

Contribution de la photogrammétrie numérique à l'étude spatio-temporelle de versants instables : l'exemple du glissement de terrain de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France)

DOMINIQUE WEBER¹ et AGNÈS HERRMANN²

Mots clés. – Mouvement de terrain, « Terres Noires », Barcelonnette, Photogrammétrie numérique, MNT, Évolution géomorphologique.

Résumé. – Les développements récents en matière de traitements d'images et de photogrammétrie numérique offrent aux géomorphologues des outils de plus en plus accessibles et performants pour la connaissance spatio-temporelle des mouvements de terrain. Une démarche fondée sur ces techniques a été mise en œuvre pour reconstituer l'évolution historique d'un glissement de terrain complexe de type glissement-coulée qui s'est développé dans les « Terres Noires » du bassin de Barcelonnette. L'environnement lithologique et morphologique du site étudié est caractéristique de l'ensemble des Préalpes françaises du sud où affleurent sur de grandes étendues des formations marneuses du Jurassique. Six modèles numériques de terrain générés à partir de couples stéréoscopiques de photographies aériennes ainsi que diverses ortho-images et des vues perspectives permettent de suivre l'évolution morphologique du versant instable depuis les années 1950, avant le déclenchement du mouvement de terrain, jusqu'à nos jours. En dehors des descriptions multitemporelles des paysages et des processus morphologiques survenus sur ce site, la méthode utilisée se révèle particulièrement utile dans l'analyse quantitative des instabilités. Elle constitue notamment un outil performant de reconstitution de la géométrie tridimensionnelle du mouvement de terrain et donc du volume des matériaux mobilisés.

Contribution of digital photogrammetry in spatio-temporal knowledge of unstable slopes : the example of the Super-Sauze landslide (Alpes-de-Haute-Provence, France)

Key words. – Landslide, "Terres Noires", Barcelonnette, Digital photogrammetry, D.E.M., Geomorphological evolution.

Abstract. – Recent developments in image processing and digital photogrammetry offer to the geomorphologists increasingly accessible and effective tools for the spatio-temporal knowledge of landslides. These techniques were used to reconstitute the historical evolution of a complex flow slide occurring in the "Terres Noires" of the Barcelonnette basin. The lithological and morphological environment of the studied site is characteristic of the whole southern French Prealps where are largely present Jurassic marly formations. Six digital elevation models (D.E.M.) generated from stereoscopic couples of aerial photography, but also various ortho-images and perspective views, allow to follow the morphological evolution of the unstable slope since the years 1950's – before the releasing of the landslide – until our days. Besides multitemporal descriptions of the landscape and of the morphological processes occurred on this site, the implemented method appears particularly useful for the quantitative analysis of the instabilities. It appears notably as a powerful tool for the 3-D reconstruction of the landslide geometry and by the same occasion for the calculation of its volume.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction

Among all the listed, classified and precisely defined landslides [Dikau *et al.*, 1996], flow-slides constitute a particular type whose complexity still raises a certain number of interrogations for the geomorphologists who attempt to model their behaviour in order to foresee their evolution. One of the main difficulties rests upon understanding these unstable masses from two points of view, both spatial and temporal. The unstable site of Super-Sauze (Alpes de Haute-Provence, France) is for many years under a multidisciplinary study in order to acquire a precise and detailed knowledge of the morphological evolution, the three-dimensional structure and the mechanical behaviour of such a complex flowslide which occurred in the « Terres Noires » of the Barcelonnette basin (fig. 1). In this framework, the objective of the digital photogrammetry processing put forward in this paper is to follow the geomorphological evolution of the Super-Sauze slope since the 1950's, before the current landslide event occurred, up until present day. This original approach illustrates perfectly the contribution of an increasingly effective and accessible digital photogrammetry method for the historical spatio-temporal knowledge of landscapes, the main interest being the quantitative interpretation of the morphological phenomena.

The study site

The whole Barcelonnette basin is known for its numerous slope instabilities and others geomorphological hazards [Légier, 1977; Weber, 1994; Flageollet *et al.*, 1996a]. These can notably be explained by a high climatic aggressiveness (alternation of intensive rain storms and dry periods specific to the sub-Mediterranean mountainous climate of this region) easily eroding the very sensitive lithological formation of the « Terres Noires » [Artru, 1972; Awongo, 1985; Buffalo, 1989; Phan, 1993]. Indeed, this autochthonous basement of Callovo-Oxfordian black marls appears largely in the wide-open Barcelonnette geological window through various allochthonous resistant rocks belonging to the Embrunais-Ubaye thrust sheets. A large part of the basin is also covered by morainic deposits often involved in slope instabilities. In this specific lithological and morphological context, seen over much of the southern French Alps [Olivry and Hoorelbeck, 1990; Lhénaff *et al.*, 1993; Antoine *et al.*, 1995; Cemagref, 1995], the studied landslide occurred in a deeply eroded 90 ha badlands area, locally called « Roubines », of the Sauze torrent catchment (fig. 2).

1. Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques (CEREG), EP 2037 CNRS, Centre Européen sur les Risques Géomorphologiques (CERG) 3, rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg cedex. Tél. : 03.88.45.64.48 / Fax : 03.88.41.13.59 / E-mail : weber@geographie.u-strasbg.fr
2. Service Régional de Traitement d'Images et de Télédétection (SERTIT), boulevard Sébastien-Brant, 67400 Illkirch-Graffenstaden.
Manuscrit reçu le 21 mai 1999; accepté après révision le 4 mai 2000.

The digital photogrammetry method

Stereoscopic couples of aerial photography from 1956, 1971, 1978, 1982, 1988 and 1995 were used to produce six Digital Elevation Models (D.E.M.) and complementary derived products in terms of ortho-images and perspective-views (fig. 3). This treatment was realised with the photogrammetric pack Orthomax[®] from the image processing software Imagine[®] – Erdas[™].

In the first stage of the processing, the initial digital pictures were all generated at the same ground resolution of 1m. The D.E.M. calculations from digital stereoscopic couples needs to dispose of two types of complementary information : the optical characteristics of the different cameras used and the precise geographical co-ordinates of a set of connecting points defined in the study area. The triangulation operation based on this information consists in the calculation of mathematical equations linking the real geodetic co-ordinates of the référence points in the field to their co-ordinates on the pictures. These points have been established in this study on a 1/25 000 scale topographic map with an accuracy estimated at ± 10 m in plan and ± 3 m in altitude. In spite of this relative lack of precision, the results are satisfying as the residuals on the different connecting points are around 2 to 3 m in plan and less than 1m in altitude (the lower quality of the initial 1956 pictures and the bad internal orientation of the D.E.M. explain the higher residuals – about 7 m in plan – for this year).

The D.E.M. calculation is based on the numerical correlation of the two pictures of a stereoscopic set. This operation systematically associates the homologous points of the two pictures, determines the parallax and deduces the elevation of the point. Correlation errors, particularly frequent in homogeneous zones without sufficient textures or contrasts (i.e. with low contrast radiometric values as for example shaded areas or snow-covered terrain), involve different anomalies (peaks or hollows) in the calculated relief. The number of correlation errors is also linked to the resolution of the models and a compromise has to be established between high resolution with strong correlation noise and low resolution lacking morphological details. The six D.E.M.s have been calculated with a resolution of 15 m. Even for such a relatively coarse resolution, the number of altimetric aberrations is not insignificant.

For corrections, the Orthomax[®] professional pack allows the visualisation in relief (on the computer screen) of a couple of images (the stereopair) with the help of liquid crystals glasses. Each image of the couple is displayed on the screen with a frequency of 120 Hertz and each eye is alternatively masked by the same frequency. Thus, the left eye sees only the left image and the right only the right, and this occurs 60 times per second. The fusion of the pictures instinctively made by the brain allows the perception of the relief. Knots of the D.E.M. are then superposed to this topographical representation and a publishing utilitarian authorizes their manual displacement (in altitude only) in order to overlay them with the visualized terrain. For the six D.E.M.s generated in this study, the percentage of points manually readjusted varies between 3 and 11 % of the 8881 points of each model.

The comparisons of the different calculated topographies imply also a rigorous geometrical superimposition of the six models. This was done *a posteriori* with the help of an *in situ* G.P.S. (Global Positioning System) measurement campaign that provided very precise geodetic co-ordinates of about ten reference points clearly visible on all the pictures, presumed stable and well distributed over the whole study area.

