige déplacés est réalisable par laser scan, avec des relevés effectués avant et après les tirs de déclenchement. Cependant, cette mesure n'est pas réalisable avec un laser scan au sol vu la taille du site expérimental et la portée limitée à 500-600 m de ce type d'instrument. L'acquisition nécessite également un temps de scan qui interdit toute mesure pendant l'écoulement pour accéder, par exemple, à la position du front de l'avalanche et par répétition de la mesure à intervalle régulier, à sa vitesse.

La solution envisagée est d'utiliser des prises de vue photographiques numériques afin d'obtenir une vision stéréoscopique instantanée du terrain. Dans la mise au point de cette méthode, la phase d'aérotriangulation des clichés, c'est à dire la reconstitution de la géométrie de prise de vues (orientation des prises de vues dans l'espace) est une étape déterminante. Elle est très sensible aux paramètres de la chambre de prise de vue (ensemble boîtier-optique), principalement focale et distorsion. Ceux-ci doivent être déterminés *à priori* par une méthode de calibration. Le redressement géométrique des prises de vue nécessite des points connus en coordonnées image et terrain pour résoudre le problème de l'intersection inverse dans l'espace. Le nombre, la répartition et la précision des points de contrôle utilisés dans le calcul itératif de résolution des équations de colinéarité contrôlent également la précision géométrique des couples d'image à restituer.

Un travail important doit donc être consacré à la mise au point de cet outil. Pour cette raison, il est envisagé de valoriser ensuite ce capital technique sur d'autres problématiques comme la trajectographie de chute de blocs de rocher (site de Vaujany, UR EMGR, Frédéric Berger), la mesure de vitesse de front de lave torrentielle, ou l'obtention de modèle numérique de terrain en alternative au laser-scan (longue portée, acquisition rapide). Dans le cadre de ce projet, cet outil sera appliqué en opérationnel au suivi de séracs de Taconnaz (vallée de Chamonix).

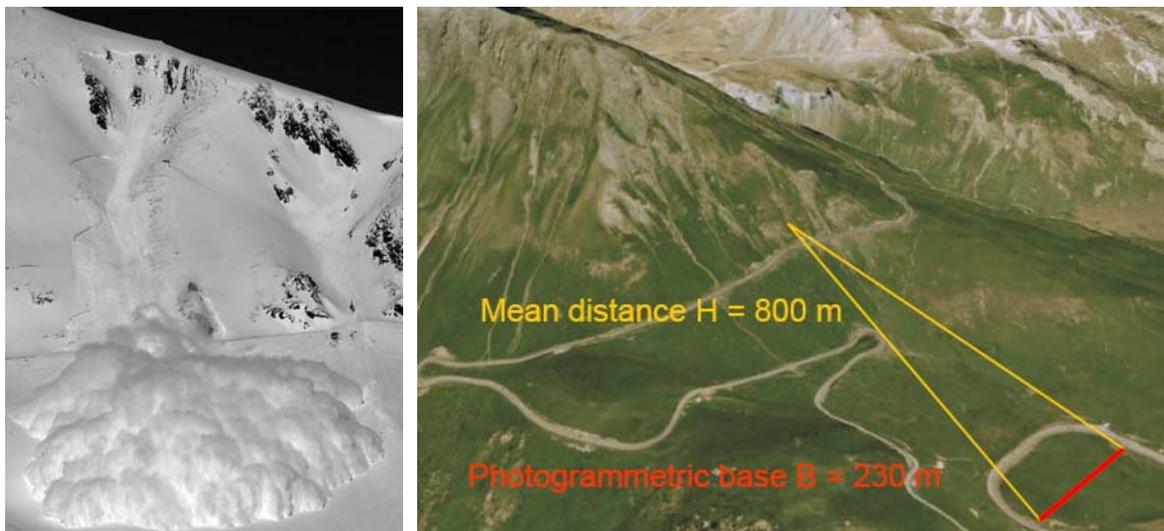


Fig. 1. Le site du Lautaret et les conditions de prises de vue stéréoscopiques

1.2 Contexte opérationnel: Le site de Taconnaz

Le glacier de Taconnaz s'étend du Dôme du Goûter (4300 m) jusqu'à 1700 m environ à l'amont du village du Nant. Globalement orienté au nord, il est scindé en deux parties : une zone supérieure d'accumulation et la langue inférieure (Fig. 2). Ces 2 parties sont séparées par une chute de séracs d'une largeur de 600 à 700 m et d'une hauteur maximum de 100 m. Cette chute de séracs engendre des écroulements de séracs sur la langue inférieure du glacier. Au cours de la saison estivale, la langue glaciaire terminale est dépourvue de neige et ces écroulements sont sans conséquence car cette zone n'est pas fréquentée par les touristes ou les alpinistes.

