

# A new laser distancemeter for continuous measurement of landslide displacements

Christophe Bonnard\*, Gilbert Steinmann\*

## Introduction

Slow landslides of any type and dimensions show variable displacements with periods of acceleration following episodes of very limited movements. In order to know the detailed behaviour of the considered unstable masses in time it is thus necessary to obtain a continuous recording of displacements. Such an information is essential to identify the possible causes of critical phases or to design warning systems.

More than 10 years ago the Soil Mechanics Laboratory of EPFL developed mechanical devices for the continuous measurement of surface displacements of landslides by invar wire extensometers [ENGEL, 1986]. Different types of recording systems were installed at several landslides showing sometimes interesting results [BONNARD, ENGEL, STEINMANN, 1989]. However these systems were not quite fit for the recording of large distances exceeding 200 m and the effects of climatic conditions (wind, rime) could seriously affect the reliability of the recorded data.

A new electrooptical system has therefore been developed by our laboratory including a cheap manual distance measurement device (distancemeter) recently produced by Leica, called Disto, emitting a laser ray reflected by a smooth surface or a prism. This device could be adapted to the specific needs of an open air continuous measurement as it was recently provided with a RS 232 output allowing its driving by computer. The first results obtained at La Lécherette Landslide are presented and commented in order to appreciate the interest of such a device.

## Historical development

The first distancemeters installed in 1983 at Villarbeney Landslide [DYSLI, RECORDON, 1981] included 3 invar wires 13 to 21 m long, 1 mm  $\phi$ , recording differential movements at a secondary scarp. They were plotting the movement of the re-

turn pulleys on mechanical water level gauging stations. The internal precision was  $\pm 1$  mm [ENGEL, 1986].

In 1984, at Loye Landslide, the return pulleys were mounted on a vertically rotating support in order to maintain the 18 to 33 m long invar wires and the pulleys in the direction of the landslide movement.

In 1985 a very long invar wire, some 180 m long and 1.6 mm  $\phi$ , was installed at the main scarp of Riddes Rockfall in order to follow the long-term residual movements of the fallen mass [BONNARD, ENGEL, STEINMANN, 1989]. The cumulated displacements have reached more than 30 m in 6 years with several significant acceleration phases.

Since 1988 the mechanical recording device has been replaced by a potentiometer coupled to the return pulley, the data of which are stored in a MADD data logger on a memory cartridge. Several other instruments are installed at Riddes, Saas Fee and Châtel-St-Denis Landslides, trying to use kevlar instead of invar wire but without success as this modern material was appreciated by rodent animals!

Finally the high scarp of La Lécherette Landslide was equipped in 1994 with a 350 m long invar wire, but no significant results could be obtained as the wire broke due to rime and as the movements (probably 1 to 2 cm/month) were too limited to be significantly recorded. Therefore a new system had to be developed for this case.

## Basic principle of the new distancemeter

The Leica Disto designed initially to survey inside dimensions of buildings produces a red laser ray which is modulated with 2 frequencies (1.042 MHz and 50 MHz). After hitting a flat surface the reflected ray received on an optical lens in the distancemeter itself is transmitted by an optic fiber to a receiver which computes the frequency offset between the two waves. Then it computes the distance, taking an internal calibration into account based on climatological parameters (see Fig. 1).

The basic specifications of the original device fixed a maximum distance measurement of 140 m approximately with a standard precision of  $\pm 3$  mm ( $\pm 5$  in difficult conditions) and a measurement time of 2.5 to 10 seconds. But long distance tests that we carried out by night (in the daylight the laser ray is not visible anymore for distances above 50 m) showed that the maximum distance indicated was not a limiting factor when reflecting the ray with a prism used for surveying. Indeed the computation of the frequency offset is done on a continuously modulated wave so that the device cannot state when a complete wave number is achieved; if

\* Soils Mechanics Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne.