Geomorphological results : spatio-temporal analysis of the unstable slope

The multi-temporal comparisons of the landscapes are not only visual and qualitative, but also quantitative : the 1m resolution ortho-photographs permit in the first instance very precise planimetric measurements like the backward recession of the main scarp, the displacements of morainic blocks, or the extension of the flow and notably the forward movement of its toe; the observations from the 15m resolution elevation models remain coarser but permit for all that the identification of the significant morphological events which occurred on the slope. The most important failures are detected in this way in the upper part of the slope between 1971 and 1982, whilst the flow of the accumulated material in the thalweg can be followed from 1978 onwards. The relief inversion between ablation and accumulation zones is clearly brought out by the subtraction image between 1956 and 1995 D.E.M., and by the multi-temporal topographic profiles extracted along longitudinal cross-sections (fig. 4). For the whole 80 000 m² of the landslide body, the cross-checking of the quantitative photogrammetric analyses with information provided by heavy geotechnical investigations [Flageollet *et al.*, 1996b] gives a global volume of reworked material of about 650 000 m³.

The different illustrations proposed show the morphological evolution of the Super-Sauze « Roubines » slope in the second part of the XXth century extremely well (fig. 5 and 6). In 1956, the site presents a characteristic badlands landscape of the Barcelonnette basin. One of the ravines, significantly more developed than the others which are just beyond the rock glacier, already deeply erodes the moraine covering the upper part of the slope. In 1971, several small surficial movements affecting this morainic material provoked an initial partial filling of some of the gullies. Between 1971 and 1978, an important rockfall was detected, and at the same time some very fluid mudflows developed from this collapsed material. The short period between 1978-1982 is marked by a second set of very important failures which occurred in the "Terres Noires" and the displaced rock volumes form a large accumulation zone at the foot of the main scarp. A part of this reworked material is immediately mobilized by mudflows progressively recovering the initial relief. Six years later, in 1988, the foot of the flow moved about 180m forward in the initial main thalweg, i.e. with an average speed of 30 m/year. Between 1988 and 1995, the progression was only about 10 m. The total length of the landslide, from the top of the crown to the toe of the flow, is at present about 800m with a maximum width of about 200 m and a minimum width of 10 m only at the toe. In fact, the downward extension of the earthflow is blocked by the morphological environment since the foot is deeply embanked in a narrow thalweg between two steep lateral slopes. But, at the same time it can be observed that the slope of the toe becomes steeper under the pressure of the moving material. These observations are confirmed by more precise topometrical measurements made *in situ* since 1991. The two 1982 and 1995 curves of topographical profile C-D (fig. 4 and 5) show perfectly the emptying of the upper part of the flow increasing the length and thickness of the inferior section.

The photographs do not allow the detection of significant mass movements around the crown between 1982 and 1995, but regular field observations made during the last ten years have revealed different types of small gravity processes. On the whole, between 1971 (the date on which the first failure can be identified with certainty) and 1995, the maximum recession of the main scarp is about 40 m in the section nearest to the rock glacier and the spring. Even if the extension of the scarp slowed down during the last two decades after the important movements observed in the 1970's and at the beginning of the 1980's, the morphological and litho-structural configuration of the site makes foresee a continuation of its recession. The conditions of the flowslide itself could, therefore, be rapidly modified, in a few years or decades, when it will begin to mobilise numerous blocks of the rock glacier and, above all, when the scarp will reach the spring.

Conclusions

The photogrammetrical numerical multi-temporal approach signifies a very important contribution to the comprehension of the triggering and extension mechanisms of the Super-Sauze landslide. This process permits not only the visualisation of some stages of the morphological evolution on this site, but participates particularly effectively, through the quantitative exploitation of numerical data produced, to the identification of the ablation and accumulation zones, to the reconstruction of the fossilised paleotopography, and consequently to the estimation of the mobilised rock volume. All the results obtained to this day on this test-site, including those presented in this paper, permit the establishment of a good conceptual model of the functioning and the behaviour of this type of landslide [Weber, 2000] and to use this to understand why and how the mass movements can be triggered on similar gully slopes within the southern French Alps. They also indicate a hypothesis about the future of such a type of earth movement.

From a more general methodological point of view, the applied procedure can be extended to numerous other land management problems linked to landscape evolution. By simple descriptive observations or by more sophisticated quantitative analyses, the figures produced with this method represent interesting and powerful communication tools, notably in relation to interlocutors non experts in earth surface processes.

INTRODUCTION

Parmi tous les types de mouvements de terrains répertoriés, classifiés et définis avec précision [Dikau *et al.*, 1996], les glissements-coulées constituent un ensemble particulier dont la complexité soulève encore, du fait même de leur dualité, un certain nombre d'interrogations. Une des difficultés majeures de l'étude de ces masses instables est la nécessité de leur connaissance approfondie d'un double point de vue, à la fois spatial et temporel. Le site instable de Super-Sauze (Alpes de Haute-Provence, France) fait l'objet depuis plusieurs années de diverses études pluridisciplinaires visant à acquérir une connaissance précise et détaillée de l'évolution, du comportement et de la structure tridimensionnelle d'un mouvement de terrain de ce type qui s'est développé dans les « Terres Noires » du bassin de Barcelonnette. Ces travaux consistent notamment en une surveillance cinématique des terrains instables par mesures électro-optiques et inclinométriques, en une étude du fonctionnement hydrogéologique et rhéologique de la coulée à travers diverses investigations géotechniques et géophysiques, en une analyse géomorphologique approfondie du versant déstabilisé. L'ambition à long terme de cette recherche est d'aboutir à une modélisation déterministe de ce glissement-coulée caractéristique d'un contexte lithologique et morphologique régional.

Dans ce cadre, l'objectif de la démarche photogrammétrique multitemporelle originale présentée dans cet article est de fournir une suite de descriptions géométriques du site, depuis l'état antérieur au glissement de terrain jusqu'à nos jours. Une série de six modèles numériques de terrain (MNT) a été réalisée dans ce but à partir de couples stéréoscopiques de photographies aériennes datant de 1956, 1971, 1978, 1982, 1988 et 1995. Par rapport à la problématique géomorphologique d'ensemble posée par le site de Super-Sauze, cette approche multitemporelle apporte une aide précieuse à la compréhension des mécanismes de déclenchement et d'extension du glissement-coulée en permettant de visualiser quelques unes des étapes de son développement. Elle contribue également efficacement, à travers une exploitation quantitative des données numériques produites, à l'identification des zones d'ablation et d'accumu-

lation sur le versant, à la reconstitution de la paléotopographie fossilisée, et par conséquent à l'estimation du volume rocheux mobilisé. Ces connaissances essentielles de l'étude géomorphodynamique sont particulièrement difficiles à obtenir par des investigations *in situ* et la photogrammétrie numérique apporte par conséquent une contribution significative à l'ensemble de la connaissance spatio-temporelle de ce mouvement de terrain.

Après une brève présentation du site d'étude, les aspects méthodologiques du traitement d'image sont exposés dans un premier temps, suivis de l'exploitation et de l'analyse des résultats en terme d'interprétations géomorphologiques à la fois qualitatives et quantitatives.

LE SITE D'ÉTUDE

Dans les Alpes françaises du sud, sur le cours moyen de l'Ubaye, le site de Super-Sauze est localisé dans le bassin de Barcelonnette (fig. 1), réputé pour ses nombreuses instabilités de versant [Légier, 1977; Weber, 1994] et autres aléas géomorphologiques [Flageollet *et al.*, 1996a]. Ceux-ci s'expliquent notamment par une agressivité climatique élevée (alternances d'averses violentes et de périodes de sécheresse) qui s'exerce sur une formation lithologique particulièrement sensible à l'érosion du fait de ses médiocres caractéristiques mécaniques : les « Terres Noires » [Artru, 1972; Awongo, 1985; Buffalo, 1989; Phan, 1993]. La dépression de Barcelonnette laisse en effet apparaître sur de grandes étendues, en fenêtre, ce soubassement autochtone daté du Callovo-Oxfordien à travers divers faciès de flyschs et de calcaires allochtones appartenant aux nappes de charriage de l'Embrunais-Ubaye. Ces formations résistantes constituent l'ensemble des crêtes qui ceinturent le bassin de Barcelonnette et en font une cellule montagnarde fortement enclavée accessible soit par des cols élevés, soit par des gorges étroites taillées par l'Ubaye et le Bachelard. Dans ce contexte morfo-structural particulier, l'ensemble des versants présente en outre une couverture morainique discontinue, pouvant atteindre jusqu'à 20-30 mètres d'épaisseur dans certains vallons, et elle-même impliquée dans de nombreux mouvements de terrains.