En revanche, durant la saison hivernale, lorsque les accumulations de neige sont importantes, les chutes de séracs sont susceptibles de déclencher des avalanches de neige très importantes et cette masse de neige et de glace peut parcourir toute la langue terminale et atteindre le dispositif paravalanche proche des zones habitées de la vallée. Cette avalanche de neige/glace a déjà provoqué dans le passé des dégâts matériels (chalets, dispositifs paravalanche, téléski...) sans victime. Aujourd'hui, les autorités publiques sont en train de revoir le dispositif paravalanche et il est indispensable de fournir des éléments précis sur l'aléa des ruptures de séracs à l'origine de ces

avalanches. L'objectif est donc d'installer un système photogrammétrique pour acquérir en continue des séquences d'image permettant de quantifier la fréquence et le volume des chutes de sérac, et d'identifier des signes précurseurs des plus gros évènements (accélération, fracturation).

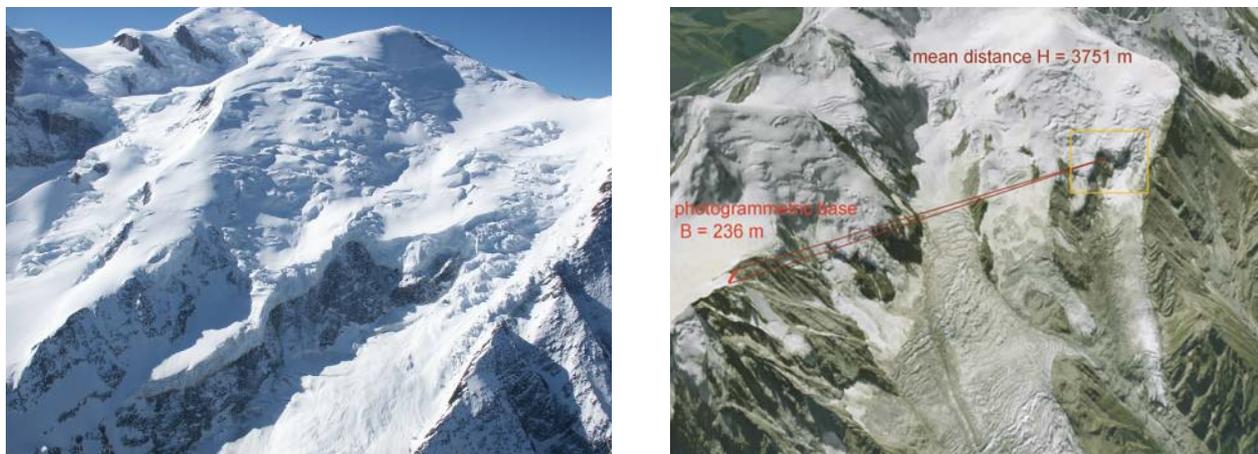


Fig. 2. Le glacier de Taconnaz, la barre de sérac transversale (Cliché C. Vincent) et la localisation du couple de caméras (à proximité de l'Aiguille du Midi, ©Géoportail).

Le financement accordé par le Pôle Grenoblois Risques Naturels (7000 €) a permis d'équiper le site de Taconnaz du dispositif photographique (couple de caméras automatisées) pour un suivi opérationnel, de réaliser les calibrations des systèmes photogrammétriques (sites de Taconnaz et Lautaret) et le choix des logiciels à utiliser. Ces points font l'objet du présent rapport.