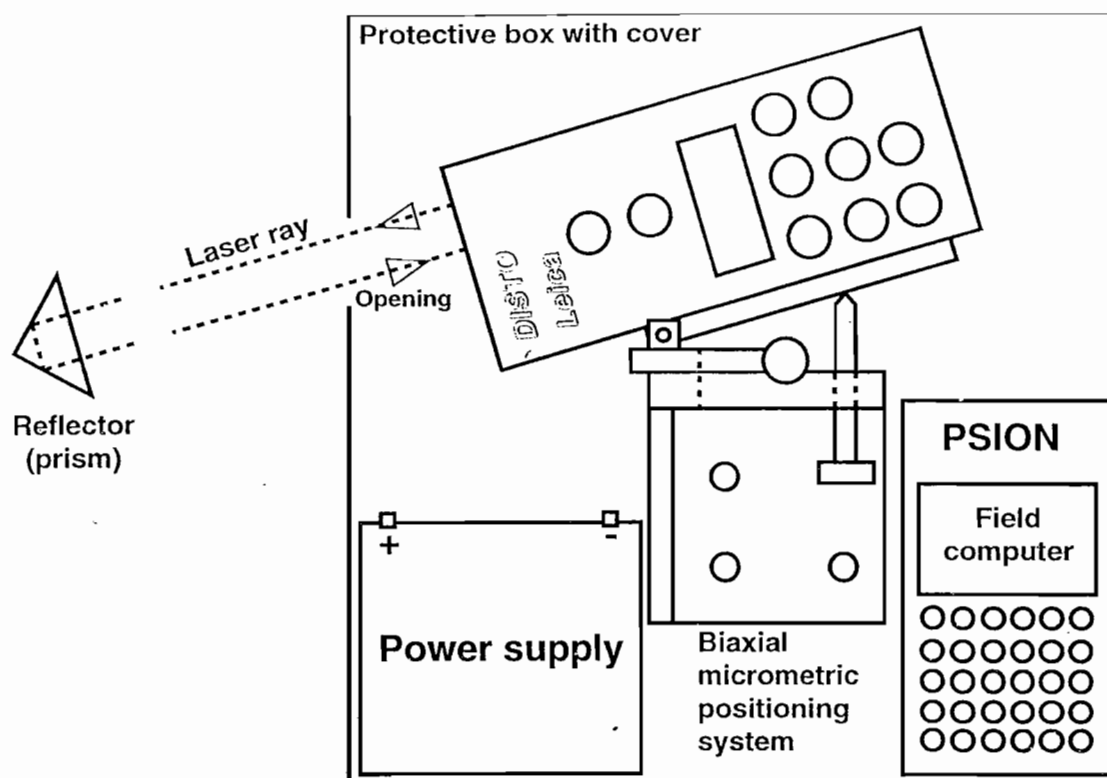


Fig. 1 – Schematic sketch of the laser distancemeter.

Fig. 1 – Rappresentazione schematica del distanziometro laser.

the signal received is sufficient, a distance larger than the base length of some 140 m can be measured without significant loss of precision by adding once or twice this nominal distance to the value read on the computer.

The Psion field computer driving the Disto stores the data on a file with the date and hour of each reading (total memory 1 M). It is automatically disconnected between each series of measurements. In order to reduce the size of the files a preliminary handling of data is done allowing the storage of the mean value of each series of readings (usually 6 to 10 readings for one stored value).

## Tests

Several tests have been performed in open air on the site of EPFL, on a distance near to 140 m using a white reflecting surface, on fixed distances of 200 m to more than 300 m with a reflecting prism, on variable distances by moving the prism by 1, 2, 4 and 6 m forward and backward with a simultaneous control of the distance by a DM 520 Kern geodetic distancemeter. The differences between the two devices do not exceed 5 mm.

Long duration tests of 1 to 4 days on a fixed distance of some 350 m between two buildings have been performed, giving very reduced distance varia-

tions (see Fig. 2). They do not exceed  $\pm 4$  mm in 95% of the readings.

Finally low temperature tests were performed in a freezer at  $-20^{\circ}\text{C}$  during 24 hours, including the Disto, the computer and the power supply, in order to check the ability of this equipment to be installed in open air during the winter at high altitude.

## Application to a site measurement

The major problem on site is the direction pointing of the laser ray on the prism which is installed at a moving point of the landslide. Therefore a continuously adjustable support for the Disto has been made by a biaxial micrometric positioning system. The distancemeter is placed in a fixed protective box with a required opening for sending out the laser ray. The box also includes the field computer (see Fig. 1).

For the first test site at La Lécherette Landslide, the foreseen energy supply by solar panel and battery was not selected as an electric transformer was available nearby, from which a connection could be done easily.

La Lécherette Landslide where the device was installed during the winter 1996 shows a very extensive scarp some 130 m high. A significant moving

point in the upper zone of the sliding mass where a borehole had been done previously and where the reflecting prism has been installed on a post is thus 325 m far from a fixed point located just behind the scarp where the distancemeter has been firmly set at a large tree.