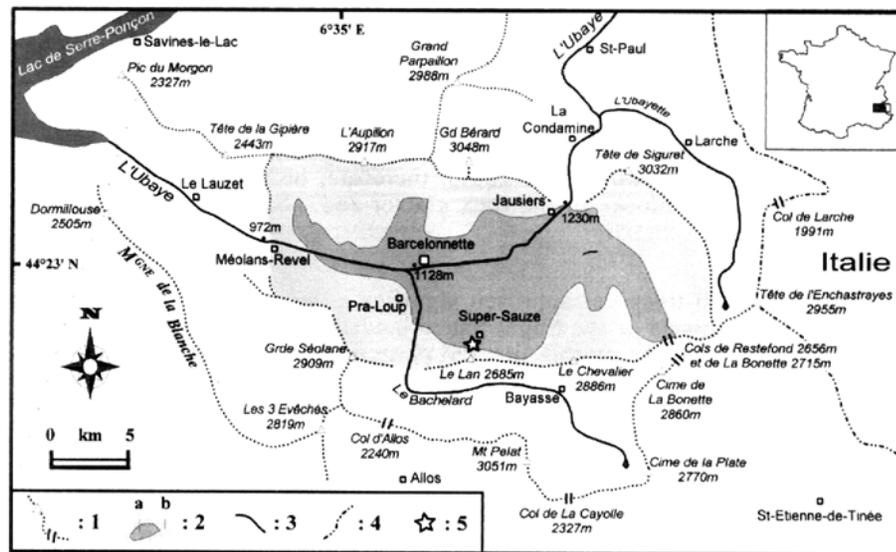


FIG. 1. – Le bassin de Barcelonnette sur le cours de l'Ubaye. 1 : lignes de crêtes avec principaux sommets et cols régionaux ; 2 : bassin de Barcelonnette (a : soubassement autochtone ; b : formations charriées allochtones) ; 3 : cours d'eau principaux ; 4 : frontière franco-italienne ; 5 : glissement de Super-Sauze.

FIG. 1. – The Barcelonnette basin along the Ubaye river: 1 : crest lines with main regional summits and passes ; 2 : Barcelonnette basin (a : autochthonous basement ; b : allochthonous thrust sheet formations) ; 3 : main rivers ; 4 : French-Italian border ; 5 : Super-Sauze landslide.

Le glissement de terrain étudié s'est précisément développé entre 1750 et 2100 mètres d'altitude aux abords de la station de sports d'hiver de Super-Sauze (Commune d'Enchastrayes), sur le versant septentrional du massif de Restefond. Il fait partie d'un vaste secteur de ravinement, les « Roubines », qui constitue sur une superficie d'environ 90 hectares une partie importante du bassin de réception du torrent du Sauze (fig. 2). Ce modèle de ravinement où le processus d'érosion et de façonnement morphologique dominant est le ruissellement est caractéristique de l'ensemble des vallées des Préalpes françaises où affleurent les formations marneuses du Jurassique [Olivry et Hoorelbeck, 1990 ; Lhénaff *et al.*, 1993 ; Antoine *et al.*, 1995 ; Cemagref, 1995]. Le torrent prend sa source à la base du glacier rocheux dont la morphologie caractéristique en lobe marque de sa présence le fond du cirque glaciaire sous les reliefs du Chapeau de Gendarme (2 685 m) et du Brec Second (2 596 m). L'escarpement principal du glissement qui accuse une hauteur de 80 à 100 mètres à la limite supérieure des Terres Noires fait apparaître en coupe la couverture morainique d'une douzaine de mètres d'épaisseur se superposant directement à ces formations marneuses. Ce contact constitue du point de vue hydrogéologique un plan de discontinuité majeur qui joue un rôle fondamental dans la déstabilisation des terrains. En contrebas, le corps du glissement-coulée consiste en une accumulation de marnes noires remaniées perdant progressivement leur cohésion et leur structure foliée initiales et incluant des éléments hétérométriques de moraine. Sa pente moyenne est de l'ordre de 33 %, interrompue par deux replats relatifs qui marquent des ruptures dans le profil topographique longitudinal : le replat supérieur correspond à l'accumulation des matériaux éroulés et glissés au pied de l'escarpement majeur, alors que le replat inférieur illustre parfaitement l'influence de la paléotopographie dans la morphologie actuelle de la coulée de débris. La longueur totale du mouvement de terrain à ce jour est d'environ 800m entre le sommet de l'escarpement principal et le front de la coulée.

LA CONSTRUCTION DES MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN (MNT)

Peu de travaux ont jusqu'à ce jour mis à profit les avantages de la photogrammétrie numérique dans le domaine des risques géomorphologiques et des mouvements de terrains en particulier, la tâche principale restant pour l'instant le développement des techniques et des matériels. Des géologues de l'USGS³ ont défini selon cette méthode les vecteurs déplacements d'un certain nombre de repères naturels identifiés sur deux clichés aériens du glissement de Slumgullion (Colorado) entre 1985 et 1990 [Powers et Chiarle, 1996]. En France, des applications similaires ont permis d'établir des cartes de déformations superficielles et de mesurer le déplacement d'éléments remarquables de la surface topographique sur les sites instables de La Clapière (Alpes-Maritimes) et de la pointe de Friolin en Savoie, également entre deux dates seulement [Girault, 1992 ; Girault *et al.*, 1994].

Les six modèles numériques de terrains (MNT) du site de Super-Sauze ont été générés selon la chaîne de traitement présentée par la figure 3 à l'aide du module de photogrammétrie numérique ORTHOMAX® intégré au logiciel de traitement d'images IMAGINE® développé par la société ERDAS™.

La saisie numérique

La saisie numérique des clichés acquis sous forme de positifs papier a été réalisée avec l'aimable autorisation de l'Institut Géographique National⁴. Des photographies datant de 1948 sont également disponibles mais dans un format trop petit et d'une qualité insuffisante pour pouvoir être numérisées. Exploitées par photogrammétrie traditionnelle, elles ne révèlent toutefois pas de différences morphologiques majeures par rapport à la situation de 1956. Le tableau I

3. United States Geological Survey.

4. Autorisation n°70 8006 © IGN France 1998.

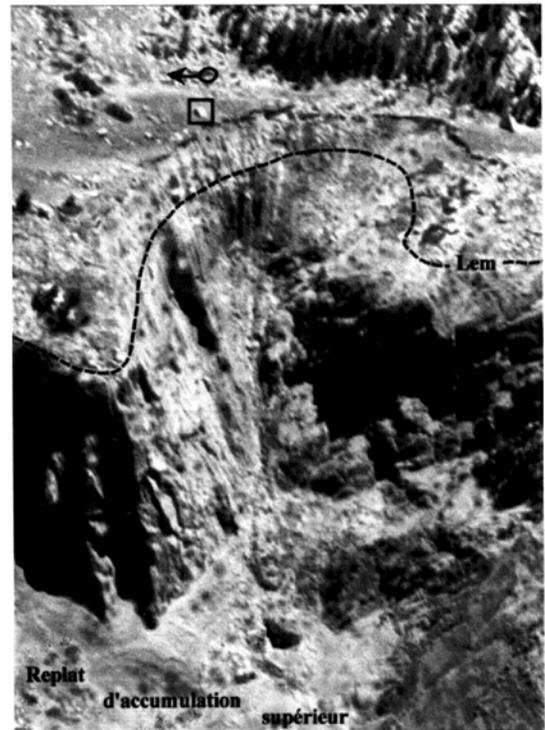
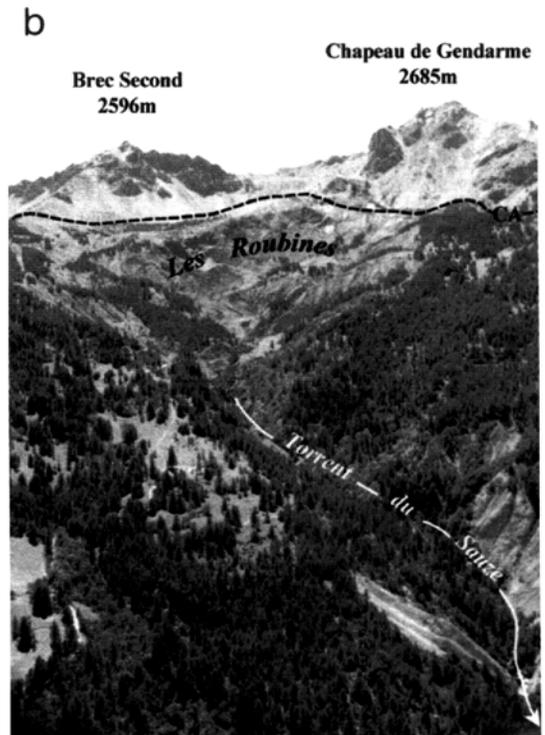
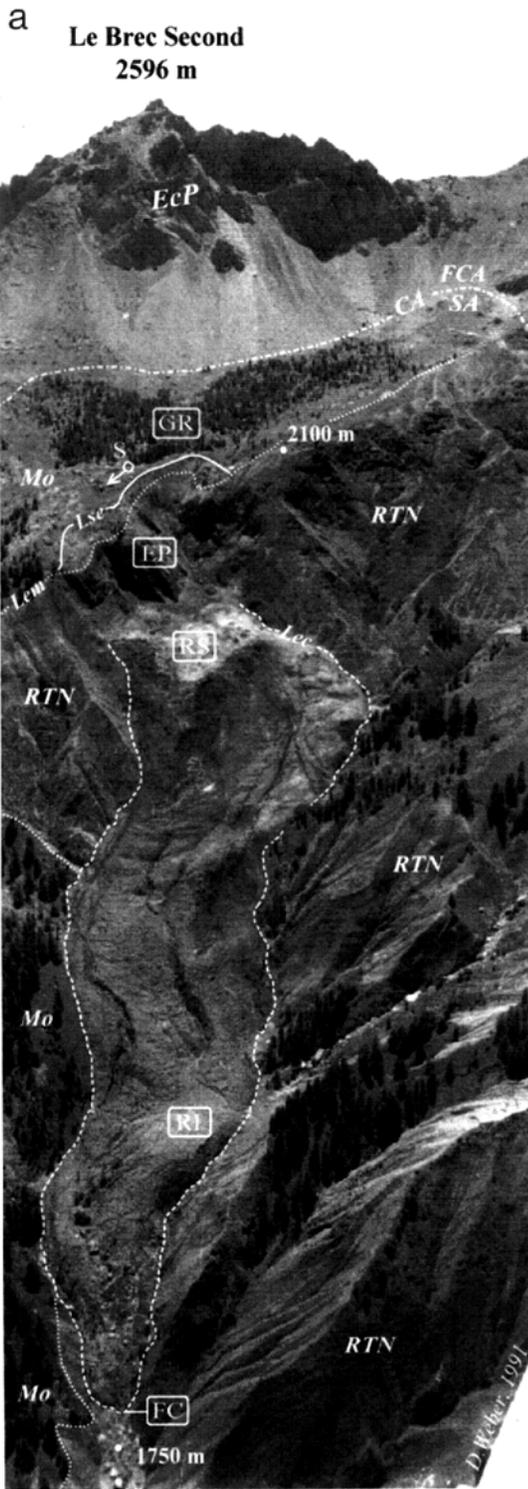


