ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

Quantification des déplacements 3D par la méthode PLaS – application au glissement du Chambon (Isère)

Marie-Aurélié Chanut^{1,★}, Johan Kasperski², Laurent Dubois¹, Samuel Dauphin¹
et Jean-Paul Duranthon¹

¹ Cerema Centre-Est, département laboratoire de Lyon, 25, avenue François-Mitterrand, CS 92803, 69674 Bron cedex, France

² CETU, 25, avenue François-Mitterrand, 69674 Bron, France

Résumé – Une méthode de suivi de l'évolution des mouvements de versant sans végétation, facile à mettre en œuvre et à bas coût, est développée : la méthode PLaS (Photogrammetry-based method for Landslide Study). Elle est basée sur le principe de la photogrammétrie qui est utilisée à la fois pour la génération du modèle 3D de la surface sous la forme de nuages de points et pour le calcul des déplacements 3D en surface pour le suivi de son évolution. Cette méthode est appliquée à l'étude de l'évolution du glissement du Chambon entre avril 2016 et juillet 2016. Elle permet d'identifier les zones stables et en mouvement et fournit une valeur et une direction des déplacements 3D sensiblement égales aux valeurs mesurées.

Mots clés : mouvement de versant / photogrammétrie / corrélation d'image / nuage de points / déplacements 3D

Abstract – The PLaS method to quantify 3D displacements – application to Chambon landslide (Isère). A method to study landslides without vegetation is developed: the PLaS method (Photogrammetry-based method for Landslide Study). It is based on photogrammetry process which is used both to generate points cloud and calculate 3D displacements. The evolution of Chambon landslide is studied with this method from April 2016 and July 2016. The method allows to identify stable and unstable zones and provides values and directions of the 3D displacements substantially equal to the measured values.

Keywords: landslide / photogrammetry / image correlation / points cloud / 3D displacements

1 Introduction

Le suivi des déformations en surface des mouvements de versant, complémentaire du suivi en profondeur, est essentiel pour comprendre leur mécanisme, leur comportement et gérer le risque vis-à-vis des enjeux (infrastructures de transports, bâtiments et personnes). Deux types d'instrumentation sont possibles : instrumentation localisée ou globale. Des données ponctuelles peuvent être fournies par des extensomètres (Dubois *et al.*, 2014), la géodésie (Dubois *et al.*, 2014) ou des relevés GPS type géocubes (GéoCube, 2016). Ces données sont précises, robustes mais onéreuses et nécessitent l'intervention sur sites pour certaines. Des données plus spatialisées sont obtenues par interférométrie radar (Nagler *et al.*, 2002 ; Tantiannuparp *et al.*, 2013), par lasergrammétrie terrestre et aéroportée (Abellán *et al.*, 2010 ; Jaillet *et al.*, 2011 ; Lague *et al.*, 2013 ; Kasperski, 2008 ; Oppikofer *et al.*, 2009 ; Remondino *et al.*, 2004) et imagerie (Delacourt *et al.*, 2004 ; Stumpf *et al.*, 2015 ; Westoby *et al.*, 2012). L'intérêt de ces dernières technologies est de ne nécessiter aucun matériel au sol dans les zones à ausculter qui peuvent être dangereuses d'accès.

Des travaux précédents ont montré l'intérêt et l'apport de l'imagerie pour l'étude de l'évolution des mouvements de terrain à partir d'images satellites (Casson, 2002 ; Casson *et al.*, 2005 ; Eltner *et al.*, 2016 ; Kaab, 2000 ; Travelletti, 2013 ; Stumpf *et al.*, 2014) ou terrestres (Eltner *et al.*, 2016 ; Roncella *et al.*, 2014 ; Stumpf *et al.*, 2015 ; Travelletti *et al.*, 2012). En particulier à partir de deux images, un nuage de point de la surface étudiée peut être généré par photogrammétrie (Bonneval, 1972 ; Egels et Kasser, 2001). La comparaison des nuages générés à différentes dates permet ainsi d'étudier l'évolution de la surface (Chanut *et al.*, 2016). Différents outils pour calculer les déplacements 3D (de nuages de points construits par photogrammétrie ou lasergrammétrie) ont été développés et fournissent des informations plus ou moins riches. Une première approche peut consister à estimer les déplacements 3D par le calcul d'une distance entre les nuages de points. Si plusieurs distances peuvent être définies, Lague définit celle qui semble la plus pertinente, la distance M3C2 (Lague *et al.*, 2013) qui correspond à la distance moyenne suivant la normale au voisinage de chaque point. Des approches plus poussées visent à suivre l'évolution d'objets de la surface. Oppikofer développe le concept de matrice de roto-translation pour définir le mouvement de certains blocs remarquables à partir

★ Auteur de correspondance : marie-aurelie.chanut@cerema.fr

Fig. 1. Localisation du glissement du Chambon.

