Mém. Soc. vaud. Sc. nat. 25: *341-352.* *ISSN 0037-9611*

28. Corrélation multi-dates de données de scanner laser terrestre pour la caractérisation de la cinématique de glissements de terrain

par

Julien TRAVELLETTI[1, 2], *Jean-Philippe MALET*[1] *& Christophe DELACOURT*[3]

Résumé.–TRAVELLETTI J., MALET J.-P. & DELACOURT C., 2013. Corrélation multi-dates de données de scanner laser terrestre pour la caractérisation de la cinématique de glissements de terrain *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 341-352.
La caractérisation du champ de déplacement est un élément indispensable à la compréhension de la cinématique et des mécanismes de rupture des glissements de terrain. Durant cette dernière décennie, les possibilités d'utilisation de nuages de points acquis par scanner laser terrestre (TLS) appliqué au suivi de glissements de terrain ont été largement démontrées. Toutefois, l'information géométrique contenue dans les nuages de points est rarement exploitée de manière exhaustive. Ce travail présente une approche simple pour dériver un champ de déplacement 3D en exploitant l'ensemble de l'information contenue dans les nuages de points. La performance de cette approche est testée sur le pied du glissement de Super-Sauze (Alpes françaises du Sud, région de Barcelonnette). Le principe de la méthode repose sur une réduction du problème 3D d'appariement d'objets à un problème 2D rendant possible l'utilisation d'une fonction 2D de corrélation croisée normalisée. Les déplacements obtenus sont comparés à ceux mesurés par GPS différentiel et ceux dérivés de la méthode ICP standard (point itératif le plus proche). Une erreur moyenne de ±0.04 m est déterminée. D'Octobre 2007 à Mai 2010, des déplacements du pied de la coulée de 0.04 m à 10.76 m entre deux acquisitions consécutives sont observés, pour un déplacement cumulé total de 21.80 m.

Mots clés: scanner laser terrestre, LiDAR, glissements de terrain, suivi de déplacements, corrélation.

Abstract.–TRAVELLETTI J., MALET J.-P. & DELACOURT C., 2013. Multi-date correlation of Terrestrial Laser Scanning data for the characterization of landslide kinematics. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 341-352.
The characterization of the complete displacement field is an important prerequisite to understand landslide kinematics and failure mechanism. In this work, a simple approach for computing the 3D displacement field of landslides is presented using repeated TLS acquisitions by taking full advantage of the geometric information from consecutive point clouds. The performance of the approach is

[1]Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Université de Strasbourg (EOST), 5 rue René Descartes, F-67084 Strasbourg Cedex; tél.: +33 (0)3 90 85 01 14.
E-mail: julien.travelletti@romandie.com
[2]GEOPHEN-LETG, CNRS UMR 6554, Université de Caen Basse-Normandie, F-14032 Caen Cedex.
[3]Université Européenne de Bretagne, Institut Universitaire de la Mer, CNRS UMR 6538, Université de Brest, France.

CODEN: MSVNAU
2013 © Société vaudoise des Sciences naturelles
Droits de reproduction réservés

being tested at the toe of the Super-Sauze landslide (South French Alps). The core of the approach is based on the simplification of a 3D matching problem in a 2D matching problem by using a 2D statistical normalized cross correlation function. The computed displacements are compared with the 3D displacements computed with an Iterative Closest Point algorithm (usually used for point clouds registration) and benchmark displacements measured with Differential Global Positional System allow. An average accuracy of ±0.04 m is determined. Displacements of the landslide toe ranging from 0.04 m to 10.76 m between consecutive TLS acquisitions are determined, leading to a cumulated displacement up to 21.80 m from October 2007 to May 2010. Areas in the landslide toe with different kinematics are highlighted.

Introduction

La technique du scanner laser terrestre (TLS) a été développée avec l'ambition d'avoir une représentation maximale au niveau du détail géométrique d'un objet. Il permet de mesurer très rapidement (quelques secondes) des milliers de points 3D (XYZ) sur une zone d'un objet de manière automatique et systématique. L'objet est ainsi mesuré dans sa globalité. La précision d'un tel système peut être représentée par l'écart-type sur chaque point mesuré (erreur centimétrique à 100 m; Lichti & Jamtsho 2006). Cependant, la précision du résultat global est meilleure que la précision des points uniques grâce à la très haute densité d'information spatiale (Lindenbergh & Pfeifer 2005, Abellán *et al.* 2009), ce qui confère à la technique TLS un avantage considérable par rapport à d'autres techniques géodésiques (eg. tachéomètre, GPS).

Les possibilités d'utilisation relativement récentes de la technique TLS ont été largement démontrées durant cette dernière décennie pour le suivi de processus géomorphologiques à cinématique lente (déplacements de quelques centimètres à quelques mètres par année) comme par exemple les glaciers (Avian *et al*. 2009, Schwalbe *et al.* 2008, Bauer *et al.* 2003) et les glissements de terrain (Jaboyedoff *et al.* 2010, Prokop & Panholzer 2009, Teza *et al.* 2008, Travelletti *et al.* 2008).