FIG. 2a. – Le glissement-coulée de Super-Sauze dans son contexte géologique et morphologique (vue aérienne oblique vers le sud). EcP : écaïlle basale de la nappe du Parpaillon; CA : contact anormal entre : FCA (formations charriées allochtones) et SA (soubassement autochtone); GR : glacier rocheux; S : source de la Goutta; Lem : limite d'extension de la couverture morainique; Lse : limite supérieure de l'escarpement; Lec : limite externe de la coulée de débris; EP : escarpement principal du glissement-coulée; RS : replat supérieur; RI : replat inférieur; FC : front de la coulée; Mo : moraine; RTN : ravinement dans les Terres Noires.

FIG. 2a. – The Super-Sauze landslide in its geological and morphological context (aerial oblick view to the south). EcP : Parpaillon shect; CA : anormal contact between FCA (allochthonous formations) and SA (autochthonous basement); GR : rock glacier; S : La Goutta spring; Lem : limit of the morainic cover; Lse : upper limit of the scarp; Lec : boundary of the flowslide; EP : landslide main scarp; RS : upper shelf; RI : lower shelf; FC : toe of the flow; Mo : moraine; RTN : gully erosion in the Terres Noires.

FIG. 2b haut. – Vue d'ensemble du bassin de réception du torrent Sauze sur le versant méridional du bassin de Barcelonnette. Les Roubines se développent dans les Terres Noires autochtones affleurant sous les sommets formés de roches allochtones appartenant aux nappes de charriage de l'Embrunais-Ubaye.

FIG. 2b haut. – General view of the Sauze torrent catchment. Badlands developed in the autochthonous black marls cropping out under the allochthonous rocks from the Embrunais-Ubaye trust sheets forming the summits around the Barcelonnette basin.

FIG. 2b bas. – Vue aérienne oblique de l'escarpement principal avec le front du glacier rocheux couvert de mélèzes, la source de la Goutta (←○) et la cabane de berger (□) à l'amont, et le replat d'accumulation supérieur au pied de la paroi marneuse.

FIG. 2b bas. – Aerial oblick view of the main scarp with the front of the rock glacier covered of mélèzes, the Goutta spring (←○) and the shepherd hut (□) above, and the upper shelf of displaced material at the foot of the marly wall.

TABL. 1. – Caractéristiques des photographies aériennes numérisées.

TABL. 1. – *Digital aerial photographs datas.*

Année	Chambre de prise de vue	Distance focale	Format des clichés	Échelle	Saisie numérique	Résolution au sol
1956	Gylor à plaques 23A	125 mm	19 × 19 cm	1/25000	40 microns	1 mètre
1971	Wild RC8 15UAg	150 mm	23 × 23 cm	1/30000	33 microns	0.99 mètre
1978	Wild RC10 15UAg	150 mm	23 × 23 cm	1/30000	33 microns	0.99 mètre
1982	Wild RC10 21 NAgII	210 mm	23 × 23 cm	1/17000	33 microns	0.55 mètre
1988	Wild RC10 15UAg	150 mm	23 × 23 cm	1/30000	33 microns	0.99 mètre
1995	Zeiss RMK Top15	150 mm	23 × 23 cm	1/30000	33 microns	0.99 mètre

résume les principales informations relatives aux photographies numérisées.

Par souci de normalisation, toutes les images résultantes ont ensuite été rééchantillonnées numériquement pour arriver à une résolution planimétrique finale de 1 mètre. Pour la réalisation de MNT, l'exploitation de couples d'images stéréoscopiques suppose de disposer en outre de deux types d'informations complémentaires :

- la description de l'optique des chambres de prise de vues, qui est fournie par le certificat de calibrage de chacune d'entre elles (distance focale, coordonnées de marques fiduciaires, distorsions radiales de l'objectif, etc.);
- les coordonnées précises d'une série de points de calage régulièrement répartis sur la zone d'étude.

L'aérotriangulation

L'aérotriangulation (ou triangulation) est le processus de calcul des paramètres de prise de vue (orientation et position de la chambre de prise de vue dans l'espace) à partir des coordonnées objet et image des points de calage. Des équations reliant ces deux types de coordonnées sont ainsi établies. L'ensemble des traitements étant tributaire de la triangulation initiale, cette étape du processus apparaît fondamentale pour la qualité ultérieure des modèles numériques. Pour cette étude, des points de calage ont été repérés manuellement, faute de mieux, sur une carte topographique au 1/25 000^e avec une précision de lecture estimée à +/- 10 mètres en planimétrie et +/- 3 mètres en altimétrie. Malgré

ces incertitudes, les résultats des compensations apparaissent satisfaisants puisque les résidus sur les points de calage sont de l'ordre de 2-3 mètres en planimétrie et de moins de 1 mètre en altimétrie (sauf pour 1956 où les résidus plus importants – de l'ordre de 7 mètres en planimétrie – étaient prévisibles en raison de la qualité moyenne des clichés et de la mauvaise orientation interne du modèle).

La génération automatique des MNT

L'outil de génération automatique de modèle numérique de terrain utilise la corrélation numérique des deux images d'un couple stéréoscopique. Cette corrélation consiste à retrouver systématiquement les points homologues sur les deux images, puis à déterminer la valeur de la parallaxe et en déduire l'élévation du point. La qualité finale du MNT calculé est donc directement fonction des performances du corrélateur. Les erreurs sont particulièrement fréquentes dans les zones à radiométrie faiblement contrastée comme les zones d'ombre ou les terrains enneigés. D'une manière générale, le corrélateur a du mal à se « fixer » et échoue dans les zones homogènes sans textures ou contrastes suffisants. Ces échecs induisent des anomalies dans les calculs d'élévation, qui sont parfois très locales sur un ou plusieurs pixels et qui se manifestent par des aberrations (pics ou creux) dans le relief restitué.

La quantité d'erreurs de corrélation est également liée à la résolution choisie pour le calcul du MNT ; il s'agit d'établir un compromis entre haute résolution, avec fort bruit de corrélation, et basse résolution, manquant de détails morphologiques. Ce compromis dépend également des objectifs scientifiques poursuivis. Nos travaux privilégiant dans un premier temps au moins, la couverture temporelle par rapport à la finesse spatiale, une résolution planimétrique de 15 mètres a été retenue pour les six modèles réalisés ; elle pourrait éventuellement être revue à la hausse pour deux MNT au moins afin de permettre une détermination plus précise des phénomènes morphologiques étudiés. Trois observations peuvent être faites à l'issue de ces calculs :

- même pour une résolution de 15 mètres, la quantité d'aberrations géométriques est loin d'être négligeable ;
- certains MNT présentent un décalage en altimétrie, qu'il est simple de corriger lorsqu'il est uniforme pour toute la surface du modèle, mais plus délicat à prendre en compte lorsqu'il s'agit de déformations hétérogènes ;
- des décalages en planimétrie sont également mis en évidence entre les différents modèles.

Il est nécessaire de pouvoir corriger ces imperfections afin d'assurer une superposition géométrique correcte des six modèles destinés à être comparés.

