

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

# XXIV CONVEGNO NAZIONALE DI GEOTECNICA

Napoli, 22-24 giugno 2011



## INNOVAZIONE TECNOLOGICA NELL'INGEGNERIA GEOTECNICA

VOLUME 2

EDIZIONI AGI

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

**XXIV CONVEGNO NAZIONALE  
DI GEOTECNICA**

Napoli, 22-24 giugno 2011

**INNOVAZIONE TECNOLOGICA  
NELL'INGEGNERIA GEOTECNICA**

**VOLUME 2**

EDIZIONI AGI

Copyright by Associazione Geotecnica Italiana – Roma

I diritti di traduzione e di adattamento totale o parziale, con qualsiasi mezzo sono riservati per tutti i Paesi.  
È inoltre vietata la riproduzione, anche parziale, compresa la fotocopia, anche ad uso interno o didattico, non autorizzata.

Opera completa 2 volumi: ISBN 978 88 97517 00 9

Volume: 1 ISBN 978 88 97517 02 3

Volume: 2 ISBN 978 88 97517 04 7

Stampato nello Stabilimento Litograf Editor - Città di Castello (PG)

## TECNICHE DI RILIEVO E MONITORAGGIO DELLA FRANA DI MONT DE LA SAXE (COURMAYEUR – AO)

Broccolato M. \*, Cancelli P. \*\*, Crosta G.B. \*\*\*, Tamburini A. \*\*\*\*, Alberto W. \*\*\*\*

\* Regione Autonoma Valle D'Aosta, Assessorato OO.PP. Difesa del Suolo e Edilizia Residenziale Pubblica, Dip. Difesa del Suolo e Risorse Idriche, Servizio Geologico, Quart (AO), Italy

\*\* Studio Cancelli Associato, Milano, Italy

\*\*\* DIP. Scienze Geologiche e Geotecnologie, Milano, Italy

\*\*\*\* IMAGEO Srl, Torino, Italy

### SOMMARIO

Il versante nord-occidentale del Mont de la Saxe (Courmayeur, AO) è interessato da un fenomeno franoso che è stato caratterizzato da una notevole attività ed evoluzione nell'ultimo decennio. Il corpo di frana coinvolge un ammasso di scisti argillosi fortemente tettonizzati con profondità massime dell'ordine del centinaio di metri per un volume complessivo di circa  $8 * 10^6 \text{ m}^3$ . Il presente contributo presenta l'avanzamento degli studi riguardo l'assetto geomorfologico del fenomeno, l'evoluzione recente (a partire dal 2002), i dati raccolti nel corso di successive campagne di studio, la progettazione e messa in opera di un complesso sistema di monitoraggio (automatico e manuale) degli spostamenti. I dati del monitoraggio, disponibili in tempo reale o "quasi reale", consentono l'osservazione dell'evoluzione del versante, in condizioni ambientali molto diverse, e quindi la gestione del piano di protezione civile sulla base di soglie di allertamento definite appositamente.

Parole chiave: monitoraggio, rilievo, stabilità dei versanti

### 1. INTRODUZIONE

L'acquisizione di dati di monitoraggio tramite l'applicazione di diverse tecniche è un requisito fondamentale per la comprensione dei processi di instabilità di versante, in particolare dei meccanismi di movimento, dei suoi fattori di controllo e per la previsione delle modalità evolutive dei fenomeni stessi. Inoltre, la disponibilità di dati di monitoraggio è fondamentale per la messa a punto e la calibrazione di modelli per l'analisi di stabilità dei versanti e ai fini di un loro impiego per la previsione delle modalità evolutive degli stessi.

In questo contributo si presenta il caso della frana del Mont de la Saxe (prov. AO) e in particolare il sistema integrato messo in opera per il monitoraggio in tempo reale/quasi reale degli spostamenti.

### 2. ASSETTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO

Nell'ambito della recente campagna di indagini sul fenomeno franoso di Mont de la Saxe, è stato condotto uno studio geomorfologico di dettaglio mediante rilievi in sito e fotointerpretazione estesi ad un'area significativa nell'intorno della frana.

Nel complesso, gran parte del fianco sinistro della Val Ferret (di cui Mont de la Saxe rappresenta l'estremità

meridionale) è interessato da fenomeni di deformazione gravitativa profonda, caratterizzati da morfostrutture lineari (scarpate e controscarpate) ben evidenti e di notevole continuità. Tali instabilità sono fortemente controllate dall'evoluzione geomorfologica della valle (escavazione glaciale e fasi di glaciazione e deglaciazione) e dalla struttura geologica caratterizzata dalla presenza del Fronte Pennidico e dalla zona di taglio al margine meridionale del massiccio del M. Bianco, lungo le valli Veny e Ferret, a cui è legata la presenza di scisti argillosi neri (De Giusti et al., 2005) tettonizzati e verticalizzati. La frana del Mont de la Saxe è collocata allo sbocco della val Ferret e quindi in corrispondenza dell'estremità occidentale di tale serie di grandi deformazioni di versante

Il versante è quindi stato soggetto ad un'evoluzione classificabile come Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV) (Progetto IFFI, Ratto et al., 2007) entro cui si sono sviluppati dei fenomeni di instabilità secondaria (Figura 1). Scarpate, controscarpate, trincee e sdoppiamenti di cresta sono in parte associabili all'assetto geologico strutturale e condizionano sia la presenza di fenomeni di instabilità che il reticolo idrologico superficiale lungo il versante (Giardino et al., 2004).