Le champ de déplacement 3D peut être dérivé par la mise en correspondance d'objets (i.e. surface de sol, rocher) localisés dans deux levés TLS consécutifs, à condition que l'objet reste rigide dans le temps. L'appariement s'effectue souvent manuellement, alors que des méthodes automatisées et souvent plus précises sont disponibles. Les méthodes dérivées de la technique ICP standard (point itératif le plus proche; Besl & McKay 1992) et d'appariement 3D de surfaces par les moindres carrées (Gruen & Akca 2005) sont parmi les méthodes les plus utilisées pour la détermination automatique du champ de déplacement 3D. Elles permettent d'exploiter l'ensemble de l'information contenue dans les nuages de points. Leur application aux glissements de terrain est démontrée par Teza *et al.* (2008) et par Monserrat & Crosetto (2008).

On suggère dans ce travail que pour le cas spécifique d'objets scannés à partir d'un point de vue unique, les algorithmes d'appariement 3D relativement complexes peuvent être contournés en faveur d'une approche plus simple à l'aide d'une fonction 2D de corrélation couramment utilisée en photogrammétrie. De nombreux exemples ont montré l'efficacité de cette fonction statistique pour dériver les champs de déplacement à partir d'images satellites et aériennes (Casson *et al.* 2005, Delacourt *et al.* 2004, Leprince *et al.* 2008). A l'inverse, très peu d'exemples ont illustré son applicabilité à des nuages de points TLS (Travelletti *et al.* 2008, Schwalbe *et al.* 2008).

Ce travail a pour objectif de présenter une méthode simple pour dériver rapidement le champ de déplacement 3D en exploitant l'ensemble de l'information géométrique contenue dans les nuages de points par une fonction de corrélation croisée normalisée. Les objectifs de ce travail consistent: (i) à exposer les principes de la méthode, et (ii) à tester et valider sa performance sur un cas réel. Pour cela, le pied du glissement de Super-Sauze a été choisi comme site expérimental.

Site expérimental: le glissement de Super-Sauze

Le glissement-coulée de Super-Sauze s'est développé dans les marnes noires callovo-oxfordiennes du bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France) (figure 1). Dans les années 1960, la zone de l'escarpement a été affectée par des ruptures superficielles et profondes menant à la déstabilisation complète et lente du versant. Le matériau accumulé s'est transformé progressivement en une matrice silto-argileuse intégrant des fragments de marne de tailles diverses sous l'action des processus d'altération (Malet *et al.* 2003). A partir des années 1970 à aujourd'hui, le glissement évolue en une coulée de boue lente, chenalisée par une paléotopographie d'échines et de ravines, dont les vitesses varient entre 1 et 3 cm.jour^{-1} et pouvant atteindre 40 cm.jour^{-1} en période d'accélération (typiquement au printemps) (Malet *et al.* 2002). Actuellement, le glissement-coulée se développe sur une longueur d'environ 900 m, entre 1980 m d'altitude (couronne) et 1760 m (pied de la coulée) avec une largeur d'environ 135 m et une pente moyenne de 25°. Le volume total mobilisé est estimé à 560,000 m^3 (Travelletti & Malet 2012).

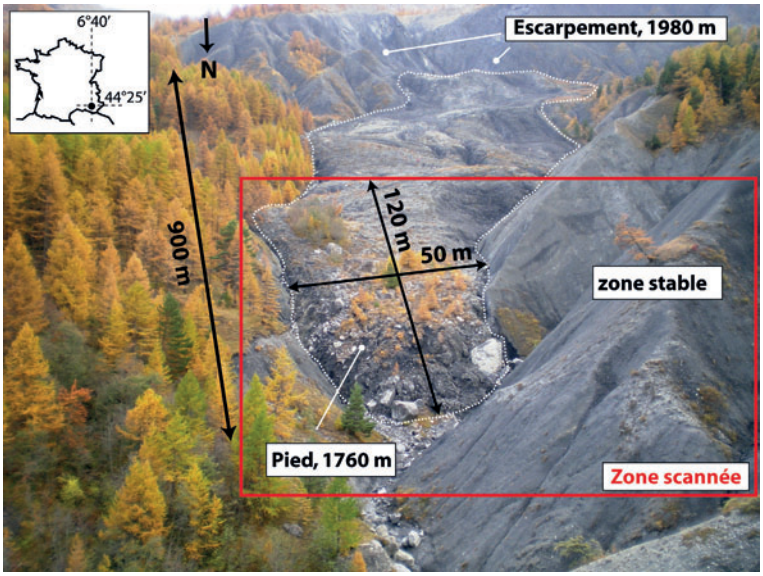

Figure 1.–Vue du glissement de Super-Sauze depuis la station de base TLS en direction du Sud. La photographie correspond au plan perpendiculaire à la direction de vue du scanner. La zone scannée inclut le pied du glissement et la zone stable.

