

Génération de MNT aérienne de petit for au versant instable de

La multiplicité des techniques d'acquisition d'information géométrique à la disposition du géomorphologue, leurs complexités et exigences spécifiques mènent à des choix et des compromis. Nous présentons des résultats obtenus sur le glissement-coulée de Super-Sauze (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence, France). La méthodologie des photographies à basse altitude est le fruit d'un compromis jugé satisfaisant entre coût, précision et lourdeur de mise en oeuvre. Les moyens choisis sont suffisamment légers pour permettre des temps de réponse rapides face à des événements soudains, les outils et méthodes de traitement assez performants pour rivaliser avec les techniques de saisie directe sur le terrain. Le résultat final obtenu est évalué à une précision sub-métrique.



Mots-clés : MNT ; photogrammétrie numérique ; caméra petit format semi-métrique ; modélisation de terrain ; glissement-coulée

Key-words : DEM ; automated digital photogrammetry ; small-format semi-metric camera ; terrain modelling ; earthflow.

Abstract :

Because acquisition techniques of geometrical information on three dimensional objects are numerous, geomorphologist have to make choices and compromises, regarding their specific complexity and requirement. This article presents the results from a project conducted on the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, southeastern France). The low altitude aerial photos methodology comes out a satisfying compromise between cost, accuracy and difficulty of implementation. The selected means are light enough to enable a high reactivity to unexpected events, tools and methods reliable enough to concurrence on field acquisition techniques. The final result is evaluated with a sub-metric accuracy.

par photogrammétrie mat : application Super-Sauze

J.-B. Henry^{1}, P. Grussenmeyer¹,
J.-P. Malet² et O. Maquaire²*

Introduction et problématique

Les techniques de positionnement à différentes échelles de temps et d'espace ont connu d'énormes progrès durant la dernière décennie, notamment dans le domaine de la cartographie, de la représentation 3-D des processus, ou des MNT réalisés par interférométrie radar (Fruneau *et al.*, 1996 ; Mohr *et al.*, 1998), par voie G.P.S. ou par photogrammétrie numérique (Girault, 1992 ; Chandler, 1999 ; Weber et Herrmann, 2000). Ces techniques sont indispensables pour obtenir une représentation conforme du relief. Cette donnée est indispensable à toute analyse, surveillance et modélisation quelle que soit l'échelle d'étude considérée (Goudie, 1990 ; McCullagh, 1998). Les nouvelles solutions sont attrayantes, rapides, utilisables dans tout type de configuration morphologique et fournissent des données aisément intégrables dans des Systèmes d'Information Géographique, à des résolutions allant de la dizaine de mètres au centimètre.

Beaucoup d'études morphologiques ou hydrologiques requièrent aujourd'hui une information 3-D détaillée, spatialisée et souvent à haute résolution, tout d'abord comme conditions aux limites géométriques de modélisation, ensuite comme outil d'analyse de certains processus morphologiques (quantification de volumes par exemple), enfin, comme un moyen simple de visualisation et de manipulation de l'information topographique. Le MNT offre alors de puissantes potentialités en terme d'analyse spatiale.

Selon les objets, objectifs et échelles d'études et selon la qualité et la résolution requises pour la représentation du relief, le géomorphologue dispose de plusieurs techniques pour dériver des MNT : tachéométrie classique, GPS (en mode rapide statique ou en mode cinématique), interférométrie radar pour des échelles supérieures au 1/10000^e (Fruneau *et al.*, 1996 ; Mantovani *et al.*, 1996), scannage laser aéroporté (Lohr, 1998) ou photogrammétrie numérique (terrestre ou aéroportée) à différentes résolutions et échelles. La qualité du MNT dépendra d'informations topographiques acquises avec une haute résolution. Cette dernière doit être distribuée de manière homogène sur toute la zone d'étude et de qualité adaptée à l'échelle spatiale de l'étude. Les développements récents de la photogrammétrie numérique font de cette technique, un outil de plus en plus utilisé, notamment en géomorphologie fluviale (Pyle *et al.*, 1997), pour la quantification des volumes déplacés lors d'avalanche de neige (Ammann, 1999), pour le suivi cartographique de bassins versants et leurs analyses paysagères (Muxart *et al.*, 1988), en modélisation hydrologique (Walker et Willgoose, 1999), pour le suivi de l'évolution de mouvements de terrain (Girault, 1992 ; Weber et Herrmann, 2000), pour la reconstitution du micro-relief et de la rugosité de surface dans les études de ruissellement et d'érosion (Chandler, 1999), ou pour la quantification du recul du trait de côte, la morphologie des plages, ou le suivi du ravinement. La plupart de ces utilisations des MNT conduisent à des informations dérivées (carte des



¹ Laboratoire d'Etudes et de Recherche en Génie Civil de Strasbourg (LERGEC), Equipe Photogrammétrie et Géomatique, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg (ENSAIS), 24, boulevard de la Victoire, F-67000 Strasbourg, France.

* Service Régional de Traitement de l'Image et de Télédétection (SERTIT), Pôle API, Boulevard S. Brandt, F-67400 Illkirch-Graffenstaden, France.

² Centre d'Etudes et de Recherche Eco-Géographique (CEREG), FRE 2399 ULP-CNRS, 3, rue de l'Argonne, F-67083 Strasbourg Cedex, France.

courbes de niveaux, délimitation de zones hypsométriques, carte de pentes, d'ensoleillement, d'intervisibilité, limites de bassins versants) ou à la détermination des déplacements de surface d'un mouvement de terrain (Girault et Memier, 1997).