Fig. 1. Chambon landslide location.

d'une translation et d'une rotation (Oppikofer *et al.*, 2009). Cette méthode ne permet cependant pas d'effectuer une analyse globale de la surface (Stumpf *et al.*, 2015). D'autres outils, plus spécifiques à l'imagerie, sont basés sur des techniques de corrélation d'images (Leprince *et al.*, 2007). En aérien, Casson *et al.* (2005) construisent un modèle numérique d'élévation (MNE) à partir de deux images Pléiades, orthorectifient ces images, effectuent la corrélation des images orthorectifiées et projettent le champ de déplacements 2D sur le MNE pour obtenir le champ de déplacements 3D. En terrestre, Travelletti *et al.* (2012) effectuent d'abord la corrélation des images prises depuis un point de vue fixe puis orthorectifient le champ de déplacements à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT). Dans la même optique que les deux travaux cités ci-dessus, nous proposons, à partir d'images terrestres, une méthode de quantification des déplacements 3D de la surface d'un mouvement de versant : la méthode PLaS (Photogrammetry-based method for Landslide Study). Cette méthode, plus simple et plus automatique, se fonde sur les nuages de points sans interpolation de MNE et ne nécessite pas de phase d'orthorectification. Elle est basée sur les propriétés de la photogrammétrie qui permettent de déduire les coordonnées 3D des points à partir de leurs coordonnées image.

Après la présentation du site du glissement du Chambon, nous détaillons la méthode PLaS développée et l'appliquons pour l'étude de ce glissement entre avril 2016 et juillet 2016. La méthode et les résultats obtenus sont enfin discutés notamment en les confrontant avec les données instrumentales du site et des résultats issus de la littérature.

2 Glissement du Chambon

Le glissement de terrain du Chambon affecte un versant de la vallée de la Romanche dans le massif de l'Oisans, surplombant la retenue du barrage hydroélectrique du Chambon à Mizoën dans le département de l'Isère (Fig. 1). La route RD1091 reliant Grenoble et Briançon, en tunnel au niveau du glissement, a été coupée en juin 2015 suite à un éboulement dans le tunnel en lien avec le déclenchement du glissement (Dubois *et al.*, 2016). Afin de rétablir la circulation sur la RD1091, une route de secours (RS1091) a été construite en novembre 2015 en rive opposée en attendant la construction d'un nouveau tunnel plus en profondeur dans le massif.

D'un point de vue géologique, le versant instable est constitué de schistes relativement homogènes (marnes métamorphisées) d'âge Aalénien. En surface, les schistes présentent un débit feuilleté, sont très altérés et peu résistants. En profondeur, les schistes sont plus sains et compacts.

Le glissement s'est déclenché en avril 2015 selon un mécanisme de rupture progressive et fait suite à une longue phase de pré-rupture, s'étalant sur plusieurs dizaines d'années au minimum et mettant en jeu le comportement mécanique particulier des schistes. Il est bien délimité, avec une surface en forme de cuillère, un escarpement principal en vaste arc de cercle (Fig. 2) et des déplacements présentant une double composante translationnelle et rotationnelle. Le glissement se développe sur environ 180 mètres de haut et 100 mètres de large. L'épaisseur des terrains en mouvement est de l'ordre de 40 mètres. Le bourrelet de pied est situé au fond de la retenue sous le niveau d'eau.

Fig. 2. Glissement du Chambon – avant (a : 4 juillet 2015) et après glissement (b : 7 août 2015).

Fig. 2. Chambon landslide – before (a: July the 4th of 2015) and after break (b: August the 7th of 2015).

Fig. 3. Position des cibles de mesures (instrumentation SAGE) et définition des compartiments pour le suivi opérationnel.

Fig. 3. Location of the measurement targets (SAGE instrumentation) and definition of the compartments for operational monitoring.

Deux périodes de grands déplacements ont eu lieu en juillet 2015 (Fig. 2) :

- la première du 4 au 6 juillet 2015 avec des vitesses maximales de déplacement atteintes en pied de l'ordre de 0,5 à 0,65 m/j et des déplacements totaux en tête de l'ordre de 4 à 5 mètres, le glissement s'est alors divisé en trois zones appelées compartiments 1, 2 et 3 (Fig. 3) ;
- la seconde du 25 au 27 juillet 2015 a été volontairement déclenchée par une élévation de 8,5 mètres du niveau d'eau de la retenue : les vitesses de déplacement ont dépassé 7,5 m/j. Les déplacements totaux du compartiment 1 ont été estimés à environ 15 à 20 mètres.

Depuis fin juillet 2015, les déplacements en surface du glissement se poursuivent (de l'ordre de 5 mm/j pour le compartiment 1 et 1 mm/j pour les deux autres compartiments, Fig. 4), en étroite relation avec les variations du niveau d'eau de la retenue et la pluviosité (Dubois *et al.*, 2016). Une instrumentation a été mise en place par le Conseil départemental de l'Isère pour le suivi opérationnel : un tachéomètre automatisé suit 20 cibles réparties sur le glissement et la zone réputée stable alentour (Fig. 4). La configuration du site sans végétation avec un point de vue depuis le versant opposé et l'amplitude des déplacements permettent d'utiliser l'imagerie comme approche complémentaire à ces mesures ponctuelles.

3 Méthode PLaS de quantification des déplacements 3D

Dans cette partie, nous présentons la méthode PLaS développée pour quantifier les déplacements en surface de mouvements de versant à partir de photographies terrestres. On note $\{d_i, 0=1..nb_{campagnes}\}$ les dates des campagnes d'acquisitions des photos. Les photos sont identifiées par $P_{i,j}$ où j est la j^e photos de la campagne i .

La méthode se décompose en trois étapes (Fig. 7) qui sont successivement détaillées ci-après :

- génération des nuages de points notés $\{N_i\}$ par photogrammétrie ;
- recalage des nuages de points dans un référentiel commun ;
- calcul des déplacements par corrélation d'images.