The total length of La Lécherette Landslide, located in the swiss Prealps (Canton of Vaud), from head to toe, reaches some 900 m with a maximum width of 500 m. At the above mentioned moving point the measured depth of the active landslide is 25 m, with a well defined slip surface. The bedrock formed by Ultrahelvetic marl to sandstone Flysch is reached more than 30 m below the ground surface. The whole sliding mass, the volume of which is assumed to be some 3 million  $m^3$ , is made of Flysch material disaggregated in a silty clayey matrix with large elements of marl and sandstone [CARRON, LATELTIN, BONNARD, NOVERRAZ, 1994].

### Monitoring equipments installed

In order to monitor La Lécherette Landslide, within a large research project called VERSINCLIM financed by the Swiss National Fund for Scientific Research, a 40 m deep borehole was carried out in a first stage and equipped for inclinometer and piezometer readings. After localizing the slip surface and discovering that no secondary movements were observed, three in-place inclinometers were installed between 22.8 and 25.8 m deep which allowed the determination of the displacements in the shear zone during 3 months. Due to the importance of the movements, these devices had to be removed and therefore a surface distancemeter was selected to carry on the continuous monitoring of displacements.

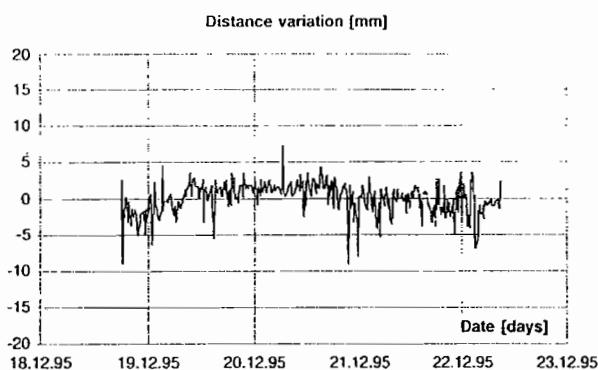


Fig. 2 – Distance variations measured during 4 days with the laser distancemeter on a fixed base of 347 m.  
Fig. 2 – Variazioni di distanza misurate in 4 giorni con il distanzimetro laser su di una base di 347 m.

After the failure of the invar wire distancemeter reported earlier, the new laser distancemeter recently installed should be able to record continuous displacements during a long period. The obtained data corresponding to the upper zone of the slide will be compared with the continuous movements recorded by the in-place inclinometers which could be installed recently in another borehole located near the toe of the landslide, along a main road, with the permission of the Cantonal Department of Public Works to which we are thankful. The displacements measured by the new distancemeter will also be checked by periodic controls done between the same two points with a DM 520 Kern geodetic distancemeter. The continuous movement data of the studied mobile point will be compared as well with the continuous monitoring of the piezometric level in the borehole located just below the mobile point.

Finally an automatic meteorological station has been set up in the immediate vicinity of the fixed point where the laser distancemeter is installed. Rainfall, temperature, humidity and wind speed are recorded (see Fig. 3).