2. Méthode

La méthodologie qui a été choisie est celle de la photogrammétrie terrestre qui permet de modéliser un espace tridimensionnel à partir de photographies stéréoscopiques. Le principe est d'utiliser 2 images d'une même surface de terrain prise selon 2 perspectives différentes. Celles-ci génèrent une parallaxe dont la mesure permet d'obtenir la distance au plan de base des caméras de prise de vue. Du point de vue de la précision recherchée, le ratio optimal base photographique/distance moyenne de la cible à photographie doit être proche de 1. Le site du col du Lautaret est bien adapté : le ratio base/distance est égal à 0.28 (base = 230 m ; distance = 800 m). C'est pour cette raison que la méthode peut être testée sur le site du Lautaret dans des conditions favorables. L'accessibilité de ce site, la possibilité de compléter aisément le réseau de point de contrôle au sol et la disponibilité actuelle d'un MNT "sol nu" (sans neige) de précision centimétrique permettront une validation et une quantification de la précision de la méthode. La chaîne de traitement photogrammétrique est composée principalement de quatre étapes :

2.1 Acquisition des images

- Au Lautaret, nous avons utilisé 2 caméras Nikon D2 (CCD de 12,8 millions de pixels en format Dx de 23,7x15,7 mm) avec un objectif de focale 85mm. Les caméras sont synchronisées par une liaison radio. Il est ainsi possible d'acquérir jusqu'à 4 images par secondes. La taille des pixels de 5.52 μm et une distance moyenne de 800 m entre les caméras et les couloirs d'avalanche permettent d'avoir une taille de pixel au sol de 5,2 cm. La base photogrammétrique (distance entre les 2 caméras) est de 230 m. On s'attend ainsi à obtenir une précision de l'ordre de 8 cm dans le plan des images, et de 21 cm dans la direction perpendiculaire (vision 3D). Les 2 caméras sont installées le jour des déclenchements artificiels et la séquence est déclenchée manuellement.

Tableau n°1. Caractéristique et condition d'utilisation des caméras

Site	camera	focale distance	format	pixel	conditions de prises de vues
Lautaret	Nikon D2Xs	85 mm f/1.4 800-1000 m	15.7×23.7 mm	2848×4288	1/2500 f/8, raw 12 bit RVB, ISO 100 1 image/s
Taconnaz	Canon 5DmkII	100 mm f/2.8 3000-4000 m	24×36 mm	3744×5616	vitesse variable, f/8, raw 12 bit RVB ISO 100, 4-6 images/jour

- Sur le site de Taconnaz, les conditions de prises de vues sont moins favorables : la distance à la zone de terrain étudiée est beaucoup plus grande (3,75 km) et les caméras sont installées en altitude (3600 m) à proximité de l'Aiguille du Midi avec une base étroite de 236 m compte tenue de cette distance (Ffig. 2). On a donc choisi des boîtiers plein format FX (24x36 mm ; 21 millions de pixels) équipé d'objectif 100 mm. La taille des pixels (6.40 mm) mise à l'échelle est d'environ 27 cm et la précision théorique attendue de l'ordre de 50 cm, mais 7 m seulement en vision 3D. Les boîtiers sont déclenchés automatiquement par un séquenceur à raison de 4-6 images par jours (une image toutes 2 heures, pas de cliché nocturne). Les systèmes photographiques sont installés à demeure dans des coffrets métalliques, alimenté sur batteries et panneaux solaires. Une visite de maintenance et de récupération des clichés s'effectue tous les mois environ.



Fig. 3. Boîtier Nikon et son relais radio (Lautaret)



Fig. 4. Panneau solaire et coffret abritant un des appareils photo (site de Taconnaz)

2.2 Mesure des points de contrôle

Les points de contrôle au sol sont essentiels au redressement géométrique des prises de vue (aérotriangulation). Théoriquement, il nous faut au minimum 3 points (bien répartis) connues en coordonnées image et terrain pour résoudre le problème de l'intersection inverse dans l'espace. Il faut savoir ici que plus les points de contrôle utilisés dans le calcul itératif de résolution des équations de colinéarité seront nombreux, meilleure sera la précision géométrique du couple stéréoscopique lors de la restitution photogrammétrique.