3.1 Génération des nuages de points par photogrammétrie à différentes dates

À chaque date d'acquisition d_i , une campagne de prises de vue est réalisée et une vingtaine de photographies $\{P_{i,j}\}$ convergentes vers la surface est acquise avec deux focales : une courte focale pour orienter les photos et une longue focale pour

Fig. 4. Cumul des déplacements mesurés entre le 01/08/2015 et le 13/07/2016 au niveau de la zone réputée stable (cible C9) et des compartiments 1 (cible C5), 2 (cible C12) et 3 (cible C16).

Fig. 4. Cumulative displacements measured between 01/08/2015 and 13/07/2016 in the stable zone (target C9) and compartments 1 (target C5), 2 (target C12) and 3 (target C16).

obtenir une densité forte de points au sein du nuage. Différents logiciels de photogrammétrie numérique peuvent être utilisés pour générer un nuage de point N_i à partir des photographies $\{P_{i,j}\}$, nous avons utilisé MicMac (Logiciel MicMac, 2016 ; Pierrot-Deseilligny *et al.*, 2015). Lors du traitement logiciel, les points homologues entre images sont tout d'abord recherchés. Les caméras avec respectivement la courte focale et la longue focale sont successivement calibrées et les photos associées orientées (Pierrot-Deseilligny et Clery, 2011). Enfin le modèle 3D sous forme de nuage de points N_i est généré à partir des images prises avec la longue focale pour obtenir plus de détails. Cette première étape a permis de générer :

- la série des nuages de points N_i aux différentes dates ; ils sont sans échelle et non géoréférencés ;
- les fonctions de conversion des coordonnées images en coordonnées 3D des points pour toutes les prises de vues.

3.2 Recalage des nuages de points dans un référentiel commun

3.2.1 Définition du référentiel commun

Pour comparer les nuages de points $\{N_i\}$, ils doivent être recalés dans un référentiel commun. Pour qu'un recalage soit réalisé, il est nécessaire que la zone photographiée présente des zones stables. Dans ce cas, le premier nuage de points, N_0 , qui sert de référence, peut être géoréférencé dans un repère absolu

si des points de contrôle sont disponibles, tels que des points GPS. Ces points sont visés sur plusieurs images et un changement de repère par similitude (composition d'une translation, d'une rotation et d'une homothétie) est opéré vers le repère choisi. Si ce géoréférencement n'est pas possible faute de points de contrôle, le repère (relatif) de construction du premier nuage de points est choisi comme repère et une simple mise à l'échelle du nuage est effectuée à partir de la mesure sur le terrain d'une ou plusieurs distances. Il reste maintenant à recalcr la séquence des nuages de points dans ce repère.

3.2.2 Géoréférencement

La méthode de recalage mise en place est montrée sur l'exemple du recalage du nuage N_i recalé avec le nuage N_0 . Un premier recalage grossier est effectué nuage par nuage par la méthode « Iterative Closest Point » (ICP) (Besl et McKay, 1992) implémentée dans CloudCompare (CloudCompare, 2015). Cette méthode minimise la distance entre les deux nuages, par itérations successives. Ce recalage est approché puisque des déplacements ont pu ou se sont produits dans certaines zones entre les deux dates. Ceci permet uniquement de recalcr approximativement les nuages afin de disposer d'une configuration initiale favorable pour le second recalage plus fin.

La nouveauté de la méthode réside dans le point suivant. Le second recalage est basé sur la recherche automatique de points

Fig. 5. Points homologues pour le recalage en noir : points homologues en zone stable, servant au calcul de la similitude (centre en jaune) et à la validité du recalage (centre en vert), points homologues en mouvement en rouge.

Fig. 5. Homologous points for registration (in black): homologous points in a stable area, used for the calculation of the similarity (center in yellow) and the validity of the registration (center in green), homologous points in moving zone in red.

similaires dits homologues entre les nuages N_0 et N_i . Pour cela, on sélectionne deux images : $P_{0,j1}$ et $P_{i,j2}$, prises aux dates d_0 et d_i avec des points de vue similaires. On recherche alors les points homologues entre ces deux images. Il s'agit de points homologues dans le temps. À partir des fonctions de conversion construites lors de la première étape, on déduit les coordonnées 3D des points homologues à partir de leurs coordonnées image (Fig. 5). Pour déterminer le recalage fin, on sélectionne les points homologues en zone stable (points noirs – Fig. 5) au sein des nuages N_0 et N_i . Par définition, ces points doivent se superposer deux à deux.

Cet ensemble des points homologues stables est divisé en deux :

- un sous-ensemble de calcul de la similitude définissant le recalage fin (points noirs centre jaune – Fig. 5) ;
- un sous-ensemble de test de la validité du recalage obtenu (points noirs centre vert – Fig. 5).

Le recalage est validé si l'écart moyen calculé sur les positions des points homologues sur le jeu test est du même ordre de grandeur que l'écart calculé sur le jeu de recalage (ratio maximal égal à 1,25). Appliquée à tous les couples de nuages (N_0 , N_i), cette méthode permet de disposer d'une série de nuages de points référencés dans un même référentiel et donc comparables.

