



**Développement d'outils méthodologiques pour la détection et
la propagation des éboulements de masse**

Rapporto finale

Italie	Région Autonome de la Vallée d'Aoste Institut Polytechnique de Turin Université de Parme	Aoste Turin Parme
France	Université Joseph Fourier Pôle Grenoblois des Risques Naturels CETE Lyon Cemagref Grenoble Université de Savoie	Grenoble Grenoble Lyon Grenoble Chambéry
Suisse	Centre de Recherche pour l'Environnement Alpin Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	Sion Lausanne

INTERREG IIIA ALCOTRA



<i>Projet n. 023</i>	Développement d'outils méthodologiques pour la détection et l'étude de la propagation des éboulements de masse - « ROCKSLIDETEC »		
<i>Partenariat</i>	Chef de file: Direction de la protection du territoire Assessorat du Territoire, de l'Environnement et des Ouvrages Publics Région Autonome Vallée d'Aoste	Partenaire Transfrontalier: Université Joseph Fourier de Grenoble (Pôle Grenoblois Risques Natureles)	Université de Savoie Canton du Valais CREALP

Localizzazione Geografica

Regione Autonoma Valle d'Aosta	Région Rhône-Alpes (Haute-Savoie, Savoie)
Canton du Valais	Territori adiacenti: Département de l'Isère

Obiettivi del progetto

Il progetto intende mettere a disposizione degli esperti in rischi naturali degli strumenti metodologici avanzati e sperimentati nell'ambito di una stretta collaborazione transfrontaliera. Si tratta da una parte di evidenziare gli indizi d'instabilità e i segnali precursori di un potenziale innesco di frane in roccia, dall'altra parte di determinare l'area d'estensione dei movimenti franosi. L'obiettivo finale del progetto consiste nello sviluppo di uno strumento integrato per la valutazione della pericolosità dei fronti in roccia, messo a punto su siti comuni ed applicabile all'insieme dell'arco alpino.

Impatto transfrontaliero del progetto

La cooperazione tra i partner consiste: nello scambio d'informazioni raccolte in banche dati, nel confronto delle esperienze, nello sviluppo di metodologie e nell'applicazione degli strumenti sviluppati su siti comuni.

Gli enti aderenti al progetto hanno competenze specifiche diverse nel campo dell'analisi della stabilità dei pendii e dello studio della propagazione dei fenomeni di frane in roccia. Si ritiene importante confrontare e convalidare queste conoscenze per fornire agli amministratori degli strumenti validi e approvati dall'insieme dei partner.

Descrizione del progetto

L'individuazione delle zone di distacco potenziali e la valutazione della probabilità di innesco necessitano un approccio empirico basato sull'analisi delle principali frane di roccia che hanno interessato l'arco alpino nel corso degli ultimi secoli. La determinazione del volume potenzialmente instabile e della zona di propagazione si basa su modelli geometrici del sito studiato e su analisi meccaniche del distacco e della propagazione del fenomeno.

Attività	Sintesi
A. <i>Costituzione di un catalogo delle principali valanghe rocciose documentate</i>	Questo catalogo intende permettere di mettere in evidenza le condizioni nelle quali le valanghe di roccia possono verificarsi, nonché di convalidare i metodi d'analisi meccanica del loro innesco e del movimento lungo il pendio.
B. <i>Modellazione geometrica e determinazione dei volumi instabili</i>	Il metodo si avvale di tecniche fotogrammetriche digitali per la messa a punto di un metodo di rilievo specifico. Tali rilievi sono utilizzati per la modellazione geometrica dell'ammasso roccioso. Infine la valutazione del volume potenzialmente instabile viene realizzata sulla base di analisi cinematiche e meccaniche della fase di distacco.
C. <i>Studio e modellazione della propagazione</i>	Diversi metodi di modellazione della propagazione sono stati sviluppati e le metodologie risultanti sono state applicate su siti comuni per permetterne il confronto.
D. <i>Azioni di promozione e comunicazione</i>	Sono state realizzate diverse azioni destinate a far conoscere questo progetto, in particolare ai politici ed agli Enti Territoriali, e a promuovere lo scambio tra i referenti scientifici ed i tecnici responsabili della gestione di questi rischi.