- Au Lautaret, nous avons utilisé 7 points de contrôles utilisables l'hiver quelque soient les conditions d'enneigement (Fig. 5), nombre suffisant pour déterminer l'orientation (coordonnées et directions des caméras). La figure 6 représente une mire de calage telle qu'elle est obtenue sur le cliché devant être orienté (ici 900 m de distance caméra-mire). Afin de procéder à la calibration,

nous avons complété temporairement ce réseau jusqu'à 17 points lors de l'été 2009 (Fig. 7). Les coordonnées des points ont été mesurées par GPS différentiel géodésique (précision centimétrique). Nous avons également utilisé une mire de calibration mise à disposition par l'IGN (ENSG, Champ sur Marne) disposant d'un réseau de 56 points (précision millimétrique ; Fig. 8).

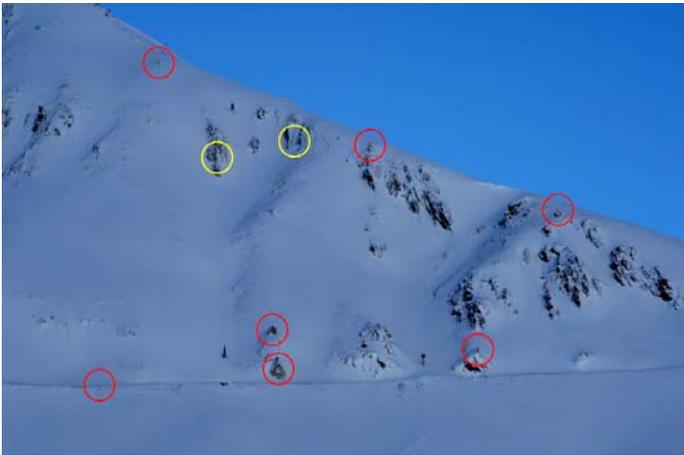


Fig. 5. Points de contrôle au Lautaret (vue gauche ; hiver)



Fig. 6. Mire de calage au Lautaret vue à 900 m de distance de la caméra.

- Sur le site de Taconnaz, nous avons mis en place un réseau de 6 points de contrôle, également mesurés par GPS différentiel. Les conditions d'accès ont nécessité le transport sur site par hélicoptère (Fig. 11). La figure 12 représente un point de contrôle visé à 2750 m de la caméra.

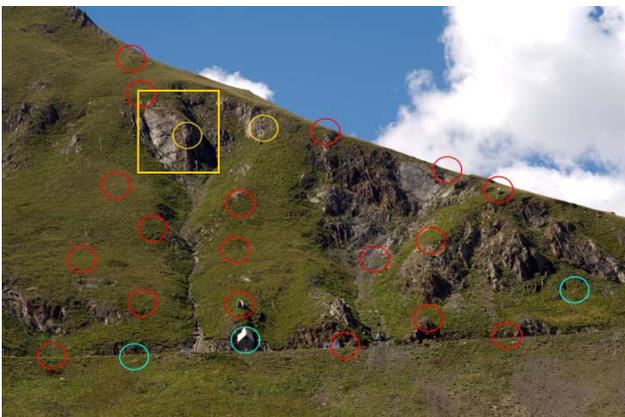


Fig. 7. Points additionnels pour la calibration au Lautaret et zone de validation de restitution photogrammétrique



Fig. 8. Points de calibration (IGN ENSG)

La calibration a permis de déterminer précisément la focale des objectifs (important pour la mise à l'échelle des clichés), et de quantifier les défauts géométriques (distorsion, décentrement). Ces caractéristiques sont sensibles à la distance de mise au point et au diaphragme d'obturation ; et il est préférable d'effectuer les calibrations au plus près des conditions réelles d'utilisation des caméras. C'est pourquoi on a retenu la calibration *in situ* Lautaret pour le système Nikon (mise au point ∞ et diaphragme f/8). Pour le système Canon opérant à Taconnaz, il n'était pas possible d'effectuer une calibration *in situ* vue le nombre trop limité de points de calage, on a donc retenu la calibration réalisée sur le réseau de point de l'IGN en utilisant néanmoins les mêmes conditions d'obturation (f/8). Les résultats sont indiqués au Tableau n°2. La distorsion reste faible pour les optiques retenues (Nikkor 85 mm et Canon EF 100 mm), de l'ordre de quelques microns, soit 1 à 2 pixels. Il s'agit de distorsion en coussinet (négative) typique des objectifs de focale supérieure à 50 mm où