Les déplacements du glissement sont actuellement suivis par levé DGPS, un système automatique de photographies optiques (Travelletti *et al.* 2012) et par levés TLS (Travelletti *et al.* soumis). L'absence presque complète de végétation arbustive et arborée sur le glissement en fait un site particulièrement adapté au suivi par TLS (figure 1).

Acquisition des données TLS

Pour ce travail, le suivi du pied a été effectué à l'aide d'un scanner laser Optech ILRIS-3D à mesure de distance par temps de vol, caractérisé par un faisceau laser de longueur d'onde de 1500 nm (proche infrarouge), d'une portée d'environ 800 m et d'une fréquence d'acquisition de 2500 pts.s^{-1}. Des miroirs à l'intérieur du scanner offrent un champ de vue de 40°x40° et permettent d'orienter le faisceau laser dans l'espace avec une précision angulaire de 1.15x10^{-3}° et une divergence angulaire de 9.74x10^{-3}°. Le laser permet d'obtenir les coordonnées cartésiennes de chaque point avec une valeur d'intensité normalisée (http://www.optech.ca/prodilris.htm).

Dix acquisitions TLS ont été acquises entre Octobre 2007 et Mai 2010 à partir de la même station de base à une distance moyenne de 100 m du pied. A cette distance, le diamètre du faisceau laser au sol est estimé entre 0.03 et 0.05 m. Les parties stables entourant le pied du glissement ont été systématiquement inclues dans les scans (figure 1). Seul le dernier écho est enregistré pour maximiser le nombre de points réfléchis au sol. Les nuages de points sont constitués de 9 à 12 millions de points répartis inégalement sur une surface d'environ 16'000 m^2. La densité moyenne de points au sol varie de 153.0 pts.m^{-2} à 234.9 pts.m^{-2} avec un écart-type pouvant atteindre 351.7 pts.m^{-2} et une densité maximale de 1148.3 pts.m^{-2}.

Méthodologie

Le principe de la méthode repose sur une réduction du problème 3D d'appariement d'objets à un problème 2D rendant possible l'utilisation d'une fonction 2D de corrélation croisée normalisée. La méthode comprend quatre étapes successivement décrites ci-dessous.

Filtrage et alignement des nuages de points

Bien que le faisceau laser puisse passer entre le feuillage, de nombreux points proviennent de réflexion sur les parties solides de la végétation. Une méthode de filtrage similaire à celle de Prokop & Panholzer (2009) a été utilisée. Elle consiste à générer, à partir du nuage de points, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à basse résolution (maille carrée de 0.5 m). Un tel MNT ne permet pas de reproduire les changements géométriques abrupts et très localisés typiquement générés par la présence de végétation. Les points dont l'élévation dépasse l'altitude topographique identifiée sur le MNT d'une certaine valeur (± 0.15 m) sont retirés. La qualité du filtrage est ensuite vérifiée et affinée manuellement.

Les nuages de points sont ensuite alignés dans un référentiel commun suivant la méthode proposée par Oppikofer *et al.* (2009). Chaque acquisition TLS est alignée sur les parties stables du glissement composées d'une topographie abrupte faite de crêtes et

ravines dont la morphologie est restée pratiquement inchangée durant la période du suivi (figure 1 et figure 2). Après un ajustement manuel, l'algorithme ICP sert à affiner la qualité de l'alignement des scans entre eux avec une erreur résiduelle 3D moyenne nulle et un écart-type de 0.04 m. Le géoréférencement en absolu dans le système de référentiel local est effectué par alignement en bloc des nuages de points sur les parties stables d'un levé LiDAR aérien géoréférencé (ALS) réalisé en juillet 2009 (figure 2). L'erreur moyenne 3D du géoréférencement est évaluée à 0.01 m avec un écart-type de 0.14 m.

Le filtrage et l'alignement des nuages de points ont été effectués à l'aide du logiciel *Polyworks 11* (INNOVMETRIC 2009). Une alternative à l'algorithme ICP consiste à disposer lors de l'acquisition des points de contrôle au sol mesurés par des techniques géodésiques classiques et identifiables dans les nuages de points (GIUSSANI & SCAIONI 2004).