Si les MNT sont souvent créés à partir des diverses bases de données altimétriques nationales (par exemple, la BDAlti en France) pour des études à l'échelle régionale (en climatologie et hydrologie notamment), la résolution (75 m) et la précision obtenue (2.5 m en altitude) sont insuffisantes dans bien des cas, surtout en région de montagne. A l'échelle d'un bassin versant, la reconstitution photogrammétrique à partir de couples de photographies (type IGN) au 1/30 000^e permet d'atteindre une précision d'environ 3 m en altimétrie et 1 m en planimétrie. Améliorer la résolution spatiale et la précision 3-D du modèle nécessite alors de disposer d'un couple de photographies aériennes verticales, moyen ou petit format, (50x60mm², 24x36mm²...). Une première solution consiste à prendre ces photographies à partir d'un hélicoptère, à une échelle du 1/500^e ou moins, dont le coût d'acquisition peut être rédhibitoire (1 heure de vol coûte environ 1000 Euros). La solution peut alors être de réaliser une mosaïque d'images, pour couvrir une zone large, et/ou du fait de l'utilisation d'appareils photographiques de petit format.

Une seconde solution, moins onéreuse est de réaliser des prises de vue à partir de petits avions ou hélicoptères (drones) télécommandés (Tapponnier *et al.*, 1999) qui permettent d'atteindre de petites parcelles inaccessibles ou dangereuses pour des pilotes, à des altitudes de vol en dessous de 300 m. La restitution du relief, à partir d'une chambre grand ou moyen format, est très fine : de l'ordre du décimètre. Ces avions télécommandés ont néanmoins l'inconvénient de devoir être pilotés à vue, et nécessite de disposer d'une piste d'envol plate située également dans le champ de vision du «pilote», configuration pas forcément facile à trouver en zone de relief, et qui n'offre pas la possibilité de réaliser de mosaïquage sur plusieurs bandes. Les clichés ne peuvent pour l'instant être pris avec recouvrement que sur une seule bande ; la juxtaposition de plusieurs bandes parallèles est difficile à mettre en œuvre et nécessite un GPS sur le drone et des moyens de téléguidage évolués.

Une troisième solution, intermédiaire, consiste à utiliser des chambres de prises de vues de petit format et de réaliser des photographies quasi-verticales à partir d'un avion de tourisme à ailes hautes généralement disponible dans les aéroclubs locaux. Au cours de la dernière décennie, plusieurs expériences de couverture aérienne petit format (35 ou 70 mm) ont été tentées, de manière expérimentale (Graham et Read, 1984) ou opérationnelle. Généralement, un système précis de prise de vue de petit format repose sur une caméra métrique (avec repères de fond de chambre). Néanmoins, des chambres non métriques (sans repères de fond de chambre) peuvent être utilisées en photogrammétrie, bien que leur orientation interne soit complètement ou partiellement inconnue et/ou instable. Par rapport aux chambres métriques, ces dernières présentent les avantages suivants (Karara, 1980) : souplesse dans le choix de la focale, possibilité d'une chambre motorisée qui permet une succession

rapide des prises de vue, taille et poids réduits, maniabilité qui les rend orientables dans toutes les directions, utilisation de films grand public (24x36 mm²), prix. Les inconvénients sont notamment l'absence de repères de fond de chambre (même s'ils peuvent être introduits dans la chambre), l'instabilité de l'orientation interne et les lentilles qui sont généralement optimisées pour une haute résolution au défaut d'une bonne qualité géométrique (d'où des distorsions souvent irrégulières).

La précision d'un MNT est donc impossible à formaliser et ne peut être évaluée que globalement, en fonction du processus photogrammétrique utilisé pour le générer. Les paramètres qui jouent de façon importante sur cette précision sont : l'échelle et la résolution des photographies, la densité des points de contrôle mesurés sur le terrain et la précision du positionnement, la répartition de ces points en fonction du caractère plus ou moins accidenté du terrain (Kraus et Waldhaeusl, 1998). Ces facteurs interdisent donc à l'utilisateur de considérer les altitudes comme «vraies» : il ne s'agit que d'un modèle de la réalité. Toute étude nécessite donc de définir au préalable la précision recherchée, qui guidera le choix de la méthode photogrammétrique employée (ajustement du ratio précision recherchée/coût de la mise en œuvre).

L'objectif de cet article est de proposer la méthodologie employée, en insistant notamment sur les différentes étapes et les points cruciaux de mise en œuvre, à partir d'un appareil photographique classique de petit format, tenu à la main. Après avoir présenté les divers choix matériel (chambre, objectif, films) qui s'offre au géomorphologue et leur influence sur la qualité de la restitution photogrammétrique, nous présenterons le mode opératoire d'acquisition des photographies et les diverses étapes du traitement. La méthode est appliquée à la reconstitution 3-D de l'environnement de la coulée de débris de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France).

Choix du matériel et précision associée

Une grande diversité de matériels photographiques est disponible sur le marché, aussi faut-il considérer leurs caractéristiques en rapport avec la finalité de l'étude engagée. La valeur la plus significative est la focale de l'objectif. Puis, le format du négatif qui va déterminer l'emprise d'un cliché sur le terrain. Enfin, le choix des taux de recouvrements, latéral et longitudinal, va permettre d'accéder aux nombres de clichés nécessaires, à l'intervalle de temps entre deux prises de vues, au nombre de passages...