Le processus de recherche des points homologues dans le temps utilisé ci-dessus s'apparente à de la corrélation d'images. Dans notre cas, c'est l'algorithme « Scale Invariant Feature Transform » (SIFT) (Lowe 2004) qui est utilisé et implémenté dans MicMac : des points singuliers au sein de différentes images sont déterminés puis appariés. Le temps de calcul de cette méthode est très rapide (environ 2–3 min) par rapport aux techniques plus classiques de corrélation fréquentielles (Leprince *et al.*, 2007) d'images (environ 1 h). Dans ce dernier cas, la recherche des points homologues est alors réalisée en parcourant, *via* un certain pas, les pixels d'une première photographie et en cherchant les pixels les plus ressemblants dans une seconde photographie. Les deux approches relèvent de la corrélation d'images. La méthode retenue permet un traitement rapide puisqu'un plus faible nombre de points est calculé et que l'algorithme de détermination des points singuliers est plus rapide surtout en cas de fortes modifications de surface.

Fig. 6. Calcul du déplacement de chaque point à partir de ses coordonnées 3D aux deux dates.

Fig. 6. Calculation of the displacement for each point from its 3D coordinates on both dates.

3.3 Calcul des déplacements

Dans cette partie, on profite du calcul des points homologues par corrélation d'image réalisé dans la partie précédente. À l'aide des fonctions de conversion des coordonnées images en coordonnées 3D par image, on dispose des coordonnées 3D aux différentes dates de quelques dizaines à quelques centaines de points. Il est donc possible de suivre l'évolution des différentes zones étudiées en calculant pour chaque point la valeur de son déplacement et sa direction (comme indiqué sur la Fig. 6).

4 Conclusion

La méthode PLaS (Fig. 7) permet, à partir d'une série d'images, de construire les nuages de points associés, de les recaler et de calculer l'évolution de la surface d'un mouvement de versant. Cette méthode de traitement est rapide. Une fois l'acquisition des photographies réalisée, une demi-journée est nécessaire pour obtenir à partir de 20–25 photos les résultats de déplacements. Le temps de traitement est essentiellement du temps machine (processus de construction photogrammétrique et calcul des points homologues dans le temps). La méthode a été rendue la plus automatique possible. Ceci présente l'avantage de limiter la subjectivité de l'opérateur : notamment, pour la détermination des points homologues, les erreurs (manuelles) sont de cette façon minimisées. D'autre part, un grand nombre de points homologues (quelques milliers) est déterminé alors que manuellement, seulement quelque(s) dizaine(s) de points seraient collectés.

La comparaison temporelle des nuages de points tire profit de la construction des nuages de points par photogrammétrie alors que la plupart des méthodes d'exploitation des nuages de points (carte des distances, matrice de roto-translations) ne le font pas. Les valeurs et les directions de déplacements sont obtenues de façon automatique et sur de nombreux points. Il n'y a donc pas besoin de développer des outils pour déterminer les déplacements sur un MNT, le calcul des déplacements est réalisé directement.

Comme toutes les méthodes basées sur les images, cette méthode requiert une surface sans végétation et des conditions météorologiques favorables pour réaliser les acquisitions. Par ailleurs, l'aspect de la surface doit rester similaire dans le temps pour que la corrélation d'images soit efficace. Sinon, en cas d'éboulement par exemple, une autre exploitation des nuages de points devra être réalisée avec les cartes de distances entre nuages par exemple.

Fig. 7. Principe de la méthode PLAS.

Fig. 7. Principle of the PLAS method.

5 Résultats

Dans cette partie, on applique la méthode PLAS, présentée dans la Section 3, pour le suivi du glissement du Chambon entre avril 2016 et juillet 2016.

5.1 Construction et recalage des nuages

Quatre campagnes d'acquisition ont été réalisées les 19/04/16, 19/05/16, 13/06/16 et 13/07/16 depuis la route de secours sur le versant opposé du barrage du Chambon (Fig. 1). La végétation en contrebas de la route contraint les points de prises de vue du glissement et une vingtaine de photos est acquise : une dizaine avec une focale 28 mm et une dizaine avec une focale 105 mm (Fig. 8). Les quatre nuages de points sont construits aux différentes dates : ils sont denses (plus de trois millions de points) et l'erreur de construction des nuages est faible (moins de 1 pixel lors du processus de détermination des points homologues et de l'orientation des caméras). Le nuage modélisant la surface le 19/04/16 est présenté sur la Figure 9.

Les quatre nuages sont ensuite recalés : le nuage 0 (19/04/16) est géoréférencé dans le repère local utilisé pour les mesures géodésiques des cibles (Fig. 3) et les nuages 1, 2 et 3 (respectivement construits aux dates 19/05/16, 13/06/16, 13/07/16) sont recalés par rapport au nuage 0. Pour cela, le processus de corrélation d'images dans le temps a été appliqué. Entre deux dates, trois images avec des angles de prises de vue différents ont

été utilisées et les résultats superposés. Un exemple est montré sur la Figure 10 : les points homologues déterminés entre les deux photos (19/04 et 19/05) sont indiqués. À noter que pour des raisons de clarté, la couleur noire des points homologues n'est pas affichée, seules les couleurs du centre (jaune et verte) sont conservées. Le recalage du nuage du 19/05/16 a été effectué sur le jeu de points jaune (1000 points) : la similitude déterminée conduit à un écart moyen entre points homologues égal à $8,5 \pm 6,3$ cm. Le test du recalage est réalisé sur le jeu de points verts (1000 points) : après transformation par similitude des points datés du 19/05, l'écart entre les points homologues acquis le 19/04 et le 19/05 est égal à $8,1 \pm 5,86$ cm. L'écart sur le jeu test est inférieur à celui sur le jeu de recalage. La similitude déterminée est ainsi validée.