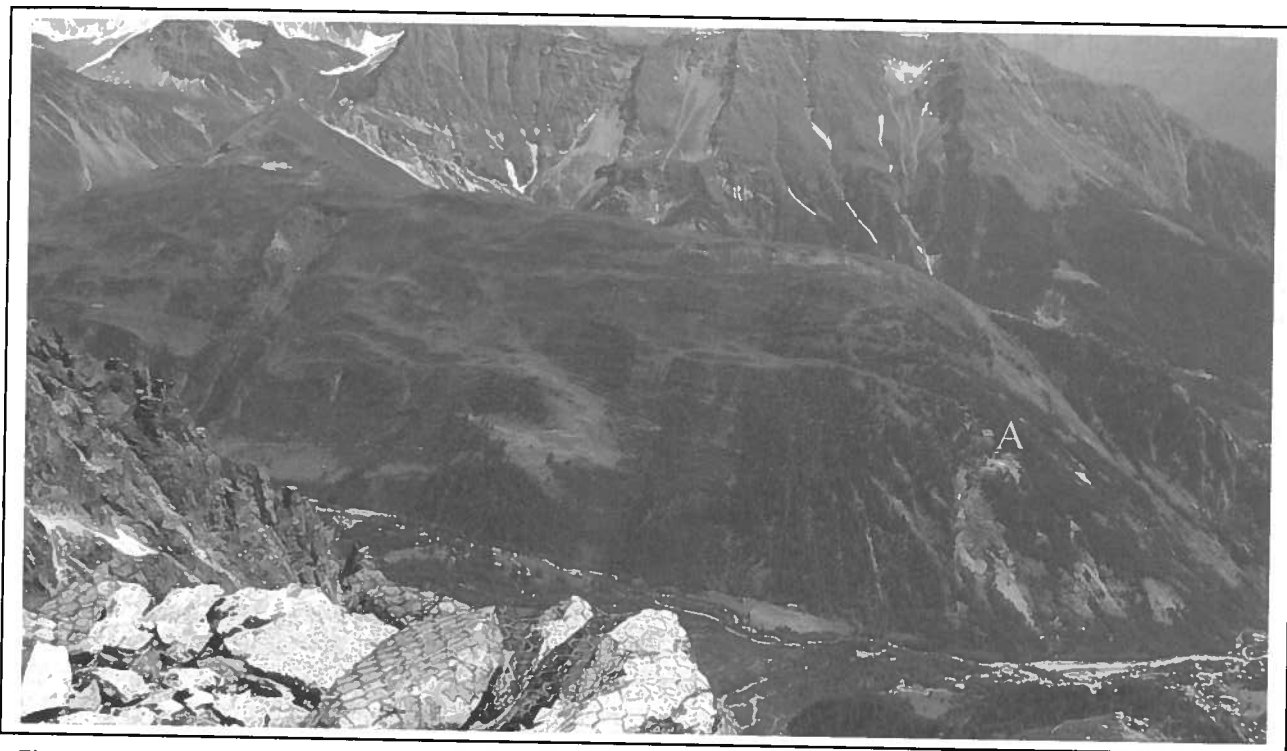


Figura 1 – Settore occidentale del fianco sinistro della Val Ferret caratterizzato dalla presenza di morfostrutture di diverso ordine. A) localizzazione della frana di Mont de La Saxe sul limite occidentale del versante sinistro della valle.

L'analisi dei dati raccolti ha permesso l'interpretazione del fenomeno franoso come complesso e poligenico, con settori caratterizzati da differenti meccanismi di instabilità, e da differenti stili e gradi di evoluzione gravitativa (Figura 2).

Nel dettaglio, si riconosce un'ampia fascia nella parte superiore e settentrionale della frana del Mont de La Saxe (settori 3a, 3b, 4 in Fig. 2) caratterizzata da scarpate e trincee longitudinali aperte in roccia fratturata e disarticolata in cui localmente si osservano fenomeni di ribaltamento, mentre la componente di scivolamento è sempre presente e diventa via via più evidente verso valle.

La parte centrale (setto 5) è caratterizzata da ampie coltri detritico-colluviali e da una morfologia meno articolata in cui la deformazione avviene senza apparente disarticolazione dell'ammasso. Al margine settentrionale e in una limitata fascia si riconoscono settori (6a e 6b) fortemente fratturati e con abbondante copertura detritica caratterizzati da intensa deformazione.

In corrispondenza della scarpata frontale del fenomeno (setto 7) si osserva un'evoluzione per crollo con impostazione di falde e coni di detrito.

## 2 LA RETE DI MONITORAGGIO

La frana di Mont de la Saxe è oggetto di studio e di monitoraggio a partire dal 2002 con misure topografiche manuali condotte con frequenza semestrale/annuale. Dal 2008 a oggi è stata progettata una rete strumentale articolata per la misura manuale ed automatica degli spostamenti superficiali, profondi e dei diversi processi associati. Nello stesso intervallo di tempo sono stati

realizzati 7 sondaggi profondi (ca. 100 m) a carotaggio continuo. Lo scopo principale della progettazione della complessa rete di monitoraggio è stato, oltre alla caratterizzazione degli spostamenti, quello di ottenere una ridondanza di misure per a) confrontare e validare i risultati dei diversi strumenti, b) garantire un'ampia disponibilità di dati in condizioni meteorologiche avverse.

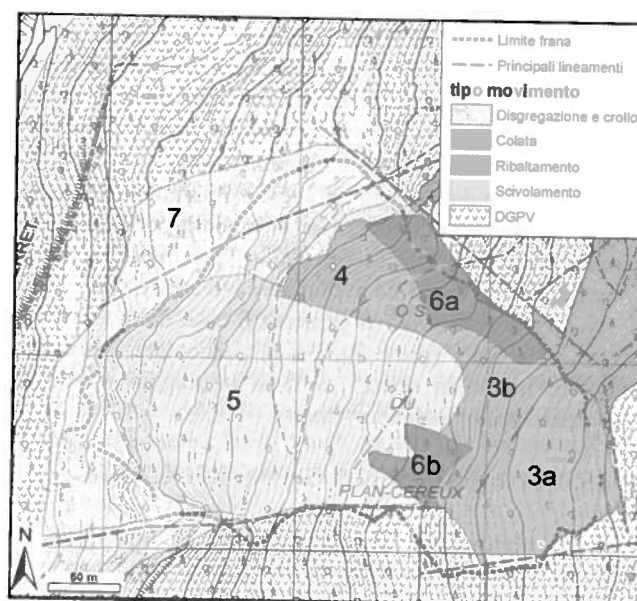


Figura 2 – Suddivisione della frana di Mont de la Saxe in settori a comportamento omogeneo.