Action A : Catalogo delle valanghe rocciose

1 Introduzione

Le valanghe di roccia sono fenomeni relativamente rari. Per stabilire la ricorrenza di questo fenomeno è essenziale potere estrapolare i dati a partire dall'elaborazione statistica di parametri contenuti in una banca dati (DB) esauriente. La ricorrenza (frequenza) cambierà secondo il contesto geologico-strutturale e geomorfologico del sito e la sua storia climatica. L'estrapolazione consentirà anche di precisare le leggi che stabiliscono le condizioni di pre-rottura, rottura nonché la modalità di propagazione della frana lungo il versante. Trattandosi di fenomeni rari, il catalogo che servirà da base all'elaborazione statistica deve necessariamente coprire un'area molto estesa. Per i proponenti il progetto, l'idea di verificare tale postulato, partendo inizialmente dal territorio di loro competenza, avrebbe dovuto essere la prima fase di un'iniziativa da estendere in seguito su tutto l'arco alpino, dalla Francia alla Slovenia. La complessità del lavoro - dovuta sia alla scelta dei parametri destinati a figurare nel catalogo, sia alla realizzazione di una BD informatizzata efficace - ha pesato non poco sui risultati dell'azione. L'assenza di dati pertinenti, quali quelli forniti dall'applicazione sistematica di metodi moderni di auscultazione delle pareti rocciose (MATTEROCK, RHAP, LPC [Programma Interreg IIc «Prevenzione dei fenomeni di instabilità delle pareti rocciose»]), nonché la mancanza di esperienza nel calcolo di propagazione delle valanghe di roccia (vedasi azione C) hanno rappresentato un lieve handicap per questo test sul territorio dei tre partner.

La definizione di un periodo di ricorrenza per le valanghe di roccia e, a lungo termine, la capacità di previsione sul tipo di ambiente favorevole a future valanghe di roccia – obiettivo ribadito dai proponenti il progetto – si basano sull'ipotesi secondo cui il passato ed il presente rappresentano le chiavi del futuro (Varnes, 1984). In altre parole, gli eventi futuri si produrranno tendenzialmente in condizioni simili a quelle che hanno prevalso in occasione di fratture passate. Come ribadito dall'azione A, è quindi essenziale analizzare e comprendere i meccanismi all'origine degli eventi passati. A partire dalle più importanti valanghe di roccia recenti e documentate in Francia, Italia e Svizzera si trattava di avviare una banca dati la quale, abbinata ad una modalità di elaborazione statistica dei dati, avrebbe dovuto consentire di raggiungere l'obiettivo una volta acquisiti un certo numero di casi.

L'azione A è così ripartita:

- sintesi bibliografica delle principali valanghe di roccia documentate;
- osservazioni integrative su alcuni siti per completare le informazioni ;
- approntamento del catalogo su un'interfaccia tipo BD e sviluppo del supporto informatico provvisoriamente denominato BADABOUM;
- gestione dei dati imputati nella BD (gerarchizzazione, regionalizzazione, quantificazione e validazione).

2 Sintesi bibliografica delle valanghe di roccia

Numerosi sono gli inventari esistenti in letteratura riguardanti valanghe di roccia, alcuni dei quali includono anche eventi quali frane in terra, colate di fango, lave torrentizie, crolli di seracchi. e anche frane di ghiaccio. I più noti sono quelli di Montandon (1933), Strele (1936), Abele (1974), Eisbacher e Clague (1984), Erisman e Abele (2001). Come indicato dagli autori, comprendono eventi con volume superiore a 10^6 o 3×10^6 m³. Vi sono repertoriati altresì eventi di entità più modesta che hanno comunque causato vittime o danni gravi.