Sélection de la chambre de prise de vues

Ce premier tableau, qui présente l'influence de la distance focale et du format du film sur les paramètres du vol photographique, démontre l'importance des choix matériels sur la qualité des résultats. Les valeurs sont calculées pour une altitude de vol de 500 mètres au-dessus du terrain, une vitesse de 35 m.s⁻¹ (soit 130 km.h⁻¹) et un recouvrement longitudinal de 70% et transversal de 40%.

Tableau 1. Influence de la focale et du format du film sur les paramètres de vol

Focale	28 mm		50 mm		105 mm	
Format	24x36 mm ²		24x36 mm ²		50x60 mm ²	
Facteur d'échelle	18000		10000		4700	
	Horiz.	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.	Vert.
Base (m)	200	130	110	70	90	75
Distance entre bandes (m)	260	390	145	215	145	170
dT (s)	5.5	< 4	3	2	2.5	2

Ce type d'étude permet de procéder au choix de la focale de l'objectif, du film et de la chambre, en fonction des conditions et contraintes du terrain et du vol. L'équipement doit faire l'objet d'un étalonnage (Figure 1), afin de pouvoir en intégrer les résultats dans les calculs et ainsi réduire leurs influences sur le résultat final.

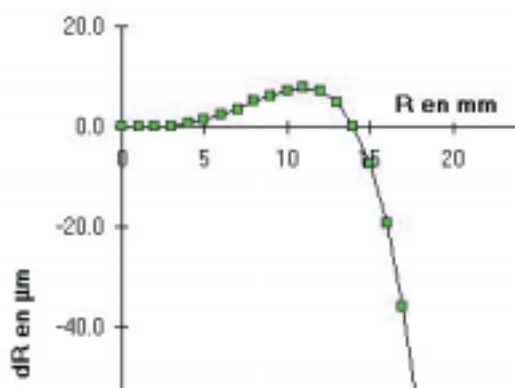


Figure 1. Courbe d'étalonnage de l'objectif utilisé (focale 50 mm)

Cette étape d'étalonnage de la chambre doit naturellement être réalisée le plus finement possible puisqu'elle conditionne la qualité des corrections appliquées aux mesures sur les clichés. Bien que difficiles à quantifier dans l'absolu, les erreurs proviennent essentiellement des erreurs de pointés sur les clichés servant à l'étalonnage. La qualité du procédé et de ses résultats n'est appréciée qu'en fin de calcul par l'appréciation des écarts moyens quadratiques. Les calculs d'étalonnage ont été réalisés avec le logiciel ORIENT, de l'Université technique de Vienne (Autriche).

Contraintes des traitements numériques

Le volume de données générées impose un traitement numérique. Ceci suppose par conséquent une étape de numérisation des photographies qui peut être à la fois difficile (maîtrise et stabilité de la résolution de scannage) et fastidieuse. Le développement de films grand public, au format 24x36, donne également accès au produit Photo CD Kodak. Ainsi, l'étape de développement et de numérisation des films est totalement prise en charge par le prestataire de services, qui garantit une

résolution de 2200 dpi, soit un pixel de 11.55µm. Un tel support de données permet de stocker 100 photographies de 4 à 5 Mo (au format PCD), pour un prix d'environ 70 Euros.

Le traitement photogrammétrique numérique nécessite l'emploi d'un ordinateur équipé d'un logiciel adapté : PHOTOMOD dans notre cas. Le marché du logiciel dans ce domaine comporte un grand nombre de possibilités, dans une gamme de prix assez large, mais nécessitent le respect de certaines contraintes matérielles, en particulier concernant les capacités d'affichage (carte et mémoire vidéo), de stockage (disque dur, CD-ROM...) et de calcul (processeur, mémoire vive). On notera enfin que la mise en œuvre d'un logiciel de photogrammétrie nécessite la bonne adéquation des capacités logicielles avec les exigences du projet.

Mode opératoire et traitements

Le mode opératoire se décompose en deux grandes étapes (la préparation du vol et la prise de vue, puis le traitement photogrammétrique proprement dit) chacune d'elle nécessitant des précautions spécifiques. Comme le traitement photogrammétrique repose sur les méthodes de projection et similitude spatiales, toute erreur, aussi réduite soit elle, peut rapidement engendrer des écarts considérables. Les erreurs propres commises sur chaque étape doivent donc pouvoir être quantifiées.

Préparation du vol photographique : la stéréopréparation.

La réussite d'une mission de prise de vues aériennes va être conditionnée, comme nous l'avons évoqué plus haut, par la qualité de la chambre photographique d'une part, et par la stéréopréparation d'autre part. Pour permettre le calcul, il est nécessaire de placer au sol des balises sur des points localisés par un levé géodésique, tachéométrique ou GPS. La précision et la répartition géographique de ces points de contrôle sur le site sont d'une importance capitale pour l'étape d'aérotriangulation développée plus bas. La difficulté majeure réside dans la possibilité de respecter les valeurs du calcul de préparation du vol. L'emploi d'un récepteur GPS de navigation semble être actuellement la solution la plus adéquate, tant sur le plan de la précision (depuis la levée de l'accès sélectif le 2 mai 2000) que sur le plan des investissements humains et financiers.

Traitements numériques et aérotriangulation par les faisceaux.