La correction des aberrations altimétriques

Le module professionnel d'Orthomax« permet la visualisation en relief d'un couple d'images (la stéréopaire) à l'aide de lunettes à cristaux liquides. Chaque image du couple est

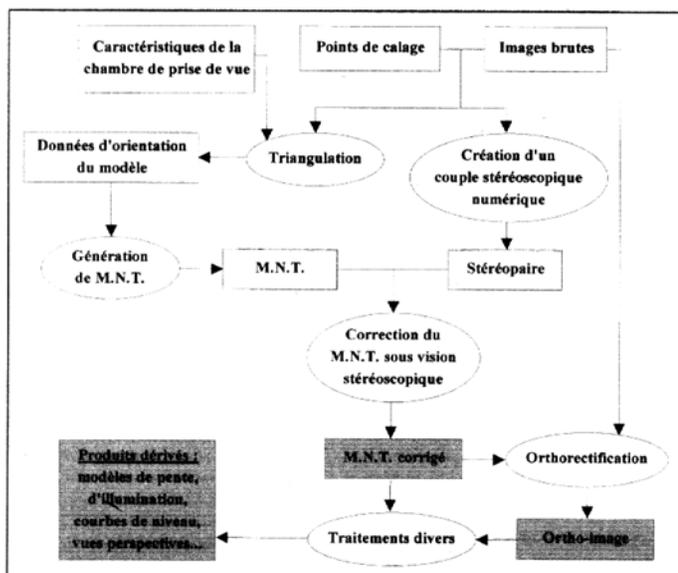


FIG. 3. – Processus de traitement d'image par photogrammétrie numérique.
FIG. 3. – *The digital photogrammetric image processing.*

affichée à l'écran à une fréquence de 120 Hertz et chaque œil est alternativement masqué à la même fréquence. Ainsi, l'œil gauche ne voit que l'image gauche et l'œil droit ne voit que l'image droite, et ce 60 fois par seconde. La fusion des images est réalisée instinctivement par le cerveau, ce qui permet la perception du relief. Les nœuds du MNT sont ensuite superposés à cette représentation du relief et l'association de deux canaux d'information permet de visualiser la correspondance entre le relief calculé (le MNT) et le relief restitué par les images.

Un utilitaire d'édition autorise par la suite le déplacement manuel des points de la grille altimétrique du modèle en altitude afin de les mettre en coïncidence avec le terrain. Pour les six MNT générés dans cette étude, le pourcentage des points ainsi réajustés manuellement varie entre 3 et 11 % du nombre total des 8881 points de chaque grille.

Le recalage absolu des MNT

La comparaison des différents reliefs calculés suppose un recalage rigoureux des modèles entre eux, aussi bien en altimétrie qu'en planimétrie. Les décalages observables s'expliquent principalement par la qualité moyenne des points de calage utilisés dans la phase initiale d'aérotriangulation. C'est pourquoi un recalage *a posteriori* des six modèles a été réalisé à partir des données d'une campagne de mesures par GPS (Global Positioning System). L'opération consistait à déterminer sur le terrain avec une précision planimétrique et altimétrique de quelques centimètres les coordonnées géodésiques d'une dizaine de points de contrôle supposés stables, nettement identifiables sur les différents clichés et bien répartis sur toute la zone d'étude. L'intégration de ces points dans les six grilles altimétriques a finalement permis d'obtenir une bonne superposition géométrique des MNT.

Les produits dérivés

Les traitements photogrammétriques permettent de produire, en plus des MNT, divers produits dérivés comme des ortho-photographies ou des vues perspectives dont l'analyse est particulièrement instructive sur l'évolution morphologique du site. Les ortho-photographies sont des images qui ont été corrigées de toutes les déformations géométriques liées à la prise de vue et au relief à travers un traitement mathématique réalisé à partir des photographies initiales et des MNT. Les vues perspectives résultent ensuite du drapage de chaque ortho-image sur le modèle altimétrique correspondant. Permettant un véritable survol du versant instable aussi bien dans le temps que dans l'espace (sous différents angles) et montrant ainsi de façon spectaculaire les bouleversements morphologiques survenus, ces images sont d'excellents vecteurs de communication et de vulgarisation de la connaissance scientifique auprès de publics non spécialisés dans les risques naturels.

INTERPRÉTATION : L'ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DU VERSANT INSTABLE

L'analyse multitemporelle des MNT et de leur produits dérivés fournit diverses informations sur l'évolution géomorphologique du site de Super-Sauze en permettant notamment de situer les secteurs et les périodes de déclenchement et d'extension du glissement-coulée. Si certaines de ces informations restent purement qualitatives et descriptives, d'autres prennent par contre une dimension quantitative qui fait tout l'intérêt de la photogrammétrie numérique.

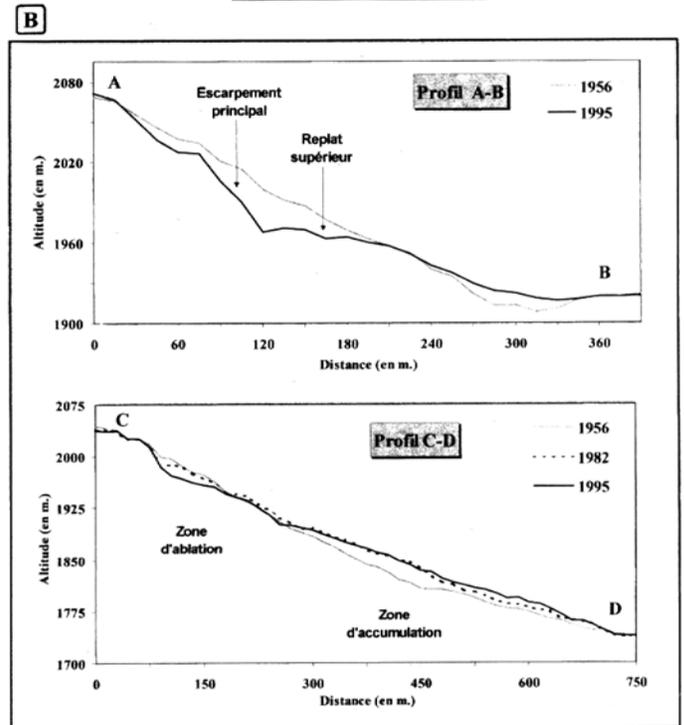
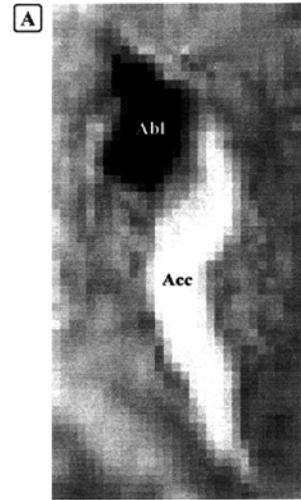


FIG. 4. – Exploitations quantitatives des traitements photogrammétriques numériques. A : image de différence entre MNT de 1995 et 1956. Abl : zone d'ablation ; Acc : zone d'accumulation. B : profils topographiques multi-temporels A-B et C-D (cf. localisation sur fig. 5).

FIG. 4. – Quantitative interpretations from digital photogrammetric results. A : 1995 and 1956 D.E.M.s subtraction image. Abl : ablation zone ; Acc : accumulation zone. B : multi-temporal A-B and C-D topographic profiles (see location on fig. 5).

Analyses quantitatives (fig. 4)

Cette exploitation quantitative est double. Les ortho-photographies dont la résolution au sol est de 1m permettent de réaliser dans un premier temps des mesures planimétriques très précises : on a ainsi pu estimer par exemple le recul de l'escarpement principal, des déplacements de blocs rocheux, ou encore l'extension spatiale de la coulée et notamment l'avancement de son front. Ces informations sont données par la suite lors du commentaire de l'évolution géomorphologique du versant. Les déterminations qui peuvent être faites à partir des MNT restent par contre plus