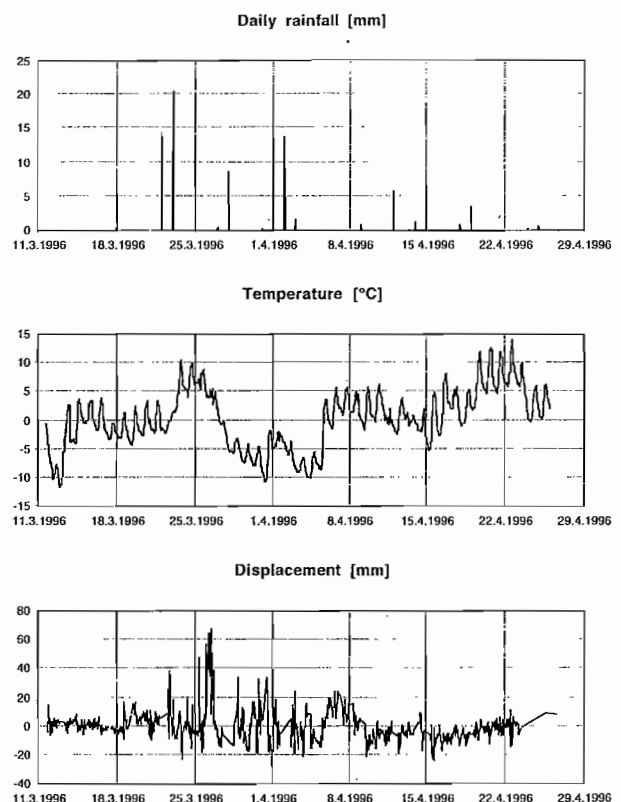


Fig. 3 – Displacements recorded at La Lécherette Landslide with corresponding meteorological data.  
Fig. 3 – Spostamenti misurati sulla frana di Lécherette insieme con i dati meteorologici.

## Obtained results

During the last 2 months no important displacement has been observed as most read values are included within a range of  $\pm 2$  cm (see Fig. 3 showing the curve of distance variations). Such a tendency is confirmed by the very small velocity derived by the geodetic measurements on a spell of 7 months, which reaches 5 mm/month.

The first 10 days of the continuous measurements (March 12 to 22) during which the temperature was all the time below  $0^{\circ}$  C with no rainfall and nearly no wind, the curve shows nearly constant readings ( $\pm 6$  mm for most of the values). Then a period of snowmelt occurred and the relatively large variations of distance during a period of 3 weeks (March 23 to April 14) may be explained by differential reptation affecting the pegs to which the cables maintaining the prism pole in a vertical position had been fixed (some of these cables were quite loose by mid-April). During the following days (from April 15 to 26), a slight tendency to a downward displacement appears with an average velocity of 1 cm/month. Unfortunately after that date some data were lost as the laser ray did not intercept anymore the prism, probably due to an accidental movement of the fixed station.

It has to be recalled that the first months of 1996 have been fairly dry so that it is not surprising that the recorded movements are well below the 2 cm/month recorded 2 years ago by inclinometer readings.

## Perspectives

Some more time is needed to check the precision and above all the reliability of this new distancemeter. But it is at least a very cheap alternative solution for punctual continuous measurements in comparison with a motorized theodolite and distancemeter which cost some 25 times more. It is also fa-

vourable for an installation in steep terrain as all the equipment is very light to carry and easy to install.

However it has to be stated that the equipment is not fit for very fast landslide movements in which the fixed laser ray might "lose" the reflector due to the movement of the latter in a direction which is different from that of the ray. In such cases, it is also possible to fix several prisms side by side in order to increase the probability of receiving the return laser ray. The possible hindrance caused by growing trees or moving branches intercepting the laser ray has also to be taken into account.

The final development stage to be added to this device is the inclusion of equipment allowing a wireless transmission of the data by a modem and a portable telephone in order to receive the displacement data in real time on the office computer and control immediately if a failure occurs to the measuring or recording system.

## References

- BONNARD Ch., ENGEL Th., STEINMANN G. (1989) – *Mesures continues du mouvement des glissements de terrain en montagne*. Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Rio de Janeiro, vol. III, pp. 1543-1548.
- CARON Ch., LATELTIN O., BONNARD Ch., NOVERRAZ F. (1994) – *Glissement de La Lécherette: Auscultation par forage, GPS et méthodes géophysiques*. Info No 6 du Programme national de recherche 31 du FNRS, Berne, pp. 9-10.
- DYSLI M., RECORDON E. (1981) – *Fluage des formations argileuses alpines*. Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Stockholm, vol. I, pp. 395-400.
- ENGEL Th. (1986) – *Nouvelles méthodes de mesure et d'analyse pour l'étude des mouvements du sol en terrains instables*. Thèse n. 601, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

## Un nuovo distanziometro laser per le misure in continuo dei movimenti franosi

Christophe Bonnard, Gilbert Steinmann

### Introduzione

Qualunque movimento franoso mostra spostamenti variabili nel tempo, con alterni periodi di forti accelerazioni e limitati spostamenti. Allo scopo di conoscere nel tempo il comportamento dettagliato di una massa instabile è quindi necessario avere a disposizione un continuo monitoraggio degli spostamenti. Tale informazione è necessaria per identificare le possibili cause di fasi critiche o per progettare dei sistemi di allarme.