5.2 Évolution du glissement

Les points homologues (jaunes et verts) en zone stable ont permis de déterminer et valider le recalage des nuages. Une fois les nuages recalés (application des similitudes), le déplacement 3D des points homologues dans la zone supposée en mouvement (points rouges) peut être étudié.

5.2.1 Identification de différentes zones

Dans un premier temps, nous étudions quelles sont les zones en mouvement d'après les résultats fournis par notre méthode. Sur l'exemple de la période du 19/04/16 au 19/05/16,

Fig. 8. Campagne du 19/04/16—exemples d’images du glissement du Chambon prises depuis le versant opposé avec une focale 28 mm (a et b) et 105 mm (c et d), localisation des photos a et c, point P2 [Fig. 1](#), localisation des photos b et d, point P1 [Fig. 1](#).

Fig. 8. Campaign of 19/04/16—examples of images of the Chambon landslide taken from the opposite slope with a focal length of 28 mm (a and b) and 105 mm (c and d), location of photos a and c, point P2 [Fig. 1](#), location of photos b and d, point P1 [Fig. 1](#).

Fig. 9. Nuage de points (a) et MNT ombré (b) modélisant la surface du glissement du Chambon le 19/04/16.

Fig. 9. Points cloud (a) and shaded MNT (b) modeling the surface of the Chambon landslide on 19/04/16.

les valeurs et directions des déplacements sont représentées sur les [Figures 11](#) et [12](#). La direction du vecteur déplacement est définie par les deux angles couramment utilisés en géologie : azimuth et élévation. À la différence de la représentation stéréoscopique de l’orientation des plans, les vecteurs déplacements évoluent dans toute la sphère et nous travaillons

donc dans les deux hémisphères : les points de l’hémisphère supérieur ($E > 0$) sont représentés en noir, ceux de l’hémisphère inférieur ($E < 0$) en orange ([Fig. 12a](#)). Ensuite pour la visualisation des valeurs de déplacements en fonction de leurs directions, une représentation par hémisphère a été préférée ([Fig. 12b](#) et c). L’échelle de couleur pour les valeurs

Fig. 10. Recherche de points homologues entre le 19/04/2016 (a) et 19/05/2016 (b) — exemple sur deux photos prises avec un point de vue du glissement similaire (en jaune, les points en zone stable utilisés pour le recalage, en vert les points en zone stable utilisés pour valider le recalage et en rouge les points en mouvement potentiel).

Fig. 10. Search for homologous points between 19/04/2016 (a) and 19/05/2016 (b) — example on two photographs taken with a similar point of view (in yellow, the points in the stable zone used for the registration, in green the points in the stable zone used to validate the registration and in red the points in potential movement).

de déplacements a été adaptée à la valeur seuil déterminée lors du recalage à savoir 9 cm.

À partir de la représentation des directions par projection stéréoscopique (Fig. 12), trois zones sont identifiées : ZE1, ZE2 et ZE3. La définition des zones suit une homogénéité de direction (azimut et élévation, Fig. 12a) et de valeur (Fig. 12c). Les zones ZE1 et ZE2 sont reportées sur la Figure 11b pour étudier leur répartition spatiale. Elles correspondent à des parties de terrain disjointes. À ce stade, on observe que la zone d'étude se divise en trois zones avec des directions de déplacements différents : ZE1 est caractérisée par une direction homogène moyenne d'azimut $149 \pm 10^\circ$ et d'élévation $-38 \pm 8^\circ$, ZE2 présente une direction différente mais homogène (azimut égal à $140 \pm 24^\circ$ et élévation $-17 \pm 8^\circ$) et ZE3 dont les vecteurs direction sont très dispersés avec tantôt une élévation positive, tantôt une élévation négative. Nous intégrons maintenant le paramètre valeur de déplacement dans l'analyse : la zone ZV1 est caractérisée par des déplacements inférieurs à 9 cm et considérés comme nuls ; elle correspond à la zone terrain ZE3. La zone ZV5 présente des déplacements non nuls et homogènes caractérisés par une valeur moyenne égale à 27 cm et un écart-type de 6 cm. Elle correspond à la zone ZE2. Enfin, trois zones ZV2, ZV3 et ZV4 présentent des déplacements d'ordre de grandeur différent : respectivement égaux à 60 ± 9 cm, 92 ± 15 cm et 118 ± 6 cm. Ces trois zones sont des subdivisions de la zone ZE1. Au sein de cette dernière zone, des sous-zones existent donc avec des vitesses de déplacements différentes.

Au final, on observe donc un découpage de la zone d'étude en trois parties :

- une zone ZE3/ZV1 de déplacements considérés comme nuls et de directions de déplacements très dispersés, qui peut être considéré comme du bruit vis-à-vis d'un mouvement nul ;
- une zone ZE2/ZV5 caractérisée par des déplacements faibles et une direction de déplacement homogène et cohérente ;
- une zone ZE1 caractérisée par une direction de déplacement homogène et différente de ZE2/ZV5 et des sous-zones de vitesse de déplacements bien délimitées (ZV2, ZV3 et ZV4).

5.2.2 Évolution de la zone ZE1

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'évolution de la surface de la zone ZE1 entre le 19/04/16 et le 13/07/16 (Fig. 13). Un profil (coupe 2D) est réalisé suivant la direction moyenne déterminée au paragraphe suivant (Fig. 13a). Les profils déterminés les 19/04/16, 19/05/16 et 13/06/16 sont superposés sur la Fig. 13b. Sur les trois périodes (entre le 19/04/16 et le 19/05/16, entre le 19/05/16 et le 13/06/16, entre le 13/06/16 et le 13/07/16), les valeurs de déplacements sont représentées sur le MNT ombré (Fig. 13c, e et g). Les vecteurs directions sur une portion du profil sont indiqués sur la Figure 13d, f et h.