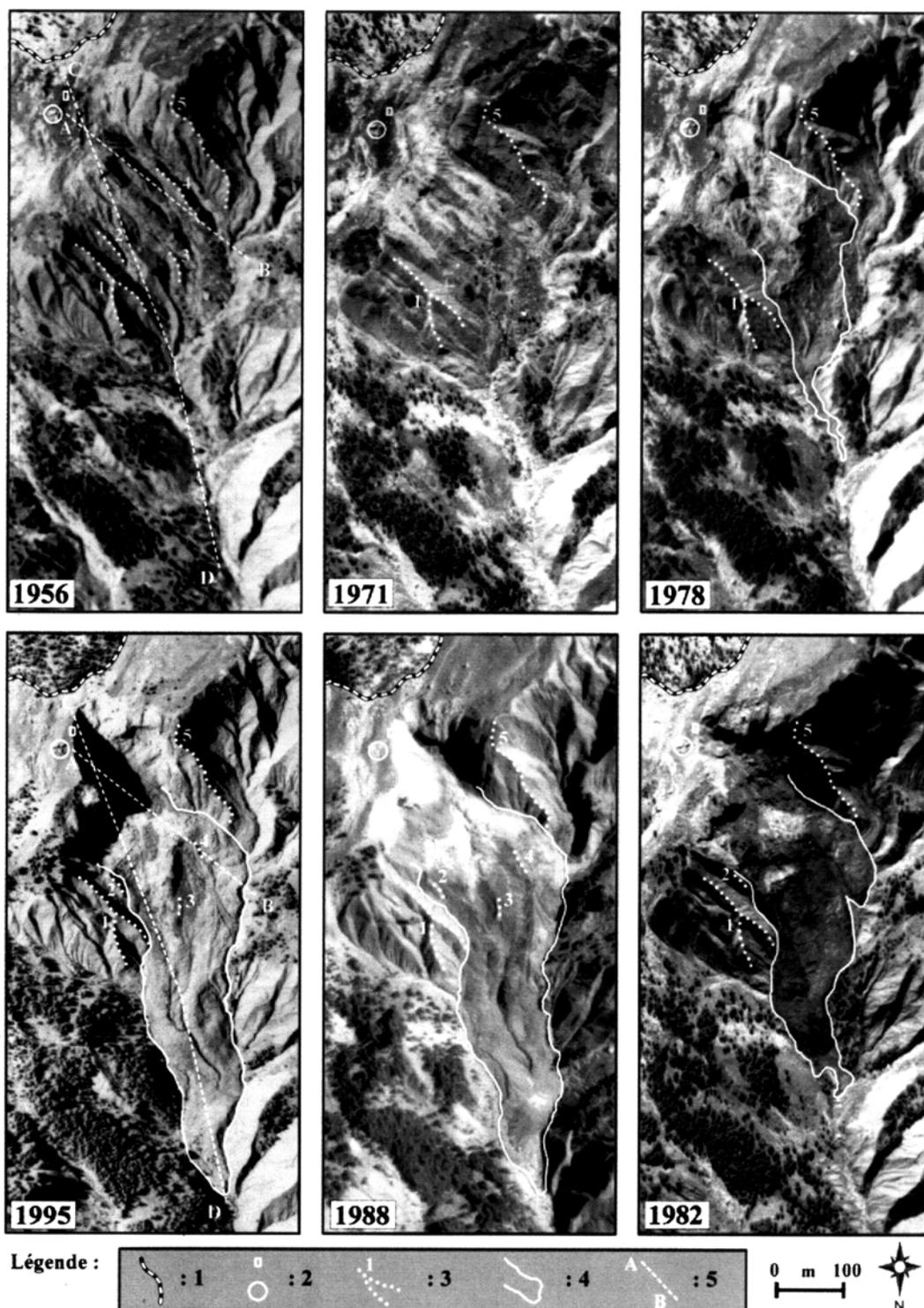


FIG. 5. – L'évolution géomorphologique du glissement-coulée de Super-Sauze restituée par ortho-photographies. 1 : talus frontal du glacier rocheux ; 2 : groupe de rochers volumineux (cercle) et cabane de berger (rectangle) permettant d'apprécier le recul progressif de l'escarpement principal ; 3 : crêtes de ravine remarquables numérotées de 1 à 5 permettant de suivre l'extension de la coulée de débris (cf. fig. 6) ; 4 : limite externe de la coulée à partir de 1978 ; 5 : profils topographiques A-B et C-D (cf. fig. 4) extraits des MNT (reportés sur les images de 1956 et 1995 uniquement). On précise que la séquence temporelle va de gauche à droite pour les 3 images du haut et inversement pour celles du bas vers le bas de la page permet une meilleure perception visuelle du mouvement de terrain.

FIG. 5. – Geomorphological evolution of the Super-Sauze landslide observed on ortho-rectified pictures. 1 : rock glacier front slope ; 2 : Big rocks (circle) and shepherd hut (rectangle) on the landslide crown ; 3 : remarkable gully crests n° 1 to 5 in the "Roubines" bad-lands ; 4 : external boundary of the flowslide (from 1978 on) ; 5 : A-B and C-D topographic profiles (cf. fig. 4) extracted from D.E.M.s (only on 1956 and 1995 pictures). The temporal sequence goes from left to right for the three upper pictures and inversely for the three others ; the north pointing to the bottom of the page permits a better visual appreciation of the landslide.

grossières du fait de la résolution spatiale supérieure (15m) de ces derniers. Des calculs d'images de différence entre modèles permettent tout de même d'identifier dans le temps et dans l'espace les événements morphologiques majeurs survenus sur le site : les mobilisations de matériau les plus importantes ont été détectées de cette manière entre 1971 et 1982 (les phénomènes morphologiques correspondant à ces informations purement numériques sont décrits par la suite à partir des ortho-images et vues perspectives). Les profils topographiques linéaires que la photogrammétrie numérique permet d'extraire rapidement et en grand nombre des différents modèles altimétriques montrent très bien ces modifications de la topographie. Le regroupement sur un même graphique de plusieurs de ces profils calculés pour des dates différentes permet en outre de visualiser les étapes de l'évolution morphologique du versant : l'inversion progressive du relief entre zones d'ablation et d'accumulation est ainsi clairement mise en évidence le long du profil longitudinal C-D (fig. 4 et 5).

Les caractéristiques morphologiques du glissement-coulée font qu'un simple calcul de différence entre les MNT de 1995 et de 1956 ne donne pas directement le volume global des terrains déplacés. Une telle image de différence ne permet en effet de distinguer que la zone d'ablation et la zone d'accumulation sur le versant, c'est-à-dire respectivement les secteurs où l'altitude de la surface topographique a baissé ou au contraire augmenté entre les deux dates (fig. 4). Un volume important de terrains remaniés stocké dans la zone d'ablation ne peut donc être pris en compte par la photogrammétrie. Seuls des forages ou sondages réalisés *in situ* permettent d'identifier en profondeur la surface de rupture et donc de connaître, malheureusement ponctuellement seulement, l'épaisseur de ces terrains. L'outil photogrammétrique est par contre très utile pour calculer le volume des terrains instables dans la zone d'accumulation, c'est-à-dire là où il y a simple recouvrement de la topographie initiale de 1956 par la coulée de débris. Pour l'ensemble du corps du glissement-coulée couvrant une surface de 80 000 m², le recouplement des analyses photogrammétriques quantitatives avec les informations ponctuelles fournies par les investigations géotechniques lourdes [Flageollet *et al.*, 1996b] a permis de calculer un volume global actuel de matériaux remaniés de l'ordre de 650 000 m³.

L'évolution géomorphologique du glissement-coulée

Les six ortho-images retracent l'évolution du versant instable de Super-Sauze depuis son état initial de modelé raviné (de bad-lands) jusqu'au glissement-coulée actuel (fig. 5), alors que les vues perspectives présentées en complément permettent de comparer plus précisément, avec deux points de vue différents, les morphologies de 1956 et de 1995 (fig. 6). Du fait de la similitude des horaires de prises de vue à 39 ans d'écart, les modifications majeures de la topographie y sont particulièrement bien révélées par les différentes ombres portées du relief. Deux phénomènes morphologiques majeurs méritent une attention particulière sur les illustrations proposées : le recul progressif de l'escarpement principal par mouvements de masse (glissements et écroulements rocheux) qui alimentent en matériel le corps du glissement-coulée, et l'extension spatiale d'une coulée boueuse qui s'étale et fossilise peu à peu le thalweg initial constitué d'un réseau de ravines dit « en patte d'oie ».

Les images de 1956 montrent un paysage caractéristique du bassin de Barcelonnette, à savoir un versant de Terres Noires ravinées par les eaux de ruissellement. Ces ravines sont recouvertes en parties hautes d'un dépôt morainique (de couleur plus claire sur les images). L'une d'entre elles, nommée ravine principale (fig. 6a et 6c) est déjà largement

plus encaissée que ses voisines, juste sous le glacier rocheux hérité. Elle entaille déjà nettement la moraine qui est déstabilisée à l'intérieur d'une forme circulaire qui préfigure l'extension des ruptures futures. En 1971, plusieurs petits mouvements superficiels mobilisent ce matériel morainique et provoquent un premier remplissage des fonds de ravines. Mais la plupart des blocs morainiques présents dans les Roubines restent clairement identifiables à cette date. Entre 1971 et 1978 un premier escarpement consécutif à un écroulement rocheux est détecté à l'ouest d'une cabane de berger (rectangle blanc sur la figure 5) selon une direction est-ouest. De la masse des terrains accumulés en contrebas se sont déjà échappées quelques coulées boueuses très fluides qui commencent à encombrer le fond du thalweg principal. De nets bouleversements morphologiques marquent la courte période entre 1978 et 1982 : un second écroulement rocheux qui a eu lieu au nord du précédent a généré une paroi orientée SW-NE. Les accumulations générées par ces deux mouvements de masse importants se distinguent nettement au pied de l'escarpement principal à la faveur d'un éclairage favorable du sud qui met en lumière leurs contre-pentes. A l'aval, ces matériaux sont repris par des coulées boueuses qui provoquent, en se chevauchant sur des épaisseurs croissantes, un ennoyage progressif du relief initial. Six ans plus tard, en 1988, le front de la coulée s'est avancé d'environ 180 mètres (soit une vitesse moyenne de 30m/an), atteignant à quelques mètres près sa position actuelle. Le replat inférieur qui s'est formé au cours de cette période présente une morphologie particulière qui s'explique par la topographie des terrains recouverts ; le suivi topométrique en cours depuis 1991 enregistre d'ailleurs parfaitement le ralentissement et la déviation de la coulée liés au franchissement de cet obstacle paléo-topographique. A l'amont, aucun mouvement de masse important n'est détecté entre 1982 et 1988 en bordure de la couronne.