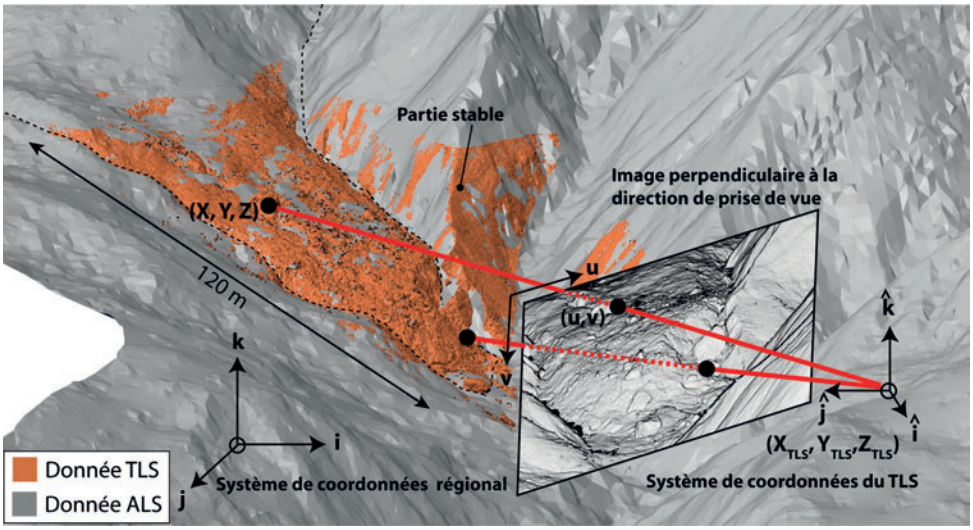

Figure 2.–Alignement en bloc des différents nuages de points TLS sur les parties stables d'un levé ALS. Transformation projective appliquée sur les nuages de point avec les différents systèmes de coordonnées impliqués dans la procédure.

Réduction du problème 3D à un problème 2D

Comme le faisceau laser est issu d'une source ponctuelle, il existe une transformation projective permettant de représenter la totalité de l'information géométrique dans un plan perpendiculaire à la direction de vue du scanner (*c.-à-d.* une reprojection des points dans la géométrie d'acquisition). Cette procédure permet d'obtenir une répartition homogène des points dans le plan minimisant l'influence des zones d'ombre (zones dépourvues de points 3D) dans le calcul des déplacements par corrélation (chapitre 4.3). La relation reliant la position 3D (X,Y,Z) de chaque point à sa position (u,v) dans le plan est modélisée par les équations classiques de colinéarité (Equation 1, KRAUS & WALDHAÜSEL 1994). Ces équations sont fondées sur le principe que chaque point est projeté suivant une trajectoire rectiligne passant par le centre de projection représenté par la moyenne des positions du scanner laser des dix acquisitions (X_{TLS}, Y_{TLS}, Z_{TLS}) (figure 2).

$$u = s\frac{(\hat{\boldsymbol{i}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{i}}_{Local})(X - X_{TLS}) + (\hat{\boldsymbol{i}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{j}}_{Local})(Y - Y_{TLS}) + (\hat{\boldsymbol{i}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{k}}_{Local})(Z - Z_{TLS})}{(\hat{\boldsymbol{k}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{i}}_{Local})(X - X_{TLS}) + (\hat{\boldsymbol{k}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{j}}_{Local})(Y - Y_{TLS}) + (\hat{\boldsymbol{k}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{k}}_{Local})(Z - Z_{TLS})}$$

$$v = s\frac{(\hat{\boldsymbol{j}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{i}}_{Local})(X - X_{TLS}) + (\hat{\boldsymbol{j}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{j}}_{Local})(Y - Y_{TLS}) + (\hat{\boldsymbol{j}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{k}}_{Local})(Z - Z_{TLS})}{(\hat{\boldsymbol{k}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{i}}_{Local})(X - X_{TLS}) + (\hat{\boldsymbol{k}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{j}}_{Local})(Y - Y_{TLS}) + (\hat{\boldsymbol{k}}_{TLS} \bullet \hat{\boldsymbol{k}}_{Local})(Z - Z_{TLS})} \qquad \text{(Equation 1)}$$

$\hat{\boldsymbol{i}}$, $\hat{\boldsymbol{j}}$ et $\hat{\boldsymbol{k}}$ sont les vecteurs unitaires du référentiel du scanner laser qui dépendent de son orientation dans le référentiel local. *i, j et k* sont les vecteurs unitaires (1,0,0), (0,1,0) et (0,0,1) du référentiel local. Le symbole • correspond au produit scalaire des vecteurs unitaires. Le paramètre *s* est un facteur d'échelle servant à définir la résolution en pixels de la grille.

Ce paramètre doit être défini de manière à ce que la densité de points soit de 1 pt.pixel^{-1} pour minimiser les pertes d'information lors de l'interpolation et, par conséquent, exploiter exhaustivement l'ensemble de l'information géométrique contenue dans les nuages de points. Une valeur de *s* correspondant à une grille de 2400 x 1900 pixels a été sélectionnée. La densité de points varie de 0.78 à 0.94 pts.pixel^{-1} avec un écart-type faible de 0.16 pts. pixel^{-1}. La densité de points globale est légèrement inférieure à 1 à cause de la présence de zones dans la grille où la végétation a été filtrée.

La distance entre les nuages de points et la position de laser scanner (X_{TLS}, Y_{TLS}, Z_{TLS}) est ensuite linéairement interpolée dans le plan image. Comme la fonction de corrélation est optimale sur des données variant rapidement dans l'espace (Duffy & Hughes-Clarke 2005), le gradient de cette distance est calculé pour accentuer les traits morphologiques du pied. Les images générées sont ensuite converties en valeur de gris et corrélées pour dériver le champ de déplacement 2D (figure 3).