Più di 10 anni fa il Laboratorio di Meccanica delle Terre dell'EPFL sviluppò uno strumento meccanico per la misura continua degli spostamenti superficiali di frane mediante un estensometro a corda di invar [ENGEL, 1986]. In numerose frane furono installati diversi tipi di sistemi di monitoraggio i quali mostrarono a volte risultati interessanti [BONNARD, ENGEL, STEINMANN, 1989]. Tuttavia questi sistemi non furono adeguati per il monitoraggio di spostamenti su distanze superiori ai 200 m; inoltre le condizioni climatiche (vento, brina) probabilmente influenzarono significativamente l'affidabilità dei dati registrati.

Un nuovo sistema elettro-ottico è stato così sviluppato dal nostro laboratorio costituito da un economico strumento di misura manuale delle distanze (distanziometro Disto) prodotto recentemente dalla Leica, il quale emette un raggio laser che viene riflesso su una superficie liscia o su di un prisma. Questo strumento potrebbe essere adattato alle specifiche necessità di una misura in continuo all'aperto, fornito di un collegamento RS232 che ne consente il controllo mediante calcolatore. Con lo scopo di apprezzare le potenzialità di tale strumento, in questa nota vengono presentati e commentati i primi risultati ottenuti alla frana di La Lécherette.

### Sviluppo storico

Il primo distanziometro installato nel 1983 alla frana di Villarbeney [DYSLI, RECORDON, 1981] era costituito da 3 corde invar lunghe da 13 a 21 m, di diametro 1 mm, per consentire la misura degli spostamenti relativi di una scarpata secondaria. La misura

era eseguita tramite un sistema di rimando (pulegge) connesso ad un rilevatore meccanico di livello d'acqua. La precisione era di  $\pm 1$  mm [ENGEL, 1986].

Nel 1984, alla frana di Loye, il sistema di rimando fu montato su un supporto verticale ruotante allo scopo di mantenere sia le corde di invar (di lunghezza compresa tra 18 e 33 m) che le pulegge sempre nella direzione di spostamento della frana.

Nel 1985 una corda di invar particolarmente lunga (circa 180 m e con diametro 1.6 mm) fu installata in corrispondenza della scarpata principale della Riddes Rockfall con la finalità di consentire la misura dei movimenti residui a lungo termine delle masse precipitate [BONNARD, ENGEL, STEINMANN, 1989]. Gli spostamenti cumulati raggiunsero più di 30 m nei 6 anni di misura, con numerose e significative fasi di accelerazione.

Dal 1988 il sistema meccanico di misura è stato sostituito con un potenziometro accoppiato al sistema di pulegge, con i dati trasferiti sulla memoria di un data logger MADD. Numerosi altri strumenti furono installati sulle frane di Riddes, Saas Fee e Châtel-St-Denis, cercando in questi casi di utilizzare corde di kevlar anziché di invar; il tentativo però non ha avuto successo, come testimoniato dall'apprezzamento esibito dai roditori per questo materiale moderno!

Infine nel 1994 si decise di installare una corda di invar della lunghezza di 350 m in corrispondenza della grande scarpata della frana di La Lécherette. Purtroppo, sia per la rottura della corda dovuta alla brina sia perché gli spostamenti furono troppo piccoli (probabilmente da 1 a 2 cm/mese) per essere apprezzati, non si ottennero risultati significativi. Si decise, quindi, di sviluppare un nuovo sistema.

### Principi fondamentali del nuovo distanziometro

Il Disto della Leica, progettato inizialmente per rilevare le dimensioni interne degli edifici, produce un raggio laser rosso modulato con due frequenze (1.042 MHz e 50 MHz). Dopo aver colpito una superficie piana, il raggio riflesso, ricevuto da una lente ottica nel distanziometro stesso, viene trasmesso da una fibra ottica ad un ricevitore che calcola la sfasatura di frequenza tra due onde. Quindi calcola la distanza sulla base di una taratura interna che tiene direttamente conto dei parametri climatici (vedi Fig. 1).

Le specifiche base dello strumento nella sua versione originaria fissavano in 140 m circa la massima distanza di misura, con una precisione di  $\pm 3$  mm ( $\pm 5$  mm in condizioni difficili) ed un tempo di misura compreso tra 2.5 e 10 secondi. Però prove su grandi distanze eseguite di notte (la luce solare non consente la visibilità del raggio laser su distanze superiori ai 50 m) mostrarono che la distanza massima

potrebbe essere superata allorché il raggio veniva riflesso con un prisma. Infatti il calcolo della sfasatura di frequenza è fatto sulla base di onde continuamente modulate in maniera tale che lo strumento non determina nulla fino a quando non si raggiunge un numero completo di onde; se il segnale ricevuto è sufficiente, una distanza maggiore della lunghezza base di 140 m può essere misurata aggiungendo una o due volte la distanza nominale al valore letto sul calcolatore, il tutto senza una significativa perdita di precisione.