les points sont déplacés vers le centre de symétrie de l'image. Les Figures 9-10 représente cette distorsion en fonction de la distance au centre de symétrie pour l'objectif 85 mm Nikkor modélisée à l'aide du modèle ISPRS (logiciel ORIMA de Leica) et Brown (Poivillers & Etalon de l'IGN) d'après les clichés réalisés sur les mires in-situ (Lautaret, Fig. 7) et le réseau de calibration de l'ENSG (Fig. 8). Le décentrement, de l'ordre de 50-200 μm (10 pixels), n'est par contre pas négligeable et doit être pris en compte dans le modèle des caméras. Les figures 9 et 10 représentent la distorsion radiale identifiée sur le système Nikon en condition *in situ* sur le site Lautaret.

Tableau n°2. Paramètres donnés par la calibration

Caméra & objectif	focale	décentrement x (larg.)	décentrement y (haut.)	distorsion
Nikon D2Xs 85mm	85,51 mm	-66 μm	-46 μm	radiale modèle ISPRS
Canon 5DII 100 mm	99,05 mm	+40 μm	-200 μm	radiale modèle ISPRS

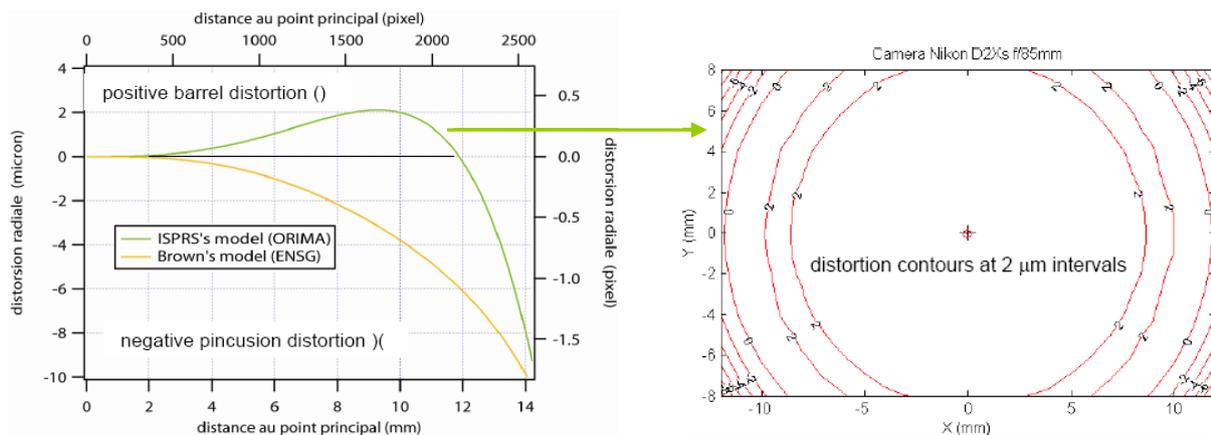


Fig. 9&10. Distorsion radiale du système D2Xs et 85 mm en condition *in situ* au Lautaret : distance de mise au point ∞ et diaphragme à $f/8$.

L'orientation des images sur les points de contrôle est très satisfaisante, les résidus de calage étant très faibles, compris entre 3 et 8 cm au Lautaret, et entre 2 et 11 cm à Taconnaz. Les résultats sont indiqués au Tableau n°3. Dans ces conditions, il est possible d'attendre une précision sur la mesure des points de la surface de terrain de l'ordre de 15 cm au Lautaret et 30 cm à Taconnaz. Nous avons validé ceci sur le site du Lautaret à l'aide de quelques points de contrôle déterminés au sol mais non utilisé pour l'orientation : les coordonnées mesurées ne se sont pas écartées de plus de 5-10 cm des coordonnées obtenus par GPS différentiel (Fig. 13).