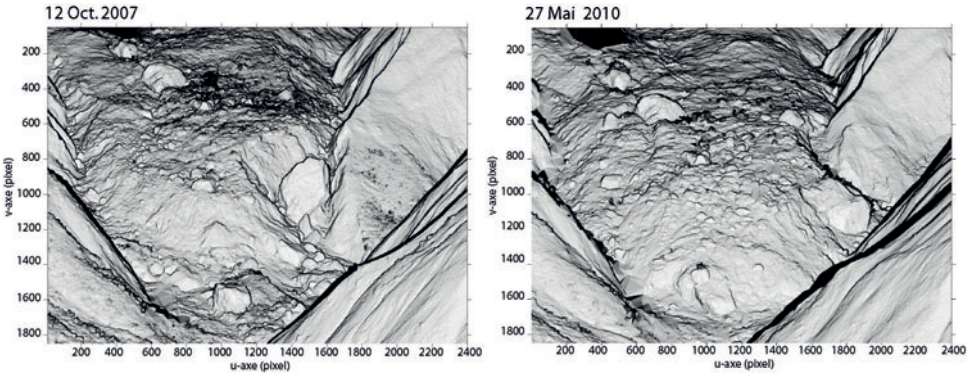

Figure 3.–Exemple d'images (première et dernière acquisition TLS) générées à partir du gradient de la distance (points – station TLS) pour la corrélation.

Détermination du champ de déplacement 2D par corrélation

Le principe de la corrélation consiste à apparier le motif correspondant à une fenêtre de corrélation dans les deux images afin de pouvoir déterminer le déplacement du centre de la fenêtre en maximisant une fonction de corrélation croisée normalisée (Chambon 2003, Hild 2003). Le coefficient de corrélation croisé permet de calculer un facteur de corrélation

normalisé, ce qui revient à comparer non plus les valeurs absolues d'intensité de gris, mais la façon dont les valeurs varient au sein de chaque fenêtre de corrélation. La fonction de corrélation retournent le coefficient de corrélation R entre une fenêtre $\mathbf{d_1}$ appartenant a une image de référence et une fenêtre $\mathbf{d_2}$ de même dimension Nu et Nv parcourant une seconde image. La position où, dans la seconde image, le coefficient de corrélation est maximal à la plus forte probabilité de correspondre à la position du point homologue recherché. A deux dimensions, l'indice de corrélation croisée discrète et normalisée est calculé a l'aide de l'équation suivante (Equation 2, HILD *et al*. 1999):

$$R_{d_1,d_2}(\Delta u,\Delta v)=\frac{\sum^{N_u}\sum^{N_v}(\mathbf{d_1}(u,v)-\bar{d}_1)(\mathbf{d_2}(u+\Delta u,v+\Delta v)-\bar{d}_2)}{\sqrt{\sum^{N_u}\sum^{N_v}(\mathbf{d}_1(u,v)-\bar{d}_1)^2}\sqrt{\sum^{N_u}\sum^{N_v}(\mathbf{d_2}(u+\Delta u,v+\Delta v)-\bar{d}_2)^2}} \qquad \text{(Equation 2)}$$

(Δu, Δv) sont les décalages (*i.e.* déplacements) recherches de deux points homologues dans les fenetres $\mathbf{d_1}$ et $\mathbf{d_2}$ de dimensions N_u et N_v selon axes u et v. $\bar{d}_1$ et $\bar{d}_2$ correspondent a la moyenne spatiale de $\mathbf{d_1}$ et $\mathbf{d_2}$ respectivement.

En pratique, une fenêtre de corrélation est définie dans l'image de référence (la première des deux acquisitions TLS; figure 4). La fenêtre de corrélation correspondante est ensuite recherchée dans une zone d'exploration appartenant à la seconde image. Le processus est itératif pour chaque pixel de l'image de référence. La distance euclidienne entre le centre de la fenêtre de corrélation de l'image de référence et le point du maximum de corrélation dans la seconde image représente l'amplitude du déplacement. En modifiant la zone d'exploration, il est ensuite possible de déterminer les déplacements associés à toutes les positions.