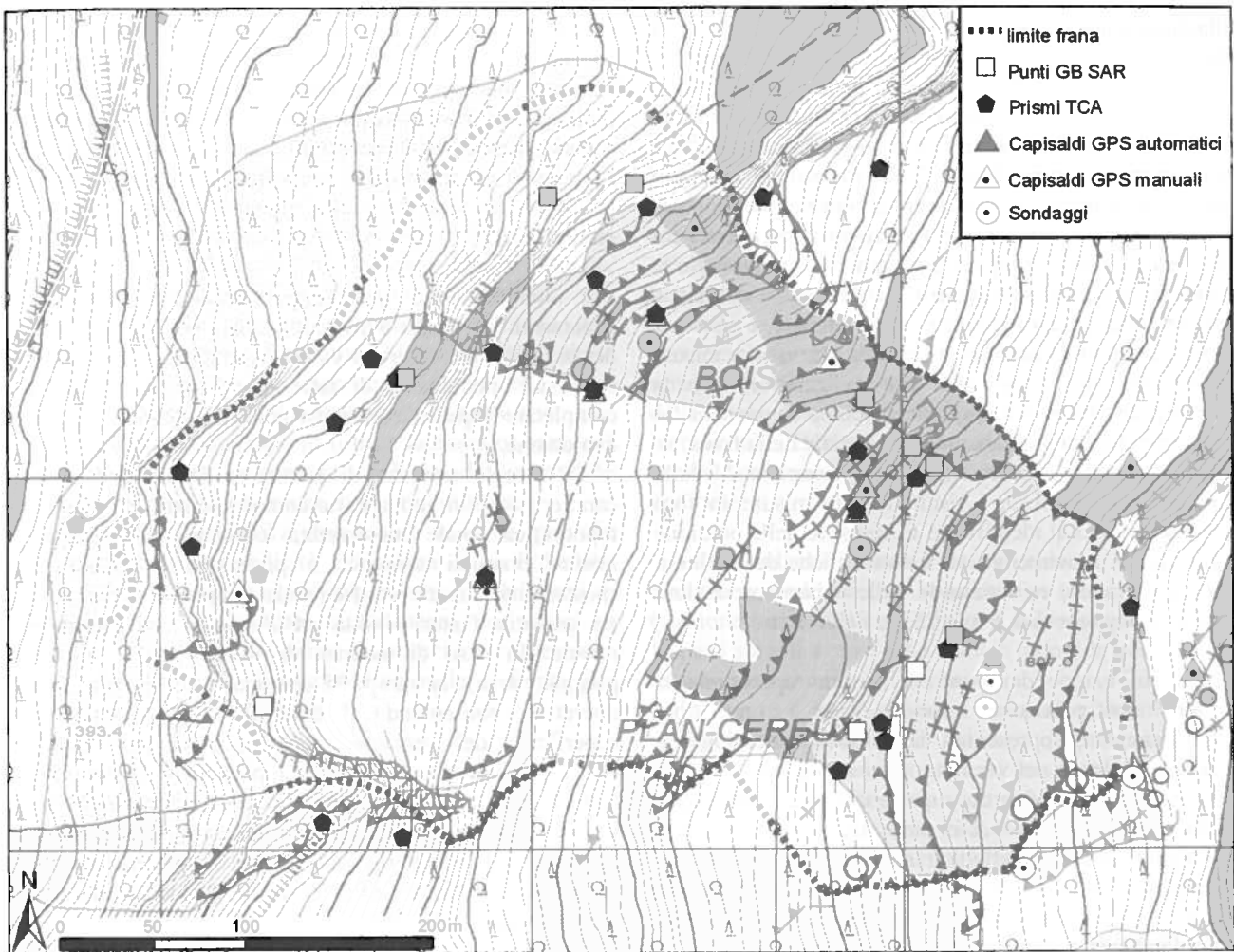


Figura 3 – Ubicazione e distribuzione dei punti di monitoraggio sulla frana di Mont de la Saxe.

Il sistema di monitoraggio comprende (Figura 3):

- una rete topografica automatizzata con 25 punti di misura;
- una rete GPS automatizzata con 5 stazioni di misura;
- una rete GPS manuale con 9 capisaldi in frana e rilevata con periodicità mensile;
- una stazione LisaLab GB\_InSAR (Synthetic Aperture Radar; sviluppato da Ellegi srl) che illumina dal versante opposto la porzione visibile della frana, e configurata per fornire le mappe di spostamento della frana ad intervalli di 4 ore
- 4 tubi inclinometrici installati nei sondaggi, a lettura manuale quindicinale o mensile, in funzione del grado di attività della frana;
- una colonna inclinometrica automatica (DMS sviluppato da CSG srl) installata in uno dei fori di sondaggio, a lettura continua;
- 3 estensimetri a filo a lettura automatica, installati nei fori di sondaggio realizzati nella parte alta del versante;
- 4 piezometri automatici installati nei fori di sondaggio.