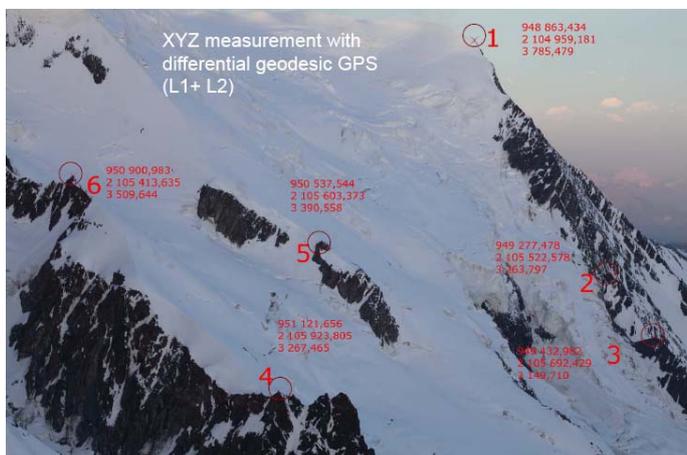


Fig. 11. Points de contrôle à Taconnaz.



Fig. 12. Point naturel de contrôle visé à 2750 m de distance.

Tableau n°3. Résidus d'orientation des images (RMS) : coordonnées métrique terrain σ_{xyz} et image σ_o .

Caméra & objectif	site	σ_x	σ_y	σ_z	σ_o
Nikon D2Xs 85mm	Lautaret	8 cm	3 cm	6 cm	1,1 μm
Canon 5DII 100 mm	Taconnaz	11 cm	11 cm	2 cm	1,97 μm

2.3 Restitution photogrammétrique

La restitution, ou mesure des 3 coordonnées spatiales des points visibles sur les couples d'image, a été effectuée à l'aide du logiciel SIG ArcGis et du module StéréoAnalyst. Il s'agit d'un pointé manuel des points à mesurer, effectué en vision stéréoscopique (3D) à l'aide de lunettes anaglyphes (Fig. 14 et Fig. 16). La restitution des points de la surface de l'objet à restituer (front, surface de l'avalanche, faces visibles du sérac) permet d'obtenir un nuage de points (connus en XYZ). L'interpolation de ces points constitue un modèle numérique de terrain (MNT) représentant l'objet en question. Cette étape a également fait l'objet d'une validation sur le site du Lautaret où l'on dispose d'un MNT indépendant obtenu par laser-scan aéroporté. Un MNT a été ainsi généré à partir du couple d'images (été 2009) dans une zone de dalles rocheuses (Fig. 7). Il a été ensuite comparé au MNT laser. Les résultats de cette comparaison sont très positifs. On n'observe pas de différence systématique entre ces 2 surfaces, ce qui indique un très bon calage relatif des 2 observations. Une dispersion de ± 11 cm sur les points des 2 modèles de surface existe néanmoins et s'explique par les incertitudes aléatoires de mesure de chaque méthode de levé.



Fig. 13. Position du pointeur sur une mire non utilisée pour l'aérotriangulation : le logiciel positionne le pointeur sur la position théorique (obtenue par GPS) à environ 10 cm de la position obtenue par orientation.



Fig. 14. Vues d'un couple de clichés orientés sous ArcGis StéréoAnalyst.

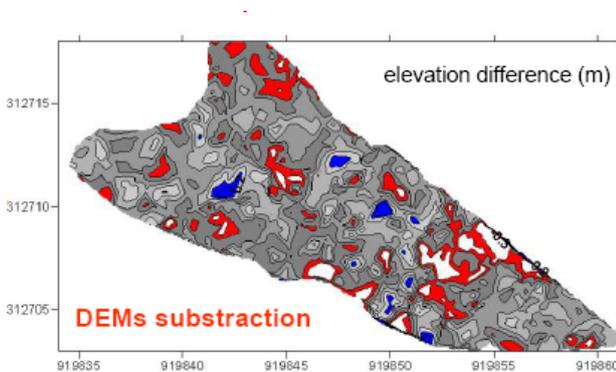


Fig. 15. Différence des MNT obtenus par laserscan et par photogrammétrie (zone rocheuse en Fig. 7) : pas de biais et RMS de ± 11 cm.