Il calcolatore portatile Psion che controlla il Disto incamera i dati su files contenenti la data e l'ora di ogni serie di misure eseguite (memoria totale 1 M). Tra una serie di misure e l'altra esso è automaticamente sconnesso. Allo scopo di ridurre le dimensioni dei files, viene eseguita una elaborazione preliminare dei dati finalizzata alla memorizzazione dei valori medi di ogni serie di letture (generalmente da 6 a 10 letture per ogni valore memorizzato).

### Prove

Sono state realizzate numerose prove all'aperto in un sito dell'EPFL, su una distanza prossima a 140 m usando una superficie bianca riflettente, su una distanza fissa da 200 m a più di 300 m con un prisma riflettente, su una distanza variabile muovendo il prisma di 1, 2, 4 e 6 m in avanti ed indietro con un controllo simultaneo della distanza mediante un distanziometro geodetico DM 250 della Kern. Le differenze tra i due strumenti non superarono i 5 mm.

Prove di lunga durata (da 1 a 4 giorni), eseguite su una distanza prefissata, di circa 350 m tra due edifici, hanno fornito delle variazioni estremamente ridotte (vedi Fig. 2). Nel 95 % delle letture, esse non superarono  $\pm 4$  mm.

Infine il Disto, unitamente al calcolatore ed al sistema di alimentazione, fu sottoposto a prove a basse temperature in un congelatore a  $-20^{\circ}\text{C}$  per una durata di 24 ore, allo scopo di controllarne l'affidabilità anche in condizioni climatiche tipicamente invernali e/o di alta quota.

### Applicazione alle misure in sito

Il principale problema in sito è la direzione di puntamento del laser sul prisma che è installato nel punto mobile della frana. Di conseguenza il Disto è stato fornito di un supporto continuamente regolabile costituito da un sistema di posizionamento con micrometro biassiale. Il distanziometro è posizionato in una scatola fissa a scopo protettivo dotata di una apertura per il passaggio del raggio laser. La scatola consente l'allocazione del calcolatore portatile (vedi Fig. 1).

Nel primo anno di prove sulla frana di La Lécherette, l'alimentazione del sistema fu garantita da un trasformatore elettrico già disponibile nelle vicinanze, di semplice utilizzo, e non da un pannello solare e batteria come era inizialmente previsto.

La frana di La Lécherette, dove nell'inverno del 1996 furono installati gli strumenti, mostra una scarpa molto estesa e ripida di circa 130 m di altezza. Il distanziometro fu disposto tra un punto mobile rappresentativo nella zona superiore della massa scivolante in corrispondenza di un foro di sondaggio precedentemente eseguito, ed un punto fisso individuato a 325 m di distanza circa in corrispondenza di un grosso albero immediatamente alle spalle della scarpata.

La lunghezza totale della frana di La Lécherette, dalla cima al piede, situata nelle Prealpi Svizzere (cantone di Vaud), raggiunge i 900 m circa con una larghezza massima di 500 m. Al suddetto punto mobile la profondità attiva della frana è di 25 m, con una superficie di scorrimento ben definita. La formazione di base, costituita da Flysch marnoso e arenaceo dell'Ultraelvético, è posta ad oltre 30 m di profondità dal piano campagna. L'intera massa scivolante, il cui volume è stimato in circa 3.000.000 m<sup>3</sup>, è costituita da flysch rimaneggiato in una matrice limo-argillosa con grossi elementi di marna e arenaria [CARRON, LAELTIN, BONNARD, NOVERRAZ, 1994].

### Sistema di monitoraggio installato

Nell'ambito di un importante progetto di ricerca denominato VERSINCLIM finanziato dal Fondo Nazionale Svizzero di ricerca scientifica, nella frana di Lécherette fu realizzato in una prima fase un foro di 40 m di profondità predisposto per misure piezometriche ed inclinometriche. Dopo aver localizzato la superficie di scorrimento e riscontrato l'assenza di movimenti secondari del corpo di frana, furono installati tre inclinometri fissi a profondità comprese tra i 22,8 ed i 25,8 m; essi consentirono la determinazione degli spostamenti nella zona di taglio per un periodo di 3 mesi. A causa dei rilevanti spostamenti in atto, tali strumenti furono rimossi ed il monitoraggio continuo degli spostamenti proseguì grazie ad un distanziometro di superficie.