L'orientation interne est la première étape de tout traitement photogramétrique. Elle consiste à définir le système de coordonnées du cliché, par rapport auquel seront réalisées les mesures. Ceci est rendu possible grâce aux repères de fonds de chambre. C'est également là qu'interviennent les résultats de l'étalonnage : distorsions radiales, localisation du point principal. Cette définition du système de coordonnées doit se faire à quelques microns près par conséquent, la saisie fine du maximum de repères de fonds de chambre permet d'assurer cette détermination. L'erreur moyenne quadratique (emq) est le meilleur moyen d'apprécier la qualité du travail, et est rarement inférieure à la dimension du pixel.

Les principes de base de la stéréorestitution font apparaître que pour travailler sur un stéréomodèle, il faut disposer d'au moins trois points de calage, déterminés par des méthodes géodésiques. L'aérotriangulation est une extension des méthodes de stéréorestitution, qui permet de restituer de façon globale un bloc de clichés tout en minimisant le nombre de points de calage à déterminer sur le terrain. On peut donc survoler des zones possédant une faible densité de points géodésiques.

La méthode de compensation par les faisceaux repose sur l'utilisation des coordonnées-images comme observations, et sur l'emploi d'une projection centrale (Kraus et Waldhaeusl, 1998). Cette méthode de calcul permet de lier directement les coordonnées-images aux coordonnées-objets, sans passer par les coordonnées-modèles. Elle nécessite un bloc de clichés présentant un recouvrement minimum de 60% en longitudinal, et de 20% en latéral. Elle offre également un avantage considérable puisqu'elle autorise l'introduction dans le calcul de paramètres additionnels, comme par exemple les éléments d'orientation interne, mais aussi des paramètres de déformation de l'image, qui peut provenir non seulement des distorsions de l'objectif utilisé mais également des déformations du film, de diverses anomalies de réfraction ou de toute autre source d'erreur. Par conséquent, on tiendra compte des erreurs systématiques, ce qui est particulièrement important dans le cas de l'utilisation d'une chambre de prises de vues amateur.

La saisie d'aérotriangulation est la plus longue étape d'un tel travail. Le pointé des points de calage (balises) et des points de jonction conditionne la fiabilité du modèle global. Ce calcul de compensation utilise explicitement le principe des moindres carrés. La détection d'erreur est facilitée lorsque la convergence du calcul est obtenue et que les erreurs moyennes quadratiques sur chaque point sont accessibles et exploitables.

Finalement, procéder à un calcul en bloc par la méthode des faisceaux offre l'avantage de fournir un résultat global et homogène sur l'ensemble de la zone couverte. On conditionne ainsi la qualité de la génération du modèle numérique final, résultat de l'union des modèles obtenus à partir de chaque couple. Cette méthode est reconnue comme la plus précise de l'aérotriangulation, mais

aussi comme tout à fait adaptée aux prises de vues amateur. Elle génère malgré tout un gros volume de calculs, nécessitant l'introduction de valeurs approchées, et ne traite que des problèmes tridimensionnels.

Génération des modèles numériques de terrain

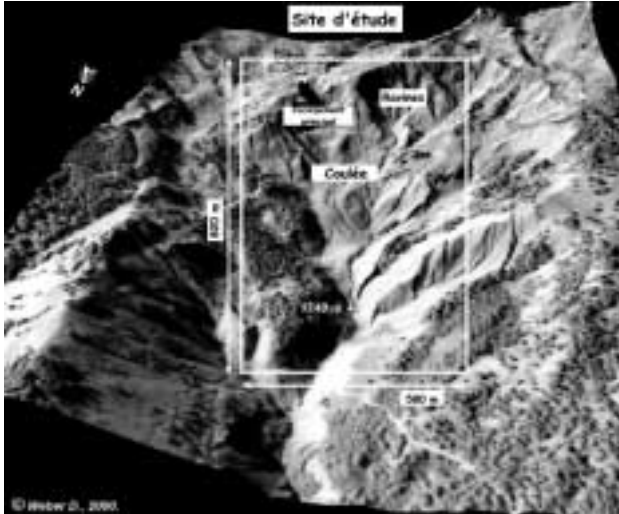
Le succès de l'aérotriangulation permet d'accéder au modèle tridimensionnel, soit en fait, de passer directement des mesures clichés aux coordonnées-terrains. Dès lors, le calcul des modèles numériques de terrain (MNT) est réalisable. Le logiciel travaille par corrélation d'image sur les clichés de chaque couple, à partir d'une grille dont l'équidistance est fixée par l'utilisateur.

L'algorithme de corrélation se base sur les niveaux de gris observés dans une matrice de recherche. En choisissant un seuil minimal de corrélation, l'utilisateur détermine la sensibilité de la saisie automatique de points. Ainsi est-il possible de disposer rapidement d'un semis de points dense, permettant l'interpolation d'un modèle numérique complet, même si la saisie manuelle de points est souvent nécessaire dans les zones de faibles niveaux de détails ou de radiométrie réduite. De même, là où les points de calage ou de jonction sont peu nombreux, on constate souvent des corrélations aberrantes, et par conséquent, des erreurs sur les déterminations altimétriques. Plusieurs méthodes de génération de MNT existent mais dans un cas comme celui-ci, il est intéressant de forcer la détermination par interpolation de points afin de pallier aux échecs de l'algorithme de corrélation.