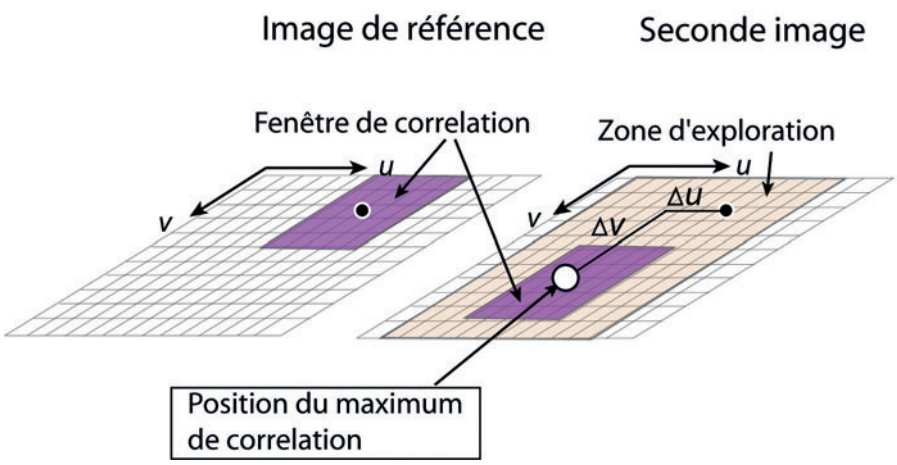

Figure 4.–Principe de la corrélation d'images (adapté de TRAVELLETTI *et al.* sous presse).

La taille de la fenêtre de corrélation est un compromis entre l'exactitude désirée et la résolution spatiale du champ de déplacement (Delacourt *et al.* 2004). Une augmentation de la taille de la fenêtre de corrélation assure un bon rapport signal sur bruit. Par contre l'exactitude diminue puisque les déplacements sont moyennés sur une plus grande surface de terrain. Dans ce travail, une taille de fenêtre de corrélation de 30 pixels a été choisie, correspondant à une surface au sol entre 0.5 m^2 et 3.5 m^2.

Le résultat de la corrélation correspond aux déplacements Δu and Δv le long des axes u et v avec l'indice de corrélation associé représentant la qualité de l'appariement (figure 4). Si la surface de sol contenue dans la fenêtre de corrélation a une morphologie contrastée et ne subit aucune déformation et rotation, l'indice de corrélation tend vers 1. Les déplacements Δu and Δv sont ensuite reconvertis en déplacements 3D dans le référentiel local.

Reconstruction du champ de déplacement 3D

La reconstruction du champ de déplacement 3D dans le référentiel local est possible grâce à l'utilisation de MNTs très haute résolution acquis par TLS. Une interpolation bilinéaire sert à associer un triplet de coordonnées (X, Y, Z) issu de la première acquisition et de la seconde acquisition TLS à chaque position initial (u, v) et final ($u + \Delta u$, $v + \Delta v$) de l'objet déplacé. Pour chaque acquisition, quatre grilles sont générées dans le plan perpendiculaire à la direction de vue du scanner: une grille de distance (point - station TLS) pour la corrélation et trois grilles de coordonnées X, Y et Z pour la reconstruction du champ de déplacement 3D. Pour filtrer les erreurs dues aux déformations trop importantes du sol, les déplacements caractérisés par un indice de corrélation inférieur à 0.8 et une direction opposée à la direction de propagation du glissement sont retirés. Les composantes des déplacements 3D sont finalement lissées à l'aide d'un filtre médian effectué dans une grille régulière à maille de 1 m. Chaque composante du déplacement 3D est remplacée par la composante médiane de l'ensemble des déplacements à l'intérieur d'une même maille.

Résultats

D'octobre 2007 à Mai 2010, des déplacements du pied variant de 0.04 m à 10.76 m entre deux acquisitions TLS consécutives ont pu être déterminés. Les déplacements cumulés du pied atteignent 21.80 m. L'étalement des matériaux du pied en aval est parfaitement illustré par l'orientation divergente du champ de déplacement vers l'extérieur (figure 5). L'hétérogénéité de la distribution spatiale des déplacements permet de distinguer des compartiments avec une cinématique distincte. Les déplacements les plus importants sont le plus souvent localisés au front du pied, là où la pente topographique est la plus raide. Le détachement d'un compartiment du pied est aussi mis en évidence.

Comparaison et validation

Pour valider la méthode exposée dans ce travail, les déplacements sont comparés à ceux obtenus en utilisant la méthode classique ICP. Cinq blocs répartis sur le pied ont été