Una volta verificatasi la rottura del distanziometro a corda di invar precedentemente descritta, il nuovo distanziometro laser installato dovrebbe garantire la registrazione continua degli spostamenti su di una ampia base temporale. I dati ottenuti nella zona superiore della frana saranno confrontati con gli spostamenti misurati agli inclinometri fissi che sono stati installati in un foro posto in prossimità del piede della scarpata, lungo una strada principale, grazie all'autorizzazione del Dipartimento Cantona-



le dei Lavori Pubblici al quale siamo grati. Gli spostamenti misurati dal nuovo distanziometro saranno inoltre controllati periodicamente eseguendo una misura indipendente della distanza tra gli stessi due punti con un distanziometro geodetico DM250 della Kern. Infine i dati provenienti dal punto mobile saranno posti in relazione con i livelli piezometrici registrati in continuo in un foro posto nelle immediate vicinanze dello stesso.

Infine in prossimità del punto fisso del distanziometro laser è stata predisposta una stazione meteorologica automatica per il rilievo di temperatura, umidità e velocità del vento (vedi Fig. 3).

### Risultati ottenuti

Durante gli ultimi due mesi non si sono verificati significativi spostamenti, risultando compresi nell'intervallo  $\pm 2$  cm (vedi Fig. 3). Tale tendenza è confermata anche dalle misure di velocità derivate dalle misure geodetiche eseguite in un periodo di 7 mesi, che raggiungono i 5 mm/mese.

Nei primi 10 giorni del monitoraggio continuo (dal 12 al 22 marzo) durante il quale le temperature furono costantemente al di sotto degli  $0^{\circ}\text{C}$  senza pioggia e quasi senza vento, la curva mostra misure praticamente costanti (quasi sempre nel campo  $\pm 6$  mm). A seguito dello scioglimento della neve, dal 23 marzo al 14 aprile si è osservata una significativa variazione di distanza; essa può spiegarsi in termini di scorrimento differenziale che influenza le spine a cui sono fissati i cavi che mantengono in posizione verticale il prisma (alcuni di questi cavi sono andati fuori uso nella metà di aprile). In seguito (dal 15 al 25 aprile), è stata osservata una leggera tendenza a spostamenti verso il basso con velocità medie di 1 cm/mese. Sfortunatamente dopo tale data alcune misure sono andate perdute in quanto il raggio laser non ha intercettato più il prisma, probabilmente

a causa di un accidentale movimento della stazione fissa.

È importante sottolineare che i primi mesi del 1996 sono stati praticamente secchi, di conseguenza non deve sorprendere che i movimenti misurati sono ben al di sotto dei 2 cm/mese registrati nei due anni precedenti agli inclinometri.

### Prospettive

È necessario ancora del tempo per controllare la precisione e soprattutto l'affidabilità di questo nuovo distanziometro. Ai fini di una osservazione continua di spostamenti di punti, esso rappresenta una soluzione economica ed alternativa ad un teodolite e distanziometro motorizzato che costa circa 25 volte di più. Inoltre, grazie alla sua leggerezza e facilità di trasporto ed installazione, il suo utilizzo è favorevole su pendii ripidi.

Tuttavia va sottolineato che tale attrezzatura non può essere utilizzata per pendii caratterizzati da movimenti rapidi, nel qual caso il raggio laser potrebbe "perdere" il riflettore a causa dei movimenti di quest'ultimo in una direzione diversa da quella del raggio. In tali casi, è però possibile predisporre più prismi in vari punti, incrementando così la probabilità di ricevere il raggio laser riflesso. Tra l'altro va tenuto in conto il possibile ostacolo causato dalla crescita di vegetazione spontanea (alberi, ramificazioni, etc.).

La necessaria fase finale di sviluppo per questo strumento è connessa alla possibilità di trasmettere i dati con modem e telefono portatile allo scopo di ricevere i dati di spostamento in tempo reale su di un calcolatore al proprio posto di lavoro per controllare immediatamente il buon funzionamento del sistema di misura o di acquisizione.

*(traduzione a cura di Alessandro Mandolini)*