La rete topografica automatizzata è costituita da 25 prismi riflettenti, di cui 4 esterni alla frana che fungono da riferimento, la cui posizione viene determinata automaticamente ad intervalli orari con una stazione topografica totale motorizzata alloggiata entro una struttura di protezione in legno ubicata sul versante opposto. Nella medesima struttura è collocato il radar interferometrico LisaLab con piattaforma posizionata a terra (GBInSAR) che consente di rilevare il campo degli spostamenti superficiali della frana con continuità spaziale (dimensione celle da 0.5 a 4.4 m in funzione della distanza compresa tra i 500 m e i 2000 m circa), fornendo inoltre le serie temporali di spostamento di 10 punti distribuiti entro il perimetro dell'area in movimento. Il tempo di acquisizione di una immagine è pari a circa 9 minuti. La disponibilità di mappe di spostamento ha consentito di integrare le conoscenze geomorfologiche acquisite sul versante e ha supportato la definizione del limite di frana nelle aree con parziale copertura di depositi detritici superficiali.

Per la rete GPS automatizzata sono stati utilizzati ricevitori geodetici a singola frequenza che trasmettono ogni 15 secondi i dati di fase ad una stazione di acquisizione alloggiata nella struttura che ospita la stazione topografica ed il sistema GBInSAR, nei pressi



della quale è stata installata la stazione di riferimento della rete.

Mentre la rete topografica e la rete GPS automatizzate consentono di effettuare misure di spostamento nelle tre dimensioni, il sistema GB\_InSAR consente di misurare solo la componente dello spostamento proiettata lungo la direzione di vista, a fronte del vantaggio di poter ottenere delle vere e proprie mappe di spostamento con periodicità predefinita e con possibilità di ulteriore analisi dei dati a posteriori. Per ovviare a questo inconveniente, e sfruttare al meglio le potenzialità del sistema, la stazione di misura è stata ubicata in posizione tale da garantire che la direzione di vista sia pressoché coincidente con la direzione media di spostamento superficiale della frana.

La rete di monitoraggio è completata dalla strumentazione in foro. I risultati delle misure in foro hanno consentito di identificare lo spessore della porzione di versante in movimento e le caratteristiche del deflusso idrico sotterraneo, evidenziando delle chiare correlazioni tra regime piezometrico e movimenti della frana.

La distribuzione dei punti di misura rappresenta la miglior configurazione possibile a fronte dei condizionamenti rappresentati dagli aspetti morfologici e logistici (pendenza del versante, presenza di alte scarpate in roccia e accumuli detritici superficiali) e dalla copertura boschiva, che interessa buona parte del settore centrale e del margine meridionale della frana.

Riassumendo, la rete di monitoraggio realizzata rispetta quindi i seguenti requisiti fondamentali:

- ridondanza di dati;
- possibilità di operare in ogni condizione meteorologica;
- possibilità di minimizzare l'influenza delle condizioni atmosferiche sulle misure;
- disponibilità di informazioni spazialmente e temporalmente continue, che consentano di adeguare in modo tempestivo la configurazione delle reti di misura all'evoluzione del versante;
- possibilità di accesso remoto ai sistemi di acquisizione dati.

Tali requisiti sono stati ritenuti necessari al fine di poter garantire il controllo continuo del versante in ogni condizione e quindi garantire un servizio di allertamento degli abitati e delle infrastrutture ubicate entro l'area di invasione potenziale in caso di collasso della frana, definita con approccio modellistico.

### 3 IL SISTEMA DI ALLERTAMENTO

Il sistema di allertamento delle popolazioni e delle infrastrutture a valle del versante è basato sull'analisi dei dati acquisiti dalle reti di monitoraggio automatizzate mediante confronto con valori di soglia predefiniti applicati alla misura di alcuni parametri considerati come precursori di evento. In particolare vengono considerati utili ai fini dell'allertamento i valori puntuali di spostamento superficiale misurati dalla rete topografica automatizzata, dalla rete GPS automatizzata ed i valori

puntuali di spostamento estratti dalla mappa di spostamento fornita dal sistema GBInSAR. L'impiego di diverse tipologie strumentali consente una verifica indipendente dei dati acquisiti, mentre il ricorso a valori di soglia strumentale predefiniti consente di sollevare l'operatore incaricato del controllo dalla soggettività di giudizio in merito all'evoluzione del fenomeno controllato.

L'identificazione in tempo reale di eventuali superamenti di soglia è integrata da una periodica verifica dei criteri di analisi e dei valori di soglia adottati, che si basa sull'integrazione di tutte le misure disponibili a completare il quadro conoscitivo del fenomeno e della sua evoluzione.

Le diverse tecniche di misura utilizzate presentano caratteristiche in buona parte complementari. La stazione topografica totale motorizzata consente di effettuare misure puntuali semplici e pressoché istantanee di spostamento con elevata frequenza temporale, a patto che sia garantita l'intervisibilità tra la stazione ed i punti di misura. In caso di assenza di visibilità (es.: nebbia, pioggia, neve), la rete GPS automatizzata è comunque operativa, consentendo il controllo degli spostamenti superficiali del versante anche in condizioni meteorologiche avverse. Oltre a garantire il controllo automatizzato di alcuni punti di misura distribuiti sul versante, ad integrazione dei dati puntuali già disponibili, la tecnica GBInSAR fornisce mappe di spostamento che consentono un'ulteriore verifica indipendente dei dati acquisiti dalle altre reti. I dati GB\_InSAR consentono anche la verifica periodica dell'adeguatezza dell'architettura delle reti di misura puntuali, in base alle conoscenze disponibili al momento sul versante.

L'analisi dei dati di spostamento acquisiti durante un arco temporale di circa un anno e mezzo ha consentito l'adozione di due valori di soglia, rispettivamente associati allo stato di pre-allertamento ed allertamento dei piani di protezione civile. Tali valori soglia sono stati posti pari rispettivamente a 1 mm/h e 2 mm/h, e sono sottoposti a periodica verifica in funzione dell'evoluzione temporale del fenomeno.