En 1995, le front de la masse instable est encore descendu d'une petite dizaine de mètres, venant s'engouffrer dans un thalweg très étroit taillé entre les marnes des ravines en place à l'ouest et les terrains de couverture morainique à l'est. La coulée est donc actuellement dans une phase de blocage de son extension longitudinale, ce qui se traduit par une augmentation de l'épaisseur des matériaux accumulés en partie basse et un raidissement du talus frontal. Ces observations sont confirmées par des mesures topométriques plus précises réalisées *in situ* depuis 1991 : des déplacements de repères de 1 à 2 mètres par an ont été mesurés sur le replat inférieur et le pied de la coulée, alors qu'à l'amont des vitesses supérieures à 10 mètres par an sont enregistrées dans les secteurs les plus humides et actifs situés en contrebas du replat supérieur. Les deux courbes de 1982 et 1995 de la figure 4b (profil C-D) montrent parfaitement la vidange de la partie amont de la coulée au profit de l'allongement et de l'épaississement de sa partie inférieure. Comme pour la période précédente, les photographies ne permettent pas de détecter de mouvements majeurs autour de la couronne entre 1988 et 1995. Mais des observations de terrain faites régulièrement depuis 1990 révèlent que des mouvements gravitaires de petite ampleur (essentiellement chutes de blocs ou écroulements de pans de terrain réduits) s'y produisent régulièrement. Cette activité s'est même sensiblement amplifiée au cours des deux dernières années, provoquant notamment au début du printemps 1997 l'écroulement de la cabane de berger déjà signalée précédemment. Des écroulements rocheux de forts cubages enregistrés au cours des derniers mois en divers secteurs de la paroi sont aussi venus s'étaler sur le replat supérieur de la coulée, continuant d'alimenter celle-ci en matériaux supplémentaires. Au total, entre 1971 (date à laquelle peut être identifiée avec certitude une première rup-

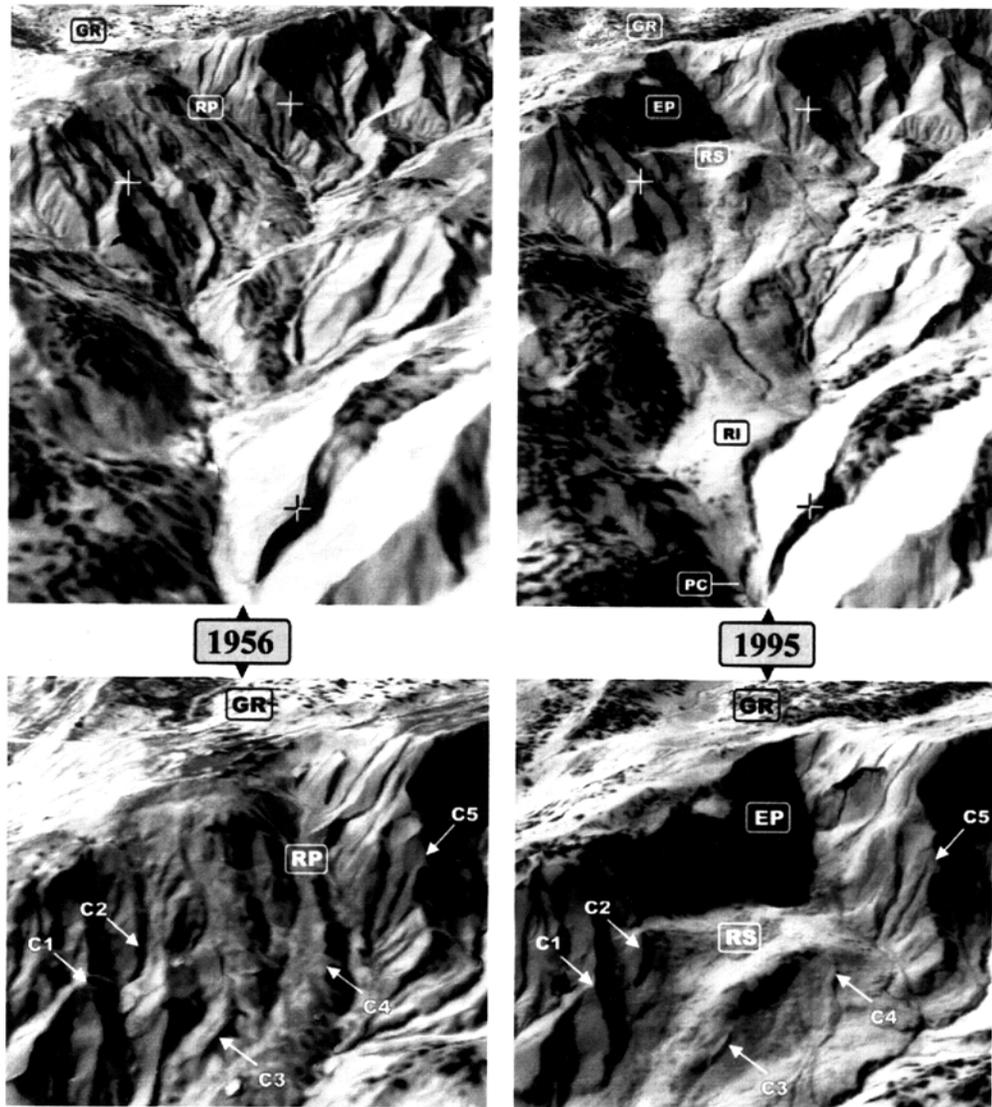


FIG. 6. – Vues perspectives lointaines (en haut) et rapprochées (en bas) du bassin torrentiel du Sauze en 1956 (à gauche) et 1995 (à droite). GR : glacier rocheux ; RP : ravine principale de 1956 ; EP : escarpement principal actuel ; RS : replat supérieur ; RI : replat inférieur ; FC : front de la coulée ; C1 à C5 : crêtes de ravines (cf. fig. 5).

FIG. 6. – Distant (top) and near (bottom) perspective views of the Sauze torrential basin in 1956 (left) and 1995 (right). GR : rock glacier ; RP : 1956 main gully ; EP : present time main scarp ; RS : upper shelf ; RI : lower shelf ; FC : toe of the flow ; C1 to C5 : gully crests (cf. fig. 5).

ture) et 1995, le recul maximal de l'escarpement est estimé à une quarantaine de mètres dans le secteur où celui-ci est le plus proche du glacier rocheux et de la source de la Goutta. Une des dernières manifestations spectaculaires de cette activité morphologique est l'écroulement au printemps 1997 de la cabane de berger citée précédemment (fig. 2 et 5).

Même si l'extension de cet escarpement s'est globalement ralentie au cours des deux dernières décennies par rapport aux mouvements importants observés dans les années 1970 et au tout début des années 1980, la configuration topographique et litho-structurale du site fait prévoir une poursuite de son recul et par conséquent de l'ensemble des processus d'instabilités de ce versant. Les conditions du glissement-coulée pourraient ainsi être modifiées assez rapidement, d'ici quelques années à quelques dizaines d'années, lorsque commenceront à être mobilisés en grand nombre les blocs du glacier rocheux et, surtout, lorsque l'escarpement atteindra la source de La Goutta ; Celle-ci, dont l'écoulement régulier est actuellement presque intégralement capté pour alimenter les stations du Sauze et Super-

Sauze, se déversera alors directement dans le creux des Roubines. Le risque de mobilisation des Terres Noires remaniées sous forme de laves torrentielles augmenterait par conséquent très fortement du fait de l'humectation intensifiée de certains secteurs de la coulée. Seule une intervention humaine de grande ampleur assurant le contrôle du fonctionnement hydrologique du versant permettra alors de maîtriser l'évolution de cette coulée, mais aussi de maintenir tout au long de l'année l'alimentation en eau des stations de loisirs.