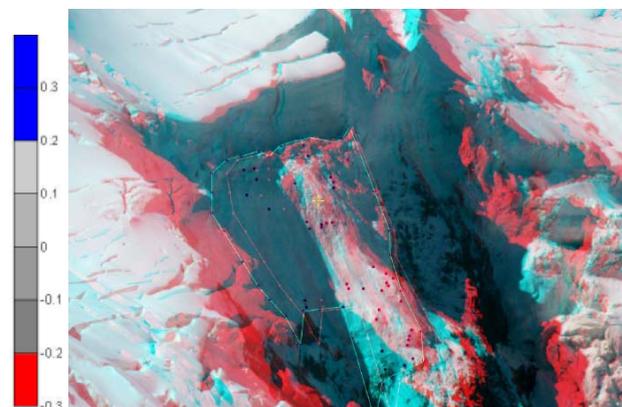


Fig. 16. Vue anaglyphe de la zone de sérac après la chute du 12-13 août 2011.

3. Résultats

Nous illustrons par 2 exemples les résultats obtenus par ces 2 nouveaux systèmes photogrammétriques de terrain.

3.1 Vitesse de front d'une avalanche

Lors du déclenchement artificiel du 2 mars 2010 sur le site expérimental du Lautaret, nous avons pu acquérir une séquence de 17 couples d'images synchronisées. Les paramètres des caméras déterminés lors des calibrations, et l'orientation sur les points de contrôle nous ont permis de restituer les positions de front de l'avalanche (Fig. 17). Ainsi, pour cette avalanche, les vitesses atteignent 18 m/s (65 km/h) dans la section la plus raide du couloir. Elle est essentiellement contrôlée par la pente. La position extrême de l'avalanche (zone d'arrêt) est également cartographiée à partir des images.

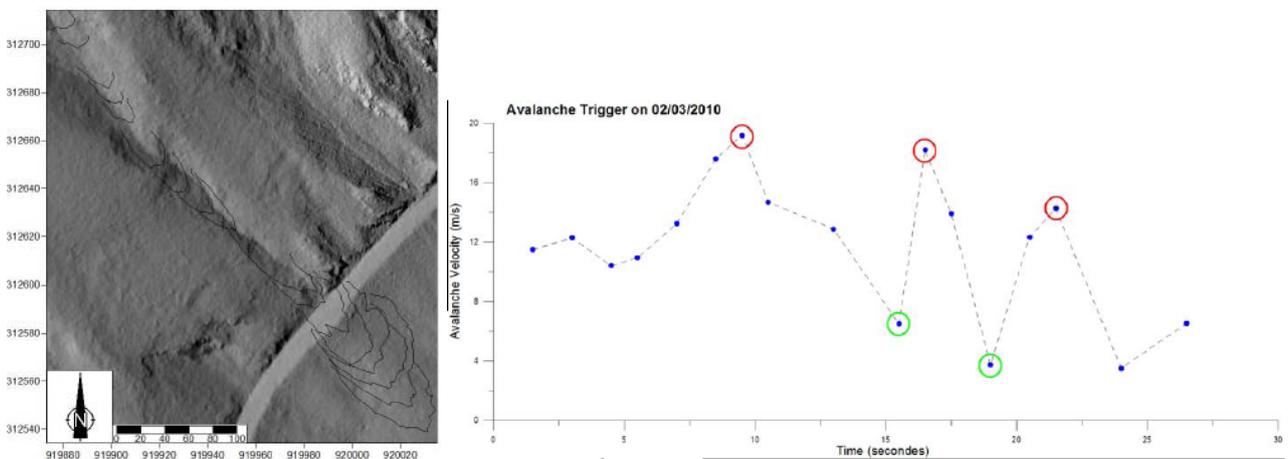


Fig. 17. Positions successives et vitesses du front de l'avalanche du 2 mars 2010