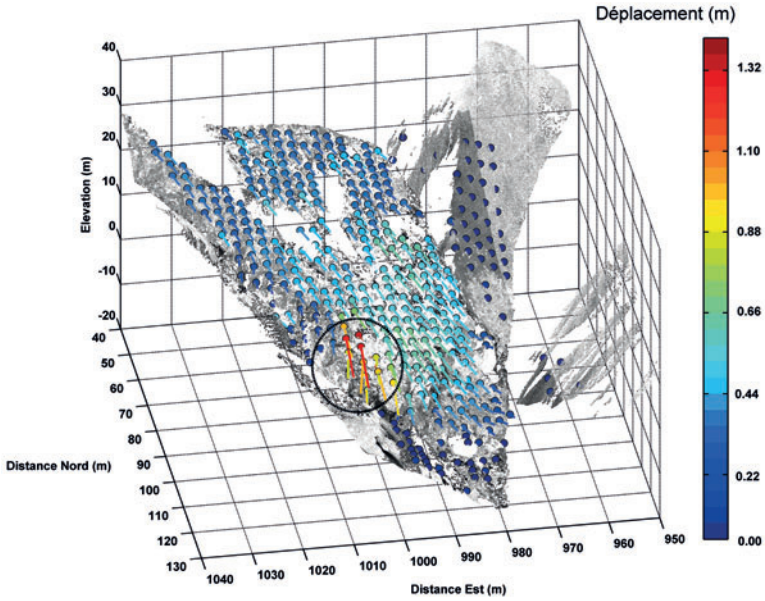

Figure 5.–Champ de déplacements entre le 23 juin et le 18 octobre 2008 convertis dans le référentiel local et aligné sur le nuage de points original (23 juin 2008) avec les valeurs d'intensité. Le détachement progressif d'un compartiment au pied du glissement est indiqué par un cercle.

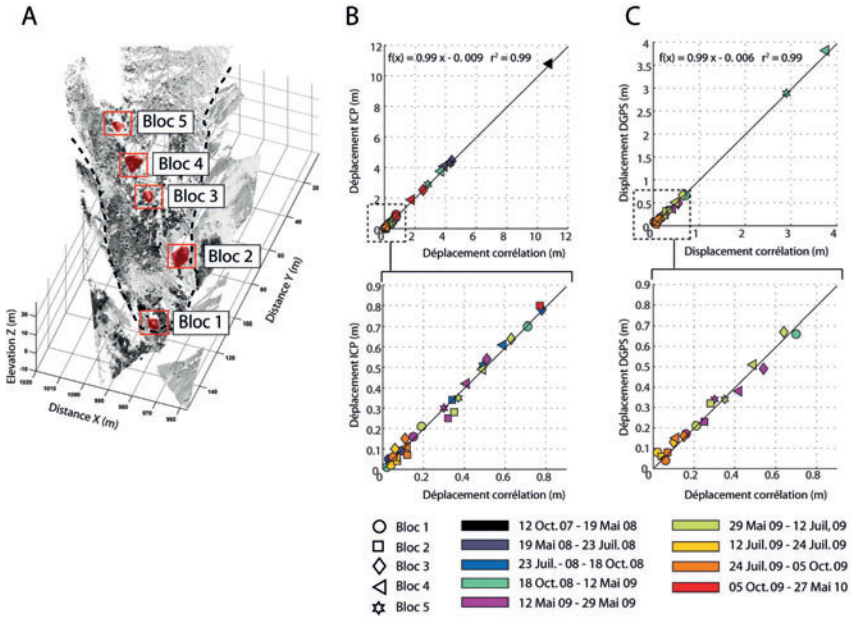

Figure 6.–Comparaison et validations des déplacements obtenus avec la méthode ICP et le suivi par GPS différentiel A) position des blocs dans le nuage de points, B) comparaison avec la méthode ICP et C) comparaison avec un suivi par GPS différentiel.

identifiés dans les nuages de points (figure 6A). Les vecteurs déplacements de chaque bloc ont été ensuite déterminés par l'algorithme ICP disponible dans le logiciel *Polyworks 11* (Innovmetric 2009) selon la méthode décrite dans Oppikofer *et al.* (2009). Les résultats de la comparaison des deux méthodes sont synthétisés dans la figure 6B. Les déplacements prédits par chacune des méthodes concordent remarquablement ($r^2 = 0.99$) avec une erreur moyenne et un écart-type de 0.02 m et 0.03 m. Ces résultats montrent que toute l'information géométrique contenue dans les nuages de points a bien été préservée lors de la réduction du problème 3D au problème 2D d'appariement.

Les déplacements sont finalement comparés aux levés DGPS effectués sur les mêmes blocs (précision horizontale de 0.02 m, précision verticale de 0.05 m). Les déplacements corrèlent parfaitement ($r^2 = 0.99$) (figure 6C). Une erreur moyenne de 0.04 m et un écart-type de 0.03 m sont déterminés. Cette erreur correspond à l'erreur associée à l'alignement des nuages de point dans le référentiel local.

Conclusions

Ce travail présente une méthode simple pour caractériser le champ de déplacement 3D à partir d'acquisitions TLS consécutives en exploitant l'ensemble de l'information géométrique contenue dans les nuages de points. Elle offre une alternative aux algorithmes complexes d'appariement 3D pour le cas spécifique d'objets scannés à partir d'un unique et systématique point de vue. La cinématique du pied du glissement de Super-Sauze a pu être déterminée. Les déplacements obtenus sont en excellent accord avec ceux prédits par l'algorithme ICP et ceux issus du suivi par DGPS. Une approche complémentaire pour calculer le tenseur de déformation est présentée dans Travelletti *et al.* soumis). Des efforts supplémentaires sont encore nécessaires pour automatiser la méthode et l'adapter à d'autres configurations d'acquisition.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Réseau de Formation par la Recherche Marie Curie MOUNTAIN RISKS financé par l'Union Européenne (2007-2010). Les auteurs remercient Mr. Grzegorz Skupinski (LIVE, Université de Strasbourg) pour sa participation à l'acquisition des données TLS.