Tali inventari sono stati sistematicamente passati al vaglio ed integrati con i casi presenti nelle BD del BdMvt del BRGM (Francia) e InfoSlide del BAFU (Svizzera). Sui 500 censiti, 200 sono valanghe di roccia secondo il significato moderno del termine, ovvero crolli o scivolamenti di pareti rocciose. È evidente che le informazioni sono essenzialmente di tipo descrittivo e, in quanto tali, non possono essere utilizzate a scopo predittivo.

3 BD « Badaboum »

3.1 Filosofia e fasi operative

La BD è stata sviluppata su un supporto informatico al fine di poter procedere all'elaborazione statistica dei dati imputati. È in lingua inglese per consentirne un'ampia diffusione e, in caso di successo, promuoverne un utilizzo al di là del territorio dei partner. Il lavoro si è articolato in varie fasi:

- Definizione dei bisogni ;
- Realizzazione di una versione bêta;
- Test e relative modifiche (in questa fase, non è stato impiegato nessuno strumento di analisi)
- Imputazione dei dati relativi agli eventi con un volume superiore ai 105 m³.

Questo limite minimo di 100'000 m³ è stato dettato dalla necessità di ottenere rapidamente un insieme di dati sufficientemente consistenti per poter lavorare sulla ricorrenza. Senza informazioni pertinenti sugli eventi storici di grande volume, questo esercizio è possibile infatti soltanto con l'impiego di dati relativi a casi recenti di minore entità ma ben documentati.

3.2 Aspetti tecnici della BD

BADABOUM è stata sviluppata da un geologo informatico appositamente per il progetto. È un data base compatibile con MS Access 2000, guidato dal motore MS JetEngine 4.0 e con interfaccia oggetto MS-DAO 3.6. Scelta questa imposta dallo standard Microsoft Windows XP comune a tutti i partner. L'interfaccia utente è stata sviluppata con Delphi 7.

La struttura della banca dati si basa su 38 tabelle suddivise in 305 campi e ruota intorno alla tabella sulle informazioni generali su ogni singola valanga – Rockfall – che, a sua volta, dipende dalla tabella contenente i dati regionali: Valley wall. Cinque table dipendono dalla tabella Rockfall: Initial slope, Discontinuities, Failure, Post-failure slope et Deposit. La tabella Schemas da accesso ai link verso tutti i file di supporto grafico di ogni singolo caso. Questa struttura rispecchia l'organizzazione delle schede così come presentata nell'interfaccia « utente » (figura 1).

Le informazioni, per quanto possibile, sono imputate mediante caselle da spuntare e liste scorrevoli. L'interfaccia presenta le solite barre “menu”, “strumenti” e “stato” (figura 2). Ogni finestra corrisponde ad una scheda suddivisa in diversi capitoli accessibili mediante segnalibro per garantire la correlazione logica delle informazioni.