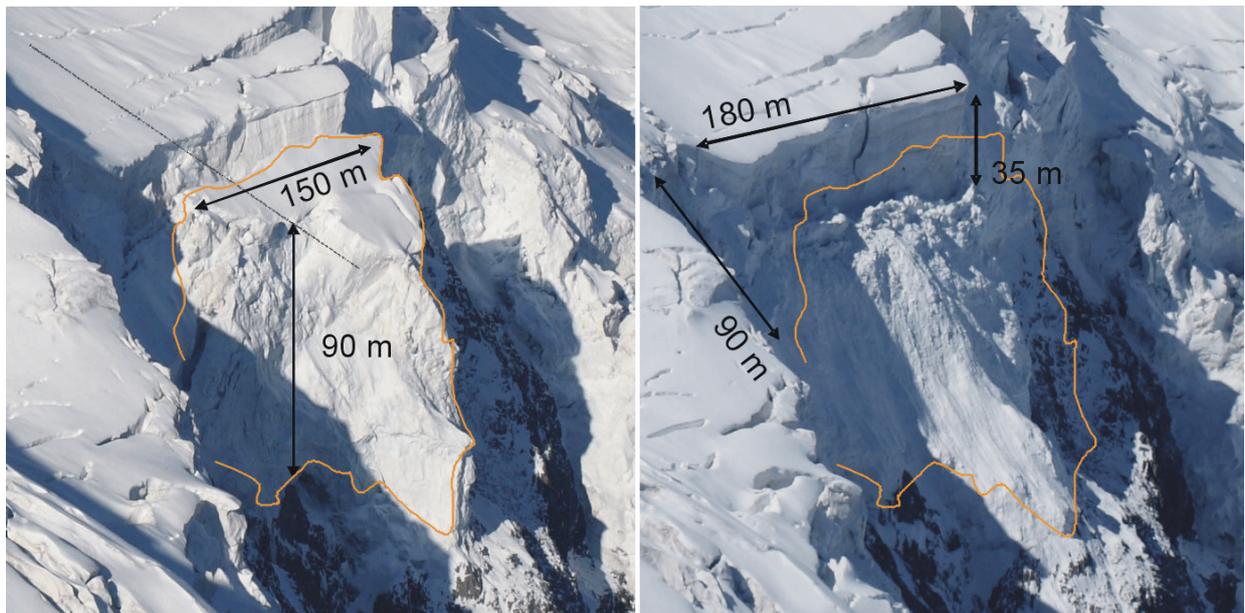


Fig. 18. Sérac avant et après écroulement (nuit du 12 au 13 août 2010)
le volume mesuré par restitution photogrammétrique donne 109 000 m³.

3.2 Volume d'une chute de sérac

L'installation des couples de caméras a été réalisée début juin 2010 après installation d'un seul prototype l'année précédente (de mai à décembre 2009). Le système fonctionne depuis en continu au rythme de 4 à 6 images par jours, et une visite de contrôle-maintenance tous les mois comprenant la récupération des images. Les séquences d'images obtenues ont ainsi permis d'identifier une importante chute de sérac survenue dans la nuit du 12 au 13 août 2010. L'orientation et la restitution d'un couple d'image avant et après cet événement (Fig. 18) a permis de mesurer un volume de $109\,000\text{ m}^3$ pour ce sérac dont les dimensions extrêmes atteignent 120×30 m en surface, et 90 m de hauteur. Une incertitude non négligeable d'environ $15\,000\text{ m}^3$ est associée à cette mesure en raison des parties cachées du sérac (Fig. 18). Nous avons fait l'hypothèse de face cachées verticales. Mais il est très probable que cette hypothèse sous-estime un volume correspondant à des parties inclinées telle qu'elles apparaissent sur les faces visibles depuis les caméras.

4. Conclusions et perspectives

Ce travail a permis de mettre au point 2 systèmes photogrammétriques de terrain, dont un est en fonctionnement opérationnel continu sur un site à risque (Taconnaz). La précision de mesure atteinte est très satisfaisante compte tenu du coût relativement modéré des appareils photographiques (non métrique) utilisés. Sur le site de Taconnaz, ce système devrait permettre d'établir la fréquence (période de retour) correspondant à un seuil de volume de sérac (calage d'une loi statistique de valeurs extrêmes) et d'identifier des signes précurseurs. Au Lautaret, le système photogrammétrique mis au point sera utilisé pour la validation des modèles d'écoulement (taux de reprise de la neige au sol par l'avalanche) et fixer les conditions initiales de volume de neige dans la zone de départ, probablement en association aux levés laser possibles vue la dimension de ce site d'étude.