Application à un site contraignant : la coulée de débris de Super-Sauze et son environnement

Le site d'étude

Le glissement-coulée de Super-Sauze (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence, France) se développe dans un bassin torrentiel marneux encaissé (marnes noires callovo-oxfordiennes) et raviné en badlands. Il se situe entre 2105 m d'altitude (couronne) et 1740 m d'altitude (pied de la coulée), pour une pente moyenne qui atteint 25°. Le glissement-coulée couvre une surface de 17 ha. Historiquement, si aucun désordre n'affecte le secteur dans les années 1950, des chutes de blocs se produisent dans les années 1960, accompagnant les glissements structuraux de grands panneaux et la formation d'une coulée de débris qui fossilise un chenal d'écoulement. Cette période marque le début d'un mouvement généralisé de tout le versant et la progression (reconstituée par photo-intéprétations multidates - Weber et Herrmann, 2000-) du front de la coulée vers l'aval sur plus de 180 m depuis 1982. Les investigations géotechniques et les mesures de déplacements en profondeur par inclinomètres (Flageollet *et al.*, 2000) et les prospections géophysiques (Schmutz *et al.*, 1999) indiquent que la coulée fossilise une paléotopographie intacte (Flageollet *et al.*, 2000) constituée d'une succes-



sion d'échines et de ravines parallèles.

Figure 2. Le site d'étude : le bassin torrentiel de Super Sauze

Afin de déterminer la dynamique d'écoulement et de valider des modèles de propagation de ce type de coulée, un réseau de surveillance a été mis en place et complété progressivement, avec notamment des mesures en continu des déplacements par GPS (Malet *et al.*, 2000) et par extensométrie pour affiner les relations entre les différents paramètres, en particulier, vérifier le rôle, des brusques et furtives remontées de nappe, dans la dynamique de la coulée. La modélisation hydrodynamique et géomécanique de ce type de phénomène nécessite de disposer d'une représentation précise du relief de la coulée mais également de son environnement : un MNT de la coulée a été réalisé en 1999 par tachéométrie à une résolution de 1 m et une précision inférieure à 5 cm. Pour l'environnement immédiat de la coulée (Figure 2), la superficie (0.75 km²) et la morphologie très incisée et escarpée (ravines et échines) ne permettent pas de réaliser un levé rapide par tachéométrie (nécessité de plusieurs stations), ou bien par GPS (masques, pentes du terrain). La photogrammétrie numérique s'est donc présentée comme la seule solution, d'autant qu'elle permet d'obtenir une photographie de la zone d'étude. L'objectif de précision fixée pour le MNT de l'environnement de la coulée était de 30 cm en planimétrie et de 50 cm en altitude. Cette précision a guidé le choix des différents paramètres de vol et de l'objectif.

Les choix.

Le calcul des différents paramètres de vol, nous a amené à employer une chambre RICOH semi-métrique (dotée de repères de fonds de chambre) équipée d'un objectif standard de focale 50 mm. Le choix de la chambre semi-métrique a notamment été guidé par la volonté de disposer de la motorisation de l'avancée de pellicule. Les valeurs des paramètres de vol sont rappelées ci-dessous :

- Altitude de vol relative : 500 m
- Vitesse : 130 km.h⁻¹, ou 35 m.s⁻¹
- Temps entre prise de vues : 3 s
- Base : 110 m

- Distance entre axes : 145 m
- Facteur d'échelle moyen : 10000

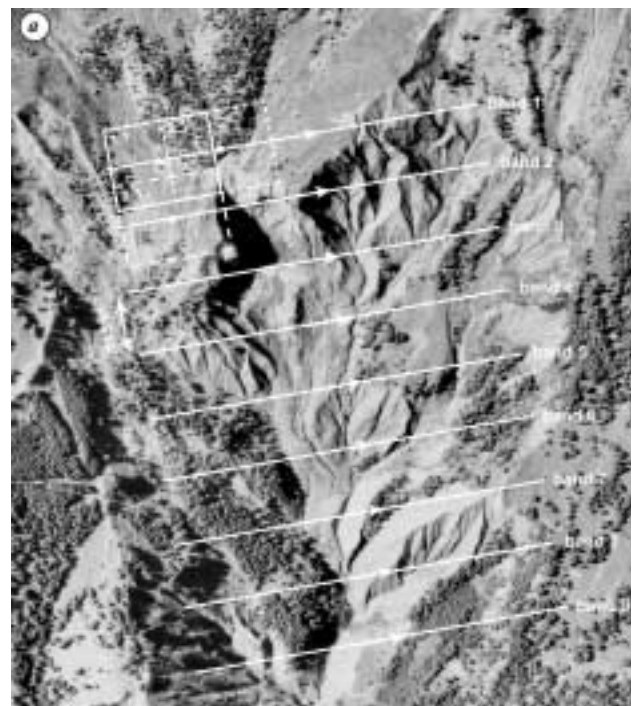
Les balises ont été réalisées dans des plaques cartonnées de 50x50cm² (Gross, 1998). En plus de leur taille, il a fallu prendre garde à leur couleur. Les balises devaient être visibles tant sur la coulée (gris-noir) que sur son pourtour (vert). Nous avons donc choisi de combiner rouge et jaune, en prenant soin de les orienter toutes dans la même direction de façon à permettre le pointé du centre sans ambiguïté au cas où une couleur serait invisible. Finalement, seul le rouge est vraiment apparu de façon très nette. Au total, sur l'ensemble de la zone (environ 1500 m par 500m) une soixantaine de balises ont été disposées.