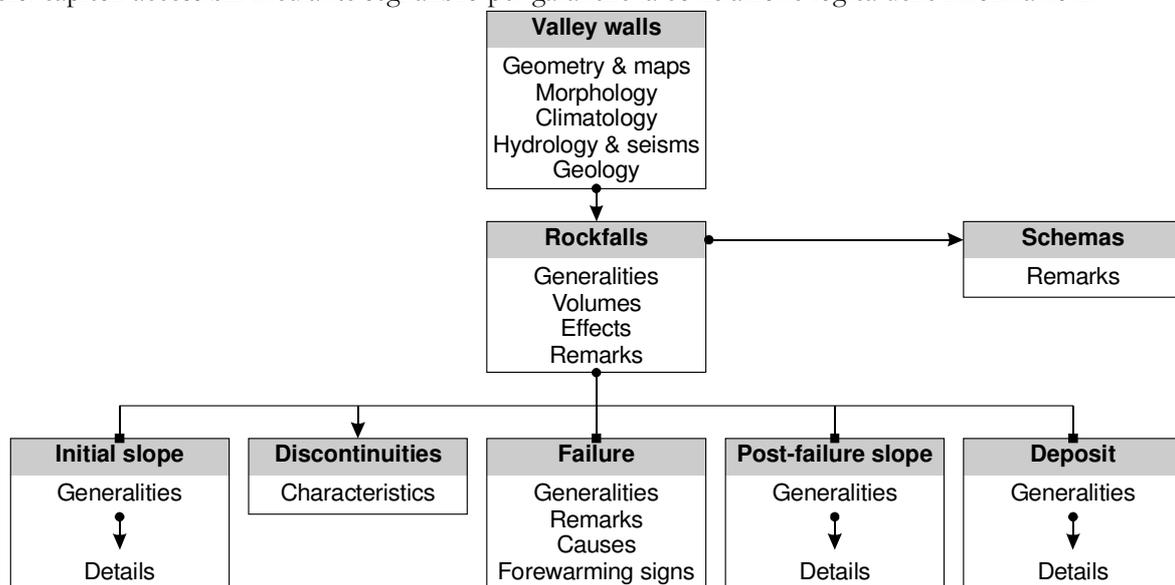


Figure 1 : organizzazione delle schede della BD Badaboum.

Una finestra esplorazione consente una navigazione rapida tra i casi ed una barra strumenti dedicata alle schede consente un accesso rapido alle rubriche.

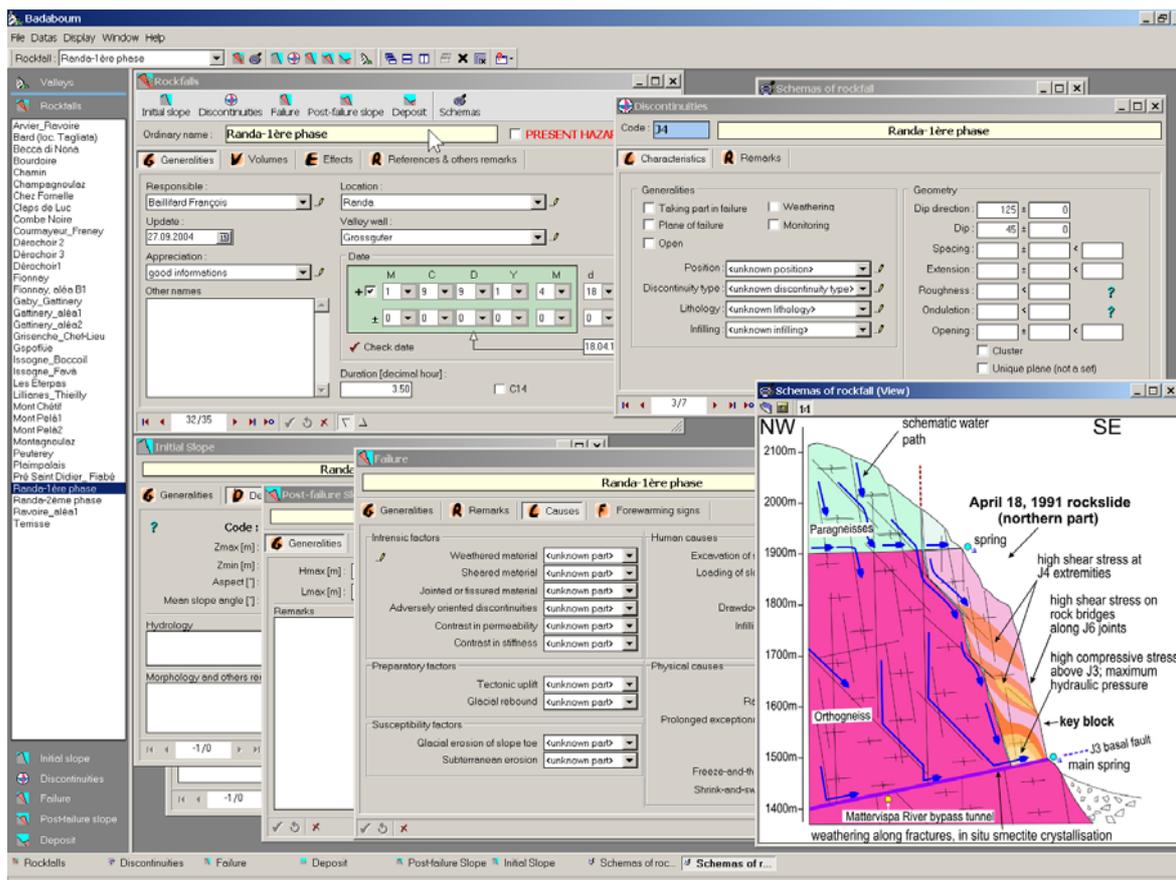


Figure 2: interfaccia "intente" della BD Badaboum.