À l'échelle pluri-métrique du profil, les profils aux différentes dates sont très proches comme le montre la superposition des profils (Fig. 13b). On constate que les vecteurs déplacements suivent la pente du terrain naturel et leur direction est relativement constante dans le temps (Fig. 13d, f et h). Les déplacements sont respectivement égaux en moyenne sur les trois périodes à 84 ± 16 cm, 83 ± 16 cm et 82 ± 9 cm. Les vecteurs directions calculés, globalement parallèles à la pente, excluent un phénomène de basculement ou fauchage et attestent d'un mécanisme de glissement d'une longueur très supérieure à l'épaisseur.

6 Discussion

6.1 Comparaison avec les données : observation terrain et mesures de déplacements

Nos calculs ont conduit à la définition de trois zones ZE1, ZE2 et ZE3. Les géologues avaient défini fin juillet 2015, suite aux phases de grands déplacements, trois compartiments C1, C2 et C3 en complément de la zone stable. Nous constatons que ZE3 correspond à la zone stable, ZE1 au compartiment 1 et ZE2 à la réunion des compartiments 2 et 3. L'analyse des valeurs et des vecteurs de direction indique un comportement similaire entre ces deux derniers compartiments et ne permet pas de les individualiser. La différenciation des deux

Glissement du Chambon 19/04 - 19/05

Fig. 11. Valeur (a) et direction normée (b) des déplacements représentées sur le MNT ombré, les flèches grisées indiquent une direction de déplacement sous la surface du MNT.

Fig. 11. Value (a) and normalized direction (b) of the displacements represented on the shaded MNT, the gray arrows indicate a direction of displacement under the surface of the DTM.

Fig. 12. Représentation des directions des déplacements par projection stéréoscopique : a – la couleur du point (associée au vecteur direction) indique si l'élévation est positive ou négative, b et c – la couleur du point indique la valeur du déplacement pour les déplacements dont l'élévation est respectivement positive et négative.

Fig. 12. Representation of the directions of displacements by stereoscopic projection: a – the color of the point (associated with the direction vector) indicates whether the elevation is positive or negative, b and c – the color of the point indicates the displacement value for the displacements, elevation is respectively positive and negative.

compartiments a été postulée par les géologues suite à l'analyse du terrain (fracture, faille).

En termes de vitesse de déplacements, les mesures tachéométriques au niveau de la zone stable sur la période du 19/04/16 au 19/05/16 indiquent un déplacement moyen de 6 ± 2 mm alors que le calcul fournit une valeur égale à 7 ± 4 cm (Fig. 14a). Concernant le compartiment 1 (Fig. 14b), les valeurs obtenues au voisinage des points de mesures (ZV2 : 60 ± 9 cm) sont du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées (C5, C6 et C7 : 50 ± 6 cm). Par contre, on constate que des déplacements plus grands ont lieu au niveau des zones ZV3 (92 ± 15 cm) et ZV4 (118 ± 6 cm) ; ces valeurs correspondent à plus du double des valeurs mesurées. Cette tendance est confirmée dans le temps. Par ailleurs, concernant les compartiments 2 et 3 (Fig. 14c), les points de mesures sont situés en partie supérieure. Cette zone est englobée dans ZE3. Les valeurs de déplacements moyens mesurés entre le 19/04/16 et le 19/05/16 sont respectivement égales à 3 ± 0 cm (moyenne cibles C10 à C12) et 5 ± 1 cm

(moyenne des cibles C13 à C17). Ces valeurs inférieures à 9 cm ne sont pas suffisantes pour être détectées comme un mouvement réel dans le cadre de notre démarche. Par contre, une analyse sur une période plus longue le permettrait. Toutefois, notre calcul met en évidence des déplacements (Fig. 14d) sur les parties basses des compartiments 2 et 3 (zone notée ZV5 Fig. 11b). Même si les déplacements ne sont pas très élevés (valeur en moyenne égale à 27 ± 6 cm) et sont inférieurs à ceux du compartiment 1, il faut noter qu'ils existent ce que ne permet pas de montrer l'instrumentation mise en place. On constate donc que les déplacements fournis par la méthode proposée sont du même ordre de grandeur que les données mesurées et sont cohérents avec les observations de terrain. Notre méthode apporte de l'information supplémentaire dans les zones orphelines d'instrumentation et montre que les valeurs mesurées sous-estiment les déplacements sur l'ensemble de la surface en mouvement.

Concernant le mécanisme, nos calculs de directions des déplacements et leur évolution corroborent les observations

Fig. 13. Profils des déplacements au niveau de la zone ZE1 : a – coupe réalisée, b – superposition des profils et des vecteurs directions des 19/04, 19/05 et 13/06, c, e et g : valeurs des déplacements représentées sur le MNT ombré les 19/04, 19/05 et 13/06, d, f et h : représentation des directions des déplacements sur une portion du profil (couleur de la flèche fonction de la valeur du déplacement) aux dates 19/04, 19/05 et 13/06.