I valori soglia sono stati inizialmente definiti sulla base della bibliografia disponibile sull'argomento e dell'analisi di casi di studio inediti ritenuti confrontabili con quello in esame, per i quali sono disponibili misure di velocità di spostamento pre-collasso o durante fasi di riattivazione periodica. Nei casi analizzati sono state determinate le velocità di spostamento pre-collasso, corrispondenti a tempi di preannuncio predefiniti, ottenute dall'estrapolazione dei valori di spostamento disponibili mediante l'approccio proposto da Voight (1988, 1989) sino all'istante di crollo presunto. Tale approccio semi-empirico rappresenta uno dei più utilizzati ai fini della determinazione dei tempi di collasso (Crosta & Agliardi, 2002, 2003, Rose & Hungr, 2006) ed è stato proposto come strumento da impiegare per la previsione delle frane e la programmazione dei piani di emergenza nell'ambito delle attività del Servizio Nazionale della Protezione Civile (Pellegrino et al., 1993; WP/WLI, 1993, 1994).

L'analisi condotta sui dati a disposizione ha evidenziato che, qualora fossero stati adottati nei casi esaminati, i valori di soglia proposti avrebbero consentito tempi di preannuncio tali da consentire l'attivazione di tutte le misure previste dal piano di protezione civile attualmente in vigore.

Allo scopo di limitare i falsi allarmi legati a dati strumentali anomali, è stato previsto che il sistema generasse segnalazioni di pre-allertamento e/o allertamento solo nel caso in cui si verificano due superamenti di soglia consecutivi. Allo stato attuale delle conoscenze, si ritiene che l'approccio adottato ed i valori proposti possano essere considerati conservativi, pur consentendo nel contempo di filtrare la maggior parte dei falsi allarmi che potrebbero derivare dall'inevitabile rumore associato alle tecniche di misura utilizzate.

La procedura operativa attualmente in vigore prevede la redazione con periodicità giornaliera di un bollettino ufficiale riportante lo stato di funzionamento delle reti di monitoraggio e l'eventuale superamento dei valori di soglia. L'attivazione del piano di protezione civile viene decisa dal Servizio Geologico Regionale a fronte dei risultati dei controlli effettuati.

#### 4 L'EVOLUZIONE STORICA E RECENTE DELLA FRANA

Prima dell'installazione del sistema di monitoraggio attuale, gli spostamenti superficiali della frana venivano periodicamente controllati mediante misure di trilaterazione su un esiguo numero di capisaldi, che, in funzione dell'evoluzione della frana, sono andati progressivamente perduti. Sulla base delle serie storiche strumentali disponibili, opportunamente raccordate tra loro, è stato possibile tracciare il quadro evolutivo della frana a partire dal 2002. Tale raccordo è stato possibile nonostante il periodo antecedente l'installazione delle nuove reti di misura sia stato caratterizzato da un limitato numero di punti di misura e da una ridotta frequenza temporale delle misure stesse (da semestrale ad annuale). Per contro, l'elevato numero di misure disponibili a partire dalla seconda metà del 2009 ha consentito di seguire l'evoluzione spaziale e temporale degli spostamenti. Questo ha portato a una zonazione della frana in settori a comportamento diverso e al riconoscimento di fasi di accelerazione e di decelerazione che caratterizzano il movimento a scala stagionale/annuale della frana.

L'analisi della serie storica 2002-2010 (Figura 4) permette di apprezzare il trend pluriennale di spostamento del settore sommitale della frana. Poiché fino al 2008 le misure venivano effettuate una/due volte all'anno, non è possibile analizzare l'andamento stagionale degli spostamenti, che risulta invece molto ben riconoscibile negli ultimi due anni per i quali sono disponibili dati in continuo.

Il trend generale mostra spostamenti annui di circa 25-

30 cm nel periodo 2002-2006, che aumentano a circa 50-70 cm nel biennio 2007-2008, per raggiungere valori di circa 90-100 cm nel biennio 2009-2010. I dati recenti indicano una chiara stagionalità degli spostamenti per cui i più elevati spostamenti si registrano nel periodo tra maggio e luglio, mentre i tassi minimi si registrano nel corso della stagione invernale. La Figura 5 mostra chiaramente come durante la stagione invernale le velocità si mantengono prossime o al di sotto di valori pari a 1.5 mm/giorno, pur con una certa variabilità spaziale; mentre durante la primavera si assiste ad un'importante accelerazione che porta a velocità superiori ai 10 mm/giorno, per il settore superiore e più settentrionale della frana, e a circa 5 mm/giorno per la parte bassa e meridionale. Durante il periodo primaverile per alcuni capisaldi si sono registrati tassi di spostamento fino a 45 cm/mese.

La ridondanza delle misure ha permesso di verificare l'ottimo accordo tra dati acquisiti con tecniche differenti (stazione totale, GPS e GBInSAR nell'esempio in Figura 5) per i singoli settori della frana e quindi la possibilità di monitorare in continuo l'attività.

In Figura 6 viene proposto un quadro sinottico degli spostamenti superficiali in cui sono rappresentati sia le direzioni di spostamento che il rapporto fra velocità giornaliere nella stagione autunnale-invernale e nella stagione primaverile-estiva. Sia nel 2009 che soprattutto nel 2010 si sono osservati importanti fasi di riattivazione con aumento di un ordine di grandezza nei tassi di spostamento durante la primavera e l'estate.