Résultats de l'aérotiangulation.

Les résultats d'aérotiangulation sont de qualité moyenne, bien que particulièrement satisfaisants pour les moyens mis en œuvre. On constate que sur les bords du modèle, c'est-à-dire sur les premiers et derniers clichés de chaque bande, la prépondérance de points de jonction sur les points de calage semble être à l'origine de la dérive du modèle. La conséquence est alors l'augmentation de l'erreur moyenne quadratique globale σ_0 .

$$\begin{aligned} \sigma_0^x &= 1,29 \text{ m} \\ \sigma_0^y &= 1,75 \text{ m} \\ \sigma_0^z &= 1,34 \text{ m} \end{aligned}$$

D'autre part, le calcul fournit les données d'orientation externe (position et attitude de la chambre de prise de vues pour chaque cliché). On constate de grandes incertitudes sur leurs déterminations, provenant de la difficulté de fournir des valeurs approchées au calcul. L'emploi du GPS ressort à nouveau comme une nécessité, avec comme propos principal de fournir des valeurs approchées fiables. La figure 3 montre la position des lignes de vol et un exemple de cliché (avec quatre repères de fond de chambre Ai, Bi, Ci, Di).



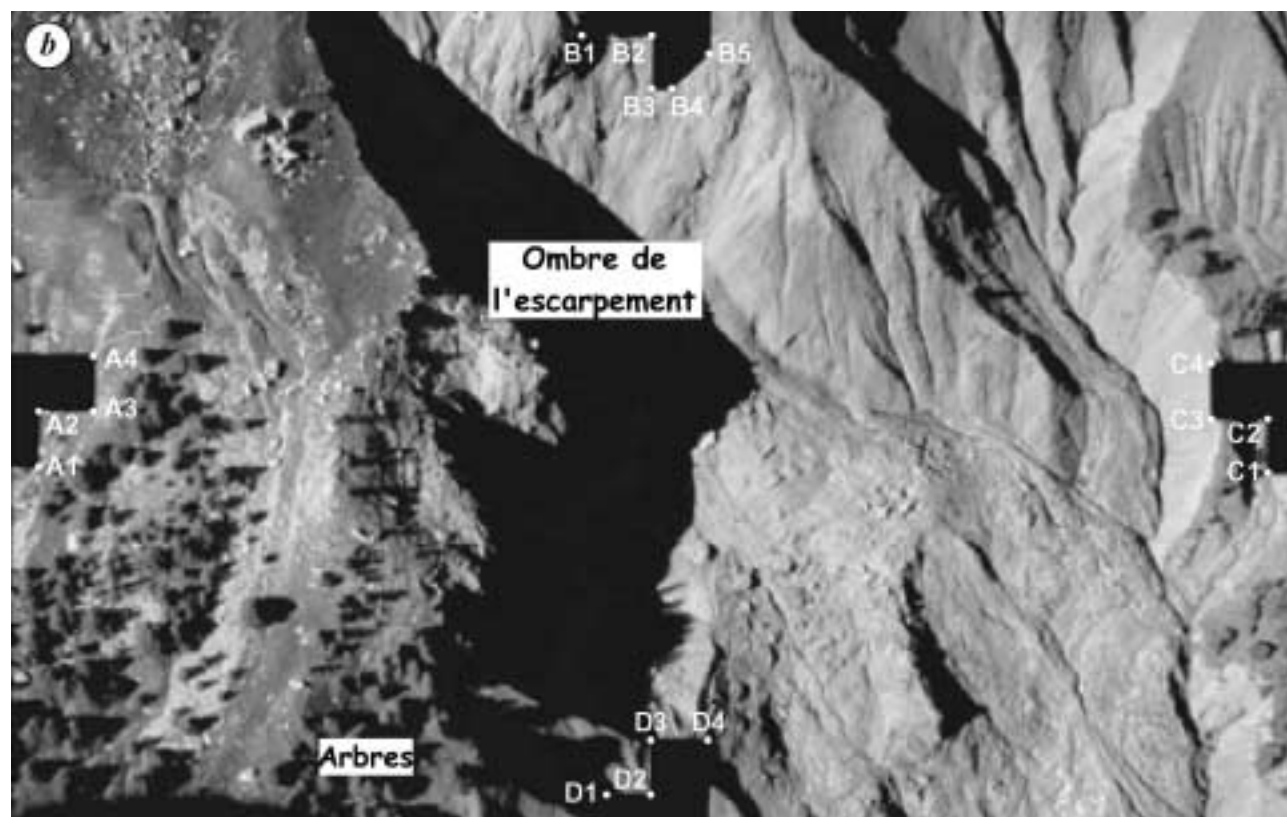


Figure 3. Lignes de vol (a) et un cliché (b) de la bande 3
La précision relative du MNT.

La qualité de la génération totalement automatique des modèles numériques de terrain n'a pas été celle escomptée. La visualisation stéréoscopique des courbes de niveaux dérivées en surimposition sur les clichés a montré de multiples zones où les courbes 'décollaient' de la surface du terrain. L'interpolation a donc été complétée par des saisies manuelles et l'importation de données issues de levés tachéométriques. Finalement, dans les zones de recouvrement entre semis d'origine topographique et semis d'origine photogrammétrique, on constate des écarts d'environ 50cm. Par conséquent, l'ensemble de la restitution et des MNT est évaluée à une précision sub-métrique.