Fig. 13. Profiles of displacements of ZE1 zone : a – the cut, b – superposition of profiles and vectors directions of 19/04, 19/05 and 13/06, c, e and g : values of the displacements represented on the shaded DTM on 19/04, 19/05 and 13/06, d, f and h : representation of the directions of displacements on a portion of the profile (color of the arrow depending on the value of the displacement) on 19/04, 19/05 and 13/06.

Fig. 14. Déplacements (moyennes et écart-type) calculés et mesurés au niveau de ZE3 (a), ZE1 (b), compartiments 2 et 3 (c) et ZE2 (d) en fonction du temps.

Fig. 14. Displacements (mean and standard deviation) calculated and measured on ZE3 (a), ZE1 (b), compartments 2 and 3 (c) and ZE2 (d) zones.

terrain faites depuis le déclenchement du mouvement à savoir un mécanisme de glissement.

6.2 Comparaison avec d'autres méthodes

Dans le contexte de travail (distance entre le capteur et la surface étudiée égale à 600 m, utilisation d'une focale égale à 105 mm), le pixel des photographies représente 3,4 cm. Par construction et contrôle des fichiers de construction photogrammétrique, la précision du nuage de points est de l'ordre du pixel, soit 3,4 cm. Les déplacements déduits sont donc précis à 6,8 cm. Les résultats obtenus lors du recalage nous conduisent à fixer un seuil de déplacements de 9 cm pour définir la zone stable. On déduit que la méthode de recalage proposée ajoute une erreur supplémentaire inférieure au pixel (2,2 cm).

Dans la suite, nous mettons cette valeur de 9 cm seuil de l'existence d'un déplacement en lien avec d'autres résultats. Pour le glissement de La Clapière, Casson utilise des images aériennes de résolution 1 m pour l'étude des déplacements sur des périodes de plusieurs années (Casson *et al.*, 2005). La précision obtenue sur les cartes de déplacements est comprise entre 4,9 m et 13,8 m pour des déplacements allant jusqu'à 70 m. Pour le glissement/coulée de Super-Sauze, Stumpf estime entre 10 cm et 20 cm l'erreur des modèles photogrammétriques après recalage à l'aide de points de contrôle mesurés par GNSS/DGPS ce qui le conduit à définir une valeur comprise entre 20 et 40 cm de déplacements pour détecter un changement de la surface (Stumpf *et al.*, 2015). Sur ce même

glissement de Super-Sauze, Travelletti calcule le champ de déplacements à l'aide d'images prises selon une prise de vue fixe (distance entre appareil photo et surface variant entre 300 et 900 m). Au niveau des déplacements en zone stable, l'erreur moyenne du déplacement est comprise entre 3 et 11 cm avec un écart-type de 10 à 31 cm.

Ces résultats peuvent également être mis en parallèle avec des mesures effectuées par GPS différentiel ou DGPS (erreur 5 cm) ou par pointage sur une image orthorectifiée projetée sur une acquisition Lidar (erreur 25 cm) (Stumpf *et al.*, 2015). On constate donc que la méthode PLaS permet d'obtenir des résultats précis voire plus précis que ceux issus de la littérature et comparable à des techniques de mesure type DGPS. L'erreur commise au niveau des zones stables conditionne en effet les déplacements identifiables et permet également de fournir une précision sur ceux-ci.

7 Conclusions

La méthode PLaS permet d'identifier les zones en mouvements par rapport aux zones stables, de fournir un ordre de grandeur des déplacements et d'accéder à la dynamique du mouvement *via* les directions de déplacements. L'information fournie est spatiale alors que celle fournie par la surveillance classique par théodolite est ponctuelle : quelques milliers de valeurs par rapport à une vingtaine de mesures. Contrairement à ces mesures ponctuelles précises, la valeur des déplacements est approchée.

Cette méthode, comme cela a été indiqué précédemment, ne peut pas être utilisée seule pour le suivi d'un glissement surtout si des enjeux (forts) existent pour des raisons de précision et de délais de traitement des données. Une instrumentation *in-situ* permet d'obtenir une première valeur dès la seconde acquisition dans un intervalle inférieur à 1 h alors que même si le site étudié évolue vite, étant donné le temps de traitement, il n'est pas pertinent pour une étude en temps réel de descendre en dessous d'une campagne par jour. Par contre, comme cela a été le cas pour le glissement du Chambon, en complément de l'instrumentation placée, une approche par photogrammétrie peut être engagée et pertinente dans plusieurs cas : zones dangereuses d'accès où il n'est pas possible de mettre en place des cibles, impossibilité d'accès à une partie du site ou limitation du nombre de cibles/repères de surveillance en lien avec les contraintes budgétaires.

Par ailleurs, pour des travaux exploratoires (pas d'enjeux humains ou matériels), l'approche photogrammétrique peut être utilisée seule ou en complément à d'autres dispositifs et permet des premières conclusions quant au mécanisme en jeu ou à l'évolution de la surface.

Remerciements. Les auteurs remercient le Conseil départemental de l'Isère pour leur avoir fourni les mesures des déplacements par tachéomètre automatisé du glissement du Chambon entre avril et juillet 2016.