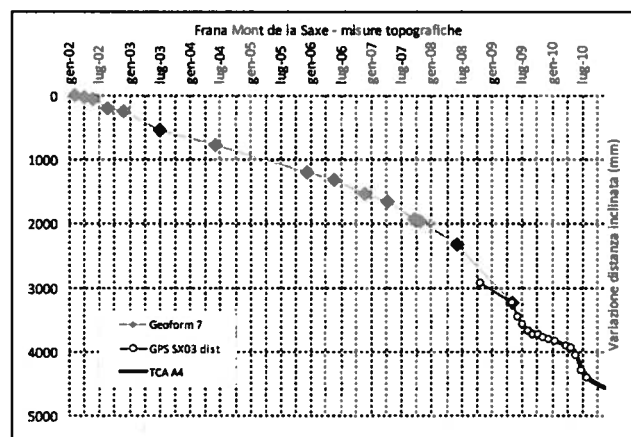


Figura 4 - Serie storica di spostamento del settore sommitale della frana di Mont de la Saxe, ottenuta raccordando tra loro i risultati delle misure di trilaterazione eseguite dal 2002 al 2008 con le misure GPS manuali(2008-2009) e le misure topografiche automatizzate (2009-2010). Gli spostamenti sono rappresentati in termini di variazione (in mm) della distanza inclinata tra stazione di misura ubicata sul versante opposto e tre capisaldi ubicati nella parte alta della frana.



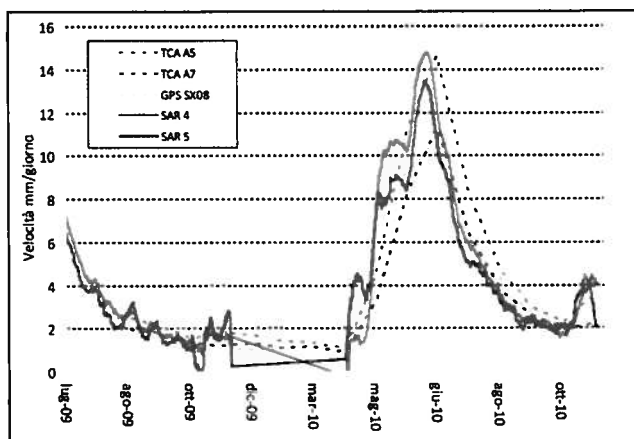


Figura 5 – Andamento delle velocità di spostamento (in mm/giorno) misurate dai diversi strumenti nella parte medio alta della frana: capisaldi rete topografica TCA A5 e A7, caposaldo rete GPS manuale SX8 e punti GB-SAR 4 e 5.

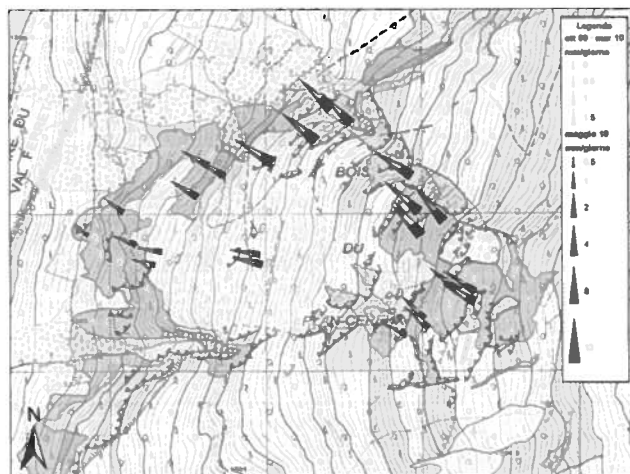


Figura 6 – Quadro sinottico degli spostamenti superficiali della frana. La lunghezza dei vettori è proporzionale alla velocità media giornaliera di spostamento superficiale della frana nel periodo ottobre 2009 – marzo 2010 (in colore chiaro) e nel solo mese di maggio 2010 (in colore scuro).

Il campo degli spostamenti cumulati per l'intero periodo 2009-2010 è riportato in Figura 7a. Gli spostamenti sono rappresentati per l'intero settore visibile del versante ed evidenziano un netto incremento degli spostamenti muovendosi verso il fianco destro della frana, così come evidenziato anche in Figura 6. La Figura 7b mostra invece l'evoluzione temporale degli spostamenti monitorati in corrispondenza di 10 punti sparsi lungo il versante: L'effetto stagionale e il diverso grado di attivazione del corpo di frana è evidente nelle serie temporali.

I dati di spostamento profondo (inclinometri manuali ed automatici) indicano la presenza di una superficie di movimento a circa 70 m di profondità nel settore centrale della frana (Figura 8), mentre nella parte alta le deformazioni appaiono distribuite su buona parte dello spessore del corpo di frana, almeno per i primi 50 m di

profondità. Nel corso del 2010, a causa della riattivazione tardo primaverile, tre tubi inclinometrici si sono interrotti in successione. Uno di questi è stato riperforato allo scopo di installare al suo interno una catena inclinometrica automatizzata del tipo DMS (CSG srl) in grado di fornire misure in continuo e di immediato impiego ai fini dell'allertamento.

Oltre allo spostamento superficiale, vengono misurati i principali parametri meteorologici, la portata delle sorgenti ed il livello dell'acqua nei sondaggi. Le misure hanno evidenziato una netta stagionalità nella quantità di acqua circolante in superficie e in profondità nel corpo di frana (Figura 9). In particolare, con la primavera si assiste ad un aumento dei livelli piezometrici, altrimenti stabili in prossimità della quota della superficie di movimento, e ad un aumento del numero e della portata delle sorgenti al piede del versante e della frana. Nella stagione autunnale ed invernale la quantità di acqua circolante si riduce drasticamente, come testimoniato dalla riduzione della portata delle sorgenti o la loro temporanea scomparsa. Lo scostamento delle risposte e dei picchi del livello piezometrico e di quello delle sorgenti appare evidente nel diagramma di Figura 9.