Compte tenu de l'échelle des clichés et de la morphologie de la zone d'étude, le modèle global est généré à partir de chaque couple de clichés, auquel est appliquée une grille d'interpolation de 50x50 points. Ce modèle est finalement constitué de :

- 2500 points
- 7200 cotés
- 4800 triangles

La nature particulièrement chaotique de la zone d'expéri-

mentation pousse à considérer les écarts entre MNT photogrammétrique et tachéométrique selon des critères régionaux plus restreints (Figures 4 et 5).

Chacune des zones (tableau 2) met en évidence les problèmes majeurs que peut rencontrer l'expérimentateur dans ce type d'environnement. Le plus gênant pour les traitements photogrammétriques est très certainement l'ombre des éléments morphologiques importants : celle de l'escarpement principal masque une zone étendue à son pied. Les arbres sur les versants créent des éléments dits en sursol qui font dériver le modèle numérique de terrain.

Discussion : stratégies et précautions à prendre

Les techniques photogrammétriques sont tout à fait adéquates pour la génération de MNT de précision sur de larges surfaces, pour le suivi dynamique ou encore, pour le suivi de la topographie d'entités géophysiques (glaciers, avalanches, mouvements de terrain, dunes, rivières...). La méthodologie présentée, basée sur l'emploi de photographies aériennes de petit format, présente l'avantage d'être peu coûteuse (hormis le prix du logiciel de photogrammétrie), rapidement mobilisable, et donc, opérationnelle. Le

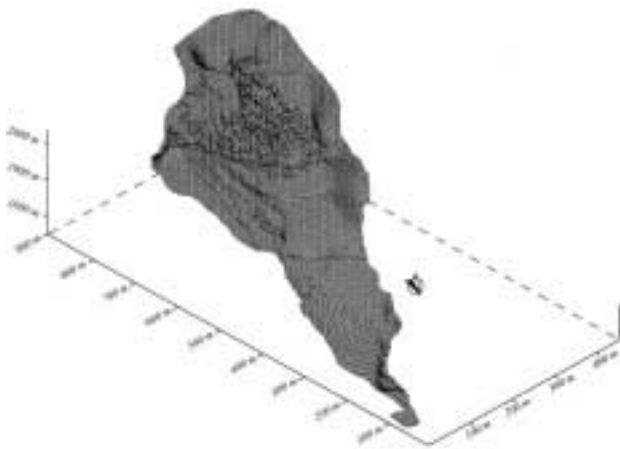
Tableau 2. Résultats sur différentes zones morphologiques caractéristiques de la coulée.

Région	Moyennes des écarts en Z	Ecarts-types (Z)
A. Escarpement principal	+41.3 cm	14.0 cm
B. Ravines	+46.7 cm	9.2 cm
C. Surfaces planes (pente < 10°)	+7.8 cm	4.2 cm
D. Surfaces inclinées (pente > 10°)	-8.2 cm	11.4 cm

géomorphologue dispose alors d'une capacité de réaction et de production d'information très élevée (caméra amateur, objectifs et films grand public, avion sans équipements matériels spécifiques), essentielle lorsqu'il s'agit d'évaluer rapidement les conséquences d'un événement ponctuel. Le lecteur notera d'ailleurs qu'en France, ces méthodes de couverture photographique rapide sont exploitées par les services déconcentrés de l'État pour la cartographie des champs de crues, le levé des laisses de hautes eaux, etc.

Concernant la réalisation pratique des clichés, il semble important de rappeler l'influence de l'heure de vol. Dans des zones boisées, ou à fort relief, l'élévation du soleil va conditionner l'emprise des ombres. Le vol à midi solaire apparaît alors comme une nécessité. D'autre part, l'emploi d'un récepteur GPS de navigation est apparu nécessaire d'une part, au cours du vol pour pouvoir disposer de valeurs approchées fiables de la position de chaque cliché, mais également au cours de la stéréopréparation pour assurer une bonne homogénéité dans la disposition des balises.

Pour conclure, le géomorphologue se doit de prendre conscience de la multiplicité des sources d'erreur qui doivent être prises en compte. La gamme de variation est extrêmement large : du micromètre pour l'orientation interne à la dizaine de mètres pour les erreurs de corrélation dans la génération du MNT. Par conséquent, il semble



capital d'être pleinement conscient de ces ordres de grandeurs, afin de ne pas demander au résultat final plus de précision qu'il ne peut en fournir. ●

Figure 4. Représentation du MNT obtenu par voie photogrammétrique

Remerciements

Ce programme a été financé par le CNRS dans le cadre du contrat PNRN 97/99-34MT de l'INSU. Les auteurs tiennent à remercier J.-A. Quessette, de CHS Carto France, pour ses conseils lors du traitement des données et la mise à disposition du module d'aérotriangulation du logiciel PHOTOMOD.