Références

- Abellán A, Calvet J, Vilaplana JM, Blanchard J. 2010. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology* 119: 162–171.
- Besl PJ, McKay ND. 1992. A method for registration of 3D shapes. *IEEE T Pattern Anal* 14 (2): 239–256.
- Bonneval H. 1972. Photogrammétrie générale. Collection scientifique de l'IGN, Tome 1 : Enregistrement photographique des gerbes perspectives, 232 p., Tome 2 : Restitution : méthodes et appareils, 361 p.
- Casson B. 2002. Apports de l'imagerie optique haute résolution pour l'étude 3D des glissements de terrain. Thèse de doctorat.
- Casson B, Delacourt C, Allemand P. 2005. Contribution of multi-temporal remote sensing images to characterize landslide slip surface – application to the La Clapière landslide (France). *Nat Hazards Earth Syst Sci* 5: 425–437.
- Chanut M-A, Dauphin S, Coulibaly J, Dubois L, Duranthon J-P. 2016. Modélisation 4D des mouvements de terrain : approche basée sur la photogrammétrie. *Rev Fr Photogramm Télédélect*, soumis.
- CloudCompare v2.6.1, 2015. [GPL software]. EDF R&D, Telecom ParisTech. Available on: <http://www.cloudcompare.org/> (last consult: 02/12/2016).
- Delacourt C, Allemand P, Casson B, Vadon H. 2004. Velocity field of the “La Clapière” landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images. *Geophys Res Lett* 31: L15619.
- Dubois L, Chanut M-A., Duranthon J-P. 2014. Amélioration continue des dispositifs d'auscultation et de surveillance intégrés dans le suivi du versant instable des Ruines de Séchilienne. *Géologues* 182: 50–55.
- Dubois L, Dauphin S, Rul G. 2016. Le glissement du Chambon : évolution du phénomène et gestion de crise. *Rev Fr Géotech* 148: 2.
- Egels Y, Kasser M. 2001. Photogrammétrie numérique. Paris : Hermes Science publications, 379 p.
- Eltner A, Kaiser A, Castillo C, Rock G, Neugirg F, Abellán A. 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments. *Earth Surf Dyn* 4: 359–389.
- GéoCube. 2016. IGN. Available on: <http://www.ign.fr/institut/innovation/geocube> (last consult : 02/12/2016).
- Jaillet S, Ployon E, Villemin T. 2011. Images et modèles 3D en milieux naturels. Collection Edytem, n 12, 978–2–918435–04–4.
- Kaas A. 2000. Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: new techniques and applications. *Phys Chem Earth(B)* 25 (9): 765–770.
- Kasperski J. 2008. Confrontation des données de terrain et de l'imagerie multi-sources pour la compréhension de la dynamique des mouvements de versants. PhD Univ. Lyon 1.
- Lague D, Brodu N, Leroux J. 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 82: 10–26.
- Leprince S, Ayoub F, Klingner Y, Avouac JP. 2007. Co-Registration of optically sensed images and correlation (COSICorr): an operational methodology for ground deformation measurements, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2007)*, Barcelona.
- Logiciel MICMAC. Disponible sur: <http://logiciels.ign.fr/?-Micmac,3-> (last consult : 02/12/2016).
- Lowe DG. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int Comput Vision* 60 (2): 91–110.
- Nagler T, Rott H, Kamelger A. 2002. Analysis of landslides in alpine areas by means of SAR interferometry, *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, Canada*.
- Oppikofer T, Jaboyedoff M, Blikra L, Derron M-H., Metzger R. 2009. Characterization and monitoring of the A° knes rockslide using terrestrial laser scanning. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9: 1003–1019.
- Pierrot-Deseilligny M, Clery I. 2011. Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. In: Remondino F, El-Hakim S, eds. 4th ISPRS international workshop 3D-ARCH 2011: “3D virtual reconstruction and visualization of complex architectures”. Trento (Italy): ISPRS, pp. 269–276.
- Pierrot-Deseilligny M, Belvaux J, Choqueux G, Deveau M, Girod L. 2015. MicMac, Apero and Other Beverages in a Nutshell. Marne-la-Vallée: ENSG, 365 p.
- Remondino F, Guarnieri A, Vettore A. 2004. 3D modeling of close-range objects: Photogrammetry or laser scanning. In: *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 5665, 216–225. DOI: [10.1117/12.586294](https://doi.org/10.1117/12.586294).
- Roncetta R, Forlani G, Fornari M, Diotri F. 2014. Landslide monitoring by fixed-base terrestrial stereo-photogrammetry. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci* 2: 297–304.
- Stumpf A, Malet J-P, Allemand P, Ulrich P. 2014. Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pleiades satellite images. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 95: 1–12.
- Stumpf A, Malet J-P, Allemand P, Pierrot-Deseilligny M, Skupinsk G. 2015. Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology* 231: 130–145.
- Tantianuparp P, Shi X, Zhang L, Balz T, Liao M. 2013. Characterization of landslide deformations in three gorges area using multiple InSAR Data Stacks. *Remote Sens* 5: 2704–2719. DOI:[10.3390/rs5062704](https://doi.org/10.3390/rs5062704).

- Travelletti J. 2013. Imagerie multi-paramètres et multi-résolutions pour l'observation et la caractérisation des mécanismes de glissements-coulées. Thèse de doctorat.
- Travelletti J, Delacourt C, Allemand P, *et al.* 2012. Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslide monitoring: application, potential and limitations. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 70: 39–55.
- Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM. 2012. “Structure-from-motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300–314.

Citation de l'article : Marie-Aurélié Chanut, Johan Kasperski, Laurent Dubois, Samuel Dauphin, Jean-Paul Duranthon. Quantification des déplacements 3D par la méthode PLaS – application au glissement du Chambon (Isère). Rev. Fr. Geotech. 2017, 150, 4.