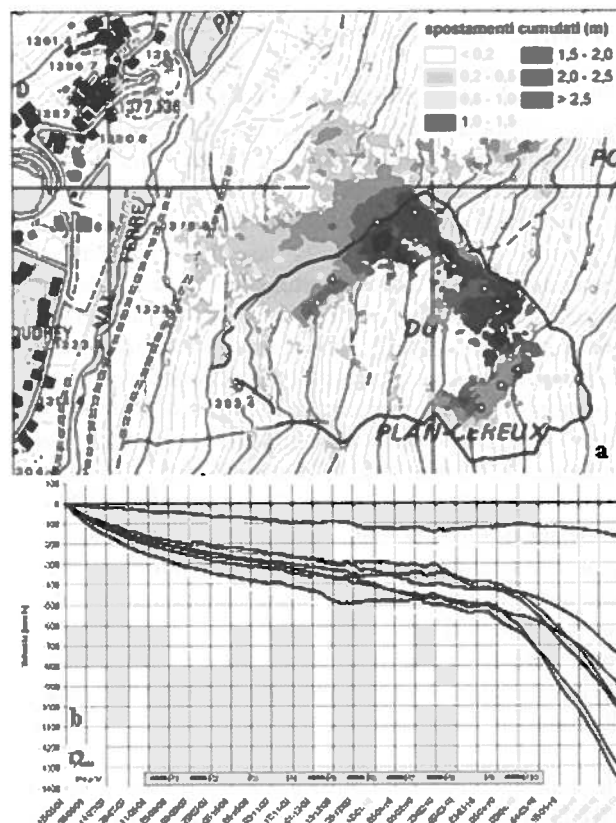


Figura 7 – a) Mappa degli spostamenti cumulati (2009-2010) per l'area del Mont de la Saxe misurati con sistema GB\_InSAR. b) Serie temporali degli spostamenti cumulati per 10 punti individuati sul versante e rappresentati come cerchi vuoti nella mappa di fig. 7a).

#### 4 CONCLUSIONI

I recenti studi effettuati sulla frana del Mont de la Saxe (Courmayeur, AO) hanno consentito di ricostruire l'evoluzione a partire dal 2002, integrando il quadro conoscitivo disponibile e consentendo di mettere in opera un sistema di monitoraggio integrato degli spostamenti superficiali e profondi e della circolazione idrica sotterranea.

Contestualmente all'installazione delle reti di monitoraggio è stato attivato un sistema di allertamento a salvaguardia di popolazioni, strutture ed infrastrutture poste entro l'area di potenziale espansione in caso di collasso della frana.

L'analisi dei dati raccolti ha permesso l'interpretazione del fenomeno franoso come complesso e poligenico, in cui diversi settori sono caratterizzati da differenti meccanismi di movimento prevalente e da differente grado di evoluzione.

I dati acquisiti dal sistema in questo periodo di esercizio, se confrontati con quelli precedenti, hanno evidenziato:

- un progressivo e generalizzato aumento della velocità di spostamento della frana, evidente soprattutto negli ultimi tre anni;
- una spiccata stagionalità legata alla circolazione idrica profonda, che nel caso specifico appare correlata essenzialmente alla fusione del manto nevoso.

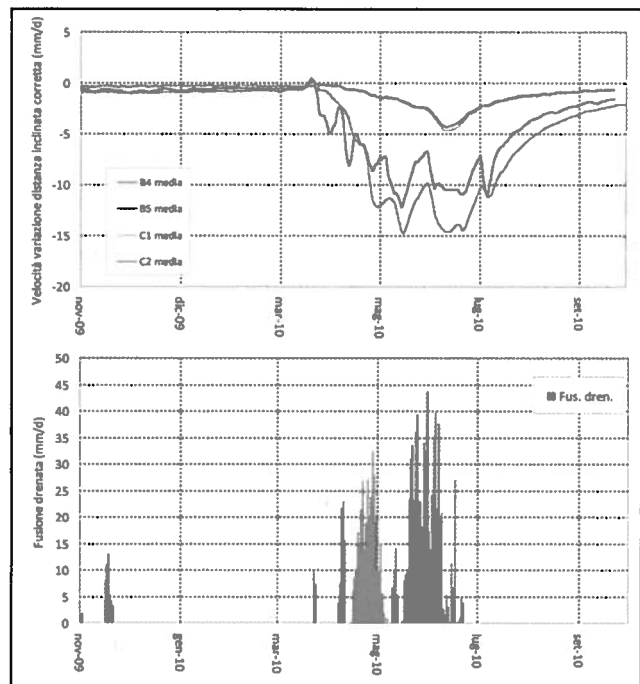


Figure 10 – Confronto tra velocità giornaliera (in mm/giorno) di quattro capisaldi della rete topografica (in alto) e quantità di fusione drenata del manto nevoso (in mm/giorno; in base al modello di Oleson & Dai, 2004) nel corso del 2010 (in basso).

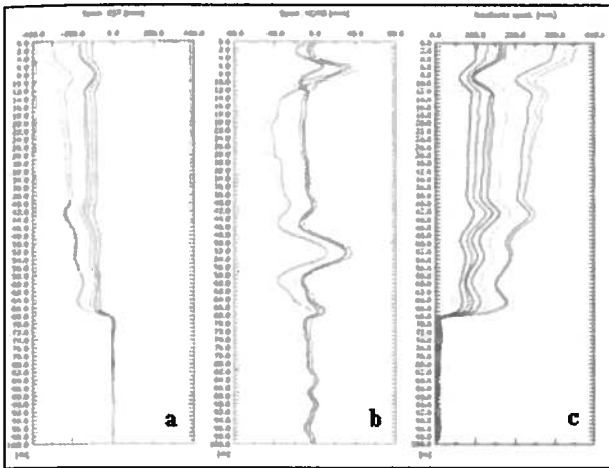


Figure 8 – Dati di spostamento profondo (a) componente est; (b) componente nord; (c) risultante) nel settore centrale della frana di Mont de la Saxe indicanti una profondità della superficie di spostamento a circa 70 m dal p.c.. Nel giugno del 2010 si è verificata la rottura del tubo inclinometrico a 68 m dal p.c.