Références

Abellán A., Jaboyedoff M., Oppikoffer T. & Vilaplana J. M., 2009. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Natural Hazards Earth System Sciences* 9: 365-372.

Avian M., Kellerer-Pirklbauer A. & Bauer A., 2009. LiDAR for monitoring mass movements in permafrost environments at the cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008. *Natural Hazards Earth System Sciences* 9: 1087-1094.

Bauer A., Paar G. & Kaufmann V., 2003. Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring, *In*: Proceedings of the 8th International Permafrost Conference. Phillips M., Springman S. M. & Arenson L. U., (Eds), Zurich, Balkema: 55-60.

Besl P & McKay N., 1992. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 14: 239-256.

Casson B., Delacourt C. & Allemand P., 2005. Contribution of multi-temporal sensing images to characterize landslide slip surface – Application to the La Clapière landslide (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5: 425–437.

Chambon G.,2003. Caractérisation expérimentale du frottement effectif des zones de faille. Thèse de Doctorat. Université Paris XI Orsay, ENPC.

Delacourt C., Allemand P., Casson B. & Vadon H., 2004. Velocity field of the "La Clapière" landslide measured by the correlation of aerial and Quick-Bird satellite images. *Geophysical Research Letters* 31: 1-5.

Duffy G. P. & Hughes-Clarke J. E., 2005. Application of spatial cross correlation to detection of migration of submarine sand dunes. *Journal of Geophysical Research* 110: 1-11.

Gruen A. & Akca D., 2005. Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59(3): 151–174.

Giussani A. & Scaioni M., 2004. Application of TLS to support landslides study: survey planning, operational issues and data processing. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 8/W2): 318–323.

Hild F. (2003): Mesure de champs de déplacement par corrélation d'images et applications en mécanique des solides. Notes de cours IPSI. Laboratoire de Mécanique et Technologie, CNRS-UMR 8535, Université Paris 6, France.

InnovMetric, 2009. PolyWorks User's Manual - 3-D scanner and 3-D digitizer software from InnovMetric Software Inc., http://www.innovmetric.com/

Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellan A., Derron M.-H., Loye A., Metzger R. & Pedrazzini A., 2010. Use of LiDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards.* doi 10.1007/s11069-010-9634-2.

Kraus K. & Waldhäusl P., 1994. Photogrammetry, Fundamentals and Standard processes. Vol 1. Hermès (Eds), Paris.

Leprince S., Berthier E., Ayoub F., Delacourt C. & Avouac J.- P., 2008. Monitoring Earth Surface Dynamics With Optical Imagery. *Eos* 89: 1-5.

Lichti D. D. & Jamtsho S., 2006. Angular resolution of terrestrial laser scanners. *Photogrammetric Record* 21: 141-160.

Lindenberg R. & Pfeifer N. (2005). *A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock,* in: Proceedings of the 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, Austria, 3-5 October 2005, 2, 61-70.

Malet J.-P., 2003. Les glissements de type écoulement dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydromécanique. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Malet J.-P., Maquaire O. & Calais E., 2002. The use of global positioning system techniques for the continuous monitoring of landslides. *Geomorphology* 43: 33-54.

Monserrat O. & Crosetto M., 2008. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry* 61(1): 142-154.

Oppikofer T., Jaboyedoff M., Blikra L. H, Derron M. H. & Metzger R., 2009. Characterization and monitoring of the Aknes rockslide using terrestrial laser scanning. Natural Hazards and Earth System Sciences 9: 1003-1019.

Prokop A. & Panholzer H., 2009. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 1921-1928.

Teza G., Pesci A., Genevois R. & Galgaro A., 2008. Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation. *Geomorphology* 97: 424-437.

Schwalbe E., Maas H.-G., Dietrich R. & Ewert H.,2008. Glacier velocity determination from multi temporal terrestrial long range scanner point clouds. *In*: ISPRS - *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Vol. XXXVII, Part B5: 381-389.

Travelletti J., Oppikofer T., Delacourt C., Malet J.-P. & Jaboyedoff M., 2008. Monitoring landslides displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning (TLS). *In*: ISPRS - *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Vol. XXXVII. Part B5: 485-490.

Travelletti J & Malet J.-P., 2012. Characterization of the 3D geometry of flow-like landslides: a methodology based on the integration of multi-source data. *Engineering Geology*. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.05.003.

Travelletti J., Delacourt C., Toussaint R., Allemand P., Malet J.-P. Schmittbuhl J. & Bastard M., 2012. Correlation of multi-temporal ground-based images for landslide monitoring: application, potential and limitations. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*.

Travelletti J., Malet J.-P. & Delacourt C., soumis. Multi-dates correlation of Terrestrial Laser Scanning data for the characterization of landslides kinematics. *Journal of Geophysical Research*.

Gestion des risques liés aux dangers naturels

(Articles 29, 30 et 31)