Bibliographie

Ammann, W.J. 1999. A new Swiss test-site for avalanche experiments in the Vallée de la Sionne (Valais). *Cold*

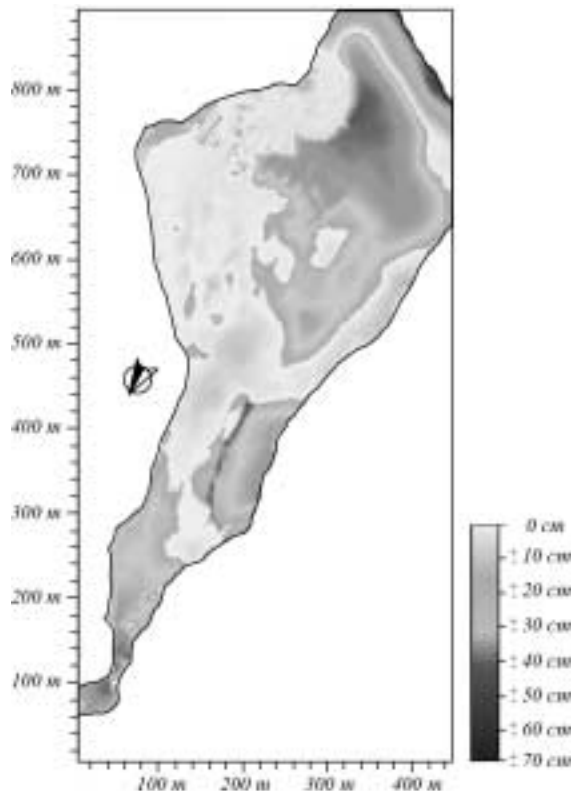


Figure 5. Carte des différences entre MNT photogrammétrique et tachéométrique

Regions Science and Technology 30 : 3-11.

Chandler, J. 1999. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms* 24 : 51-63.

Flageollet, J.-C., Malet, J.-P. and Maquaire, O. 2000. The 3-D structure of the Super-Sauze earthflow : a first stage towards modelling its behaviour, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B* 25(9) : 785-791.

Fruneau, B., Achache, J. and Delacourt, C. 1996. Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry, *Tectonophysics* 265 : 181-190.

Galisson L. 1997. *Auscultation topométrique du glissement de terrain de Barcelonnette par tachéométrie et GPS*, Rapport de Stage Ensis.

Girault, F. 1992. *Auscultation de versants instables par imagerie numérique*. Thèse Ingénieur CNAM, Paris, 193 pp.

Girault, F. and Memier M., 1997. Quelle photogrammétrie pour l'auscultation de versants instables ?, *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 145 : 24-32.

Goudie, A. (Ed.). 1990. *Geomorphological Techniques*, British Geomorphological Research Group, 570 pp.

Graham, R.W. and Read, R.E. 1984. Small format aerial surveys from light and microlight platforms. *Journal of Photographic Science* 32(3) : 100-110.

Gross Q. 1998. *Photogrammétrie aérienne de petit format (essai pour la réalisation d'un modèle numérique de terrain)*, Rapport de Stage Ensis, 44 p.

Henry, J.-B., 1999. *Réalisation d'un modèle numérique du glissement-coulée de Super-Sauze par photogrammétrie aérienne de petit format*, Rapport de Stage Ensis, 58 p.

Karara, H.M. 1980. "Non-metric cameras", in Atkinson, K.N. (Ed.), *Developments in Close Range Photogrammetry*, Applied Science Publishers, London, 63-80.

Kraus, K. and Waldhaeusl, P. 1998. *Manuel de photogrammétrie*, Traduction de P. Grussenmeyer et O. Reis, Editions Hermès Paris, 407 p.

Lohr, U. 1998. "Digital elevation models by laser scanning", *Photogrammetric Record*, 16(91) : 105-109.

Malet, J.-P., Hartig, S., Calais, E. and Maquaire, O. 2000. Apport du GPS au suivi en continu des mouvements de terrain. Application au glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences* 331 : 175-182.

Mantovani, F., Soeters, R. and van Westen, C.J. 1996. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe, *Geomorphology* 15 : 213-225.

McCullagh, M.J. 1998. "Quality, use and visualization in terrain modelling", in Lane, S.N., Richards, K.S. and Chandler J.H. (Eds.), *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*, Wiley, Chichester, 95-117.

Mohr, J.J., Reeh, N. and Madsen, S.N. 1998. Three dimensional glacial flow and surface elevation measured with radar interferometry, *Nature* 391(6664) : 273-276.

Muxart, T., Egels, Y., Pirot, F., Rollin, A., Billard A. and Cosandey, C. 1998. Utilisation de la photogrammétrie et des modèles numériques de terrain dans le suivi cartographique de la dynamique physique des bassins-versants de l'Airette dans la montagne du Lingas (France), *Etudes Méditerranéennes* 12 : 35-44.

Pyle, C.J., Chandler, J.H. and Richards, K.S. 1997. Digital photogrammetric monitoring of river bank erosion. *Photogrammetric Record* 15 : 753-764.

Schmutz, M., Guérin, R., Maquaire, O., Descloîtres, M., Schott, J.-J. and Albouy, Y. 1999. Apport de l'association des méthodes TDEM et électrique pour la connaissance de la structure du glissement-coulée de Super-Sauze, *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences* 328 : 797-800.

Tapponnier P., de Voogd, B. and Hirn, A. 1999. Géologues et sismologues au Tibet, *Sciences Actualités* 99(9) : 104-126.

Walker, J.-P. and Willgoose, G.R. 1999. On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology, *Water Resources Research* 35(7) : 2259-2268.

Webb, E.K. Simulation of braided channel topology and topography. *Water Resources Research* 31(10) : 2603-2611.

Weber, D. and Herrmann, A. 2000. Reconstitution de l'évolution géomorphologique de versants instables par photogrammétrie numérique : l'exemple du glissement de terrain de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Bulletin de la Société Géologique de France*.