In Figure 10 è invece illustrato l'andamento delle velocità di spostamento superficiale registrate da tre capisaldi della rete topografica automatizzata rispetto all'andamento della fusione del manto nevoso, stimata in base al modello di Oleson & Dai (2004). La fusione, nel periodo primavera-estate 2010, presenta un andamento bimodale, con due fasi principali separate da un periodo, a cavallo tra aprile e maggio, durante il quale la temperatura dell'aria ha subito un sensibile abbassamento.

In entrambi gli eventi di fusione si nota un ritardo tra picco di fusione e picco di velocità dell'ordine di una settimana. Tale ordine di grandezza del ritardo può chiaramente variare in funzione delle condizioni ambientali, delle temperature e delle precipitazioni del periodo antecedente l'evento di fusione.

Gli effetti sulle velocità di spostamento superficiale della frana sono chiaramente visibili, a dimostrazione del fatto che il movimento della frana è governato dalla circolazione idrica legata al processo di fusione del manto nevoso.

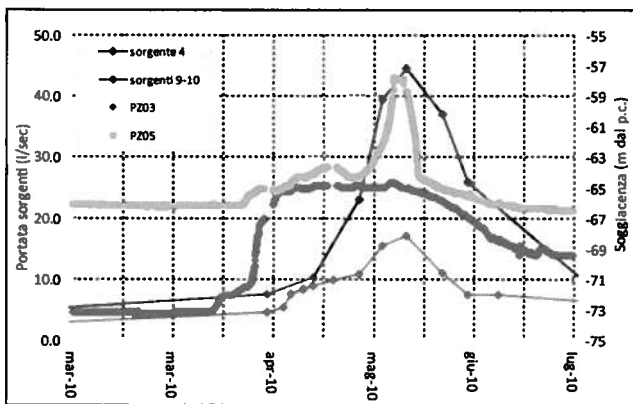


Figure 9 – Andamento della portata delle sorgenti poste a monte (sorgente 4) e al piede (sorgenti 9-10) della frana rispetto all'andamento della soggiacenza (in metri) misurata nei piezometri installati nella parte centrale della frana.

## 5 BIBLIOGRAFIA

- Crosta, G., Agliardi, F., 2002. *How to obtain alert velocity thresholds for large rockslides*. Physics and Chemistry of the Earth 27 (2002), pp. 1557–1565.
- Crosta GB, Agliardi F. 2003 *Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements*. Canadian Geotechnical Journal, 40; 1, 76–191.
- Rose ND, Hungr O. 2006 *Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method*. Int J Rock Mech Min Sci 2006; 44:308–320.
- De Giusti F., Bonetto F., Dal Piaz G.V., 2005. *Carta geologica della Valle d'Aosta, scala 1:100.000*. Regione Autonoma Valle d'Aosta, Assessorato territorio, ambiente e opere pubbliche.
- Giardino M., Borgogno Mondino E., Perotti L., 2004. *MIVIS Images classification for the geomorphological characterization of large slope instabilities in Aosta Valley (Italian NW-Alps)*, in In: Ehlers, M. Posa, F., Kaufmann, H.J., Michel, U., De Carolis, G.: "Remote Sensing for Environmental Monitoring GIS applications and Geology", Proceeding of S.P.I.E., vol 5574, 331-340.
- Oleson K.W. & Dai Y., 2004. *Technical description of the Community Land Model (CLM)*. NCAR Technical Note TN-461, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Pellegrino A., Guerricchio A., Lazzari S., Nora B., Valentini G., 1993. *La previsione delle frane ed i piani di emergenza*, CNR-GNDICI, rapporto interno.
- Ratto S., Giardino M., Giordan D., Alberto W., Armand M. 2007. *Carta dei fenomeni franosi della Valle d'Aosta, scala 1:100.000*. Regione Autonoma Valle d'Aosta, Assessorato Territorio, Ambiente e Opere Pubbliche, Tipografia Valdostana, Aosta.
- Voight B., 1988. *Material science law applies to time forecast of slope failure*, Landslides news, 3.
- Voight B., 1989. *A relation to describe rate-dependent material failure*, Science, vol.243.
- WP/WLI-International Geotechnical Societies'UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1993. *A suggested method for describing the activity of a landslide*. IAEG Bull.
- WP/WLI-International Geotechnical Societies'UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1994. *Multilingual glossary for landslides*. IAEG Bull.

## ABSTRACT

THE CONTROL OF THE MONT DE LA SAXE LANDSLIDE (CORMAYEUR-AO) BY TRADITIONAL AND INNOVATIVE MONITORING TECHNIQUES.

Keywords: monitoring, relief, slope stability

The north-west side of Mont de la Saxe (Courmayeur, AO) is affected by the landslide that was characterized by significant activity and changes in the last decade. The landslide involves strongly tectonized schists and shales, with a maximum depth of about 70 meters and volume of about  $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . The landslide is located at the south

western margin of a widespread deep-seated gravitational slope deformation which extends on left side of Val Ferret.

This paper presents the evolution of the landslide since 2002, obtained after the interpretation of the data collected by the automatic and manual monitoring system and the results of the investigations carried out on the slope, which were extremely helpful in assessing the geological model of the landslide.

The monitoring network includes an automatic topographic total station with 23 measuring points, a ground-based radar (GB-SAR), an automated GPS network (5 stations), 3 borehole extensometers, 4 inclinometers and 4 piezometers. The monitoring system started operating in summer 2009, with intervals of acquisition ranging from 1 to 4 hours. Moreover, manual topographic measurements have been taken twice per years since 2002. The results provided by the monitoring system showed that the landslide displacement rate is increasing through time. Late spring reactivations of the landslide were observed and correlated with the snowmelt.

Thanks to the redundancy of measurements, a continuous monitoring of the landslide evolution even under severe meteorological conditions can be carried out. Data are analysed according to pre-defined threshold values, enabling the activation of Civil Protection plans.