CONCLUSIONS

Une des difficultés majeures qui rend particulièrement complexe l'étude des mouvements de terrain de type glissement-coulée est la nécessité de leur connaissance d'un double point de vue, à la fois spatial et temporel. C'est là un enjeu fondamental auquel sont confrontés les géomorphologues qui tentent de modéliser le comportement et l'évolution de

ces masses instables. Sans renier la photogrammétrie classique et traditionnelle qui conserve quelques avantages indéniables [Girault et Memier, 1997], la démarche exposée dans cet article illustre parfaitement les apports et intérêts d'une photogrammétrie numérique de plus en plus performante pour cette approche spatio-temporelle des phénomènes. Les travaux réalisés sont très enrichissants et prometteurs sur ce plan, sachant que des résultats quantitatifs plus précis pourraient être obtenus en générant des MNT de résolution plus fine. La technique d'imagerie numérique mise en œuvre s'est surtout avérée être un précieux outil de quantification *a posteriori* des phénomènes morphologiques, montrant ainsi tout son intérêt par rapport à d'autres méthodes comme la topométrie électro-optique, le GPS et surtout la radargrammétrie, la seule qui permettent aussi une approche spatiale globale, toutes trop récentes pour mesurer un mouvement ayant débuté il y a plusieurs décennies. L'analyse photogrammétrique a ainsi fourni une contribution significative à la définition de la géométrie tridimensionnelle de la masse instable, connaissance préalable indispensable à toute tentative de modélisation déterministe du comportement aussi bien hydrologique que mécanique de ce mouvement de terrain. L'ensemble de ces résultats obtenus à ce jour, dont ceux exposés dans cet article, permettent d'ores et déjà d'établir un solide modèle conceptuel du fonctionnement et du comportement de ce mouvement de terrain [Weber, 2000] : on est notamment en mesure de comprendre comment et pourquoi des mouvements de masse peuvent se déclencher sur des versants de ravinement intense comme il en existe de nombreux dans toutes les Alpes françaises du Sud, mais aussi de prévoir l'évolution future du versant des Roubines de Super-Sauze en fonction de certains critères morpho-structuraux qui peuvent eux aussi se retrouver ailleurs.

D'un point de vue méthodologique plus général, la photogrammétrie numérique est assurément appelée à devenir dans les toutes prochaines années un outil d'étude essentiel des risques géomorphologiques. Tout d'abord parce qu'elle permet de définir avec une très grande finesse le relief des terrains à travers des MNT de plus en plus précis et justes. Lorsque l'on a la chance ensuite, comme c'est le cas pour le site de Super-Sauze, de disposer de photographies suffisamment anciennes antérieures au mouvement, cette approche autorise la connaissance tridimensionnelle de la paléotopographie, si difficile et coûteuse à reconstituer par des techniques d'auscultation *in situ*. Le suivi visuel de l'évolution historique d'un site sur ortho-photographies ou vues perspectives permet aussi, de manière plus conviviale que par photo-interprétation stéréoscopique traditionnelle, de mieux comprendre les différents processus morphologiques qui s'y succèdent et s'y superposent. Qu'elle reste purement descriptive ou qu'elle prenne une dimension quantitative, la démarche exposée peut être élargie à de multiples autres problématiques de gestion et d'aménagement du territoire liées à l'évolution des paysages. Il convient à cet égard de souligner le fort potentiel « communication » des différentes images qui peuvent être produites, notamment par rapport à des publics de non-spécialistes en sciences de la terre.

Remerciements. – Les auteurs tiennent particulièrement à remercier F. Becker, A. Ricotta et L. Galisson, tous trois élèves ingénieurs de l'ENSAIS⁵, pour leur précieux concours à ces travaux : les deux premiers pour les heures passées à dompter Orthomax[®], le troisième pour la sympathique mission GPS menée dans les montagnes ubayennes. L'ensemble des recherches réalisées sur le site de Super-Sauze s'inscrivent dans trois programmes successifs financés par le Commission Européenne sur le thème des risques géomorphologiques (EPOCH⁶, TESLEC⁷, NEWTECH⁸) et plus récemment dans le Programme National Risques Naturels (PNRN 98/99-37MT) du CNRS.

Références

- ANTOINE P., GIRAUD A., MEINIER M. & VAN ASCH T.W.J. (1995). – Geological and geotechnical properties of the « Terres Noires » in the southeastern France : weathering, erosion, solid transport and instability. – *Eng. Geol.*, **40**, 223-234.
- ARTRU P. (1972). – Les Terres Noires du Bassin rhodanien (Bajocien supérieur à Oxfordien moyen) : stratigraphie, sédimentologie, géochimie. – Thèse de Doctorat, Univ. Claude Bernard, Lyon, 182 p.
- AWONGO M.-L. (1985). – Stratigraphie, sédimentologie et géochimie des Terres Noires du Jurassique moyen et supérieur de la Provence (sud-est de la France). – Thèse de Doctorat, sédimentologie, Univ. Marseille III, 144p., pl. et fig.
- BUFFALO M. (1989). – L'érosion des terres noires dans la région du Buëch. – Thèse de Géologie. Université Aix-Marseille III, 230 p.
- CEMAGREF (1995). – Compte-rendu de recherche n°3 BVRE de Draix. – Coordination : M. MEUNIER Cemagref Eds, Grenoble, 248 p.
- DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTT L. & IBSEN M.-L. (1996). – Landslide recognition : identification, movement and causes. – J. Wiley & Sons Eds., Chichester, 251 p.
- FLAGEOLLET J.-C., MAQUAIRE O. & WEBER D. (1996a). – Final National Report, University Louis Pasteur, Strasbourg, France. In : R. DIKAU, L. SCHROTT, M. DEHN, K. HENNRICH & S. RASEMANN Eds, The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC). – Final report, European Community Environment Programme, Contract n° EV5V-CT94-0454, 27-86.
- FLAGEOLLET J.-C., MAQUAIRE O. & WEBER D. (1996b). – Geotechnical investigations into the Super-Sauze landslide. Geomorphological and hydrogeological results. In : Landslides and flash floods, CERG Int. Workshop, Barcelonnette – Vaison la Romaine, 30 Sept.-3 Oct. 1996, 30-38. – Ouvrage en dépôt au CERG.
- GIRAULT F. (1992). – Auscultation de versants instables par imagerie numérique. – Thèse Ing. CNAM, Paris, 193 p.
- GIRAULT F. & FLEURY B. (1994). – Photogrammetry and digital imagery : application to measuring and defining deformation in unstable slopes. In : *Proc. 1st Int. Airborne Remote Sensing Conf. and Exhibition*, Strasbourg, France, Vol. III, 198-204.
- GIRAULT F. & MEMIER M. (1997). – Quelle photogrammétrie pour l'auscultation de versants instables ? – *Bull. Soc. Franç. de Photogrammétrie et Télédétection (SFPT)*, **145**, 24-32.
- LEGIER A. (1977). – Mouvements de terrain et évolution récente du relief dans la région de Barcelonnette (Alpes de Haute-Provence). – Thèse USMG, Grenoble, 163 p.
- LHENAFF R., COULMEAU P., LECOMTE M. & MARRE A. (1993). – Erosion and transport processes on badlands slopes in Baronnies mountains. Symposium on geomorphology of active tectonics area. *Geogr. fis. et dinam. quat.*, **16**, 65-73.
- OLIVRY J.-C. & HOORELBECK J. (1990). – Erosion des terres noires de la vallée du Buëch (Alpes du sud). – *Cah. ORSTOM Pédologie*, **XXV**, 1-2, 1989-90, 95-110.
5. Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg.
6. EPOCH (1992-94) : Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community.
7. TESLEC (1994-96) : The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change.
8. NEWTECH (1996-98) : New technologies for landslide hazard assessment and management in Europe.

- PHAN T.S.H. (1993). – Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des Terres Noires du Sud-Est de la France. – Thèse, Univ. Joseph Fourier, Grenoble I, 246 p.
- POWERS P.S. & CHARLE M. (1996). – A digital photogrammetric method to measure horizontal surficial movements on the Slumgullion landslide, Hinsdale County, Colorado. *In* : D.J. VARNES & W.Z. SAVAGE Eds. – *U.S. geological Survey Bull.* **2130**, U.S. Dpt of the Interior, Washington, 51-55.
- WEBER D. (1994). – Research into earth movements in the Barcelonnette basin. *In* : R. CASALE, R. FANTECHI, J.-C. FLAGEOLLET Eds., *Final Report EPOCH Programme « Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community »*, EUR 15805 EN, Vol. I, 321-336.
- WEBER D. (2000). – The Super-Sauze landslide (southern French Alps): contribution of geomorphology in the understanding of flowslides. – *Proc. 8th International Symposium on Landslides*, Cardiff. *In* : BROMHEAD *et al.* Eds., *Landslides in research, theory and practice*. – Thomas Telford Ltd., London, vol. 3, 1563-1568.