3.3 Descrizione delle schede

Breve descrizione delle schede di BADABOUM e del loro contenuto:

- La scheda valley wall descrive il versante di distacco della frana. Fornisce informazioni essenziali (geometria, geologia, idrologia, idrogeologia, sismicità) nonché le condizioni meteo-climatiche presenti al momento del distacco.
- La scheda Rockfall descrive l'evento (ubicazione, data, volume, danni). Vi è una scheda per ogni singolo evento. Fornisce altresì informazioni sull'autore della scheda ed una valutazione sulla qualità delle informazioni.
- La scheda Initial slope indica le condizioni del profilo topografico prima della frana. I vari segmenti omogenei del profilo sono trattati all'interno di sotto-schede.
- La scheda Discontinuities contiene informazioni strutturali e geomeccaniche sul massiccio. Le diverse famiglie di discontinuità sono trattate all'interno di sotto-schede.
- La scheda Failure descrive il meccanismo di rottura. Presenta altresì le cause di quest'ultima e i segni precursori.
- La scheda Post-failure slope è analoga alla scheda Initial slope ma dopo la frana.
- La scheda Deposit fornisce informazione sull'area di accumulo della frana. La geometria e la granulometria delle diverse aree che compongono l'accumulo sono trattate in sotto-schede.

3.4 Casi repertoriati in BADABOUM

Al 31 marzo 2006 la BD ADABOUM ha repertoriato 58 eventi franosi (Tabella 1) di cui 34 con un volume $\geq 10^6$ m³. Quarantasette di esse si sono verificate nel corso dell'ultimo millennio (tra il 1132 ed il 2004). Tra queste undici in Valle d'Aosta, dodici in Vallese e sette nella Regione Rhône-Alpes. Alcuni casi degni di nota si sono prodotti all'esterno del territorio dei partner del progetto.

Da una prima analisi limitata al territorio del progetto risulta che sei frane con un volume $\geq 10^7$ m³ si sono verificate nell'arco di 800 anni e otto con un volume $\geq 10^6$ m³ durante il XX secolo. Le cifre qui descritte consentono di farsi una idea generale sulla ricorrenza di questo tipo di eventi.

4 Prospettive

Allorché la BD conterrà una massa critica di casi nonché lo strumento di elaborazione statistica, la sua gestione permetterà di :

- determinare la frequenza del distacco di frane situate in contesti simili nello spazio e nel tempo ;
- e quindi, effettuare una più accurata valutazione temporale della pericolosità (o suscettibilità) di ammassi instabili ed applicare metodi che consentono una migliore individuazione delle probabilità di rottura, - quali il metodo “storico, geomeccanico-probabilistico” (Programma Interreg IIc «Prevenzione dei fenomeni di instabilità delle pareti rocciose”) -

A questo fine, occorrerà dotare BADABOUM di tutti quegli strumenti che consentano di avanzare predefinite. Sarà quindi interessante imputare nel DB casi ritenuti come instabili ma non ancora franati, come previsto dai partner del progetto. Per alcuni casi, sarebbe comunque interessante poter ricostituire la morfologia del profilo del versante prima della frana e utilizzare questi dati ai fini della prevedibilità di rottura e della modalità di propagazione dei massi.

Come altresì previsto, BADABOUM sarà sul WEB a partire dalla del 2006, per poterla consultare on line, aggiornarla a distanza arricchirla arricchire rapidamente.

5 Conclusioni

Gli interventi eseguiti nell’ambito di questa azione hanno dimostrato l’interesse di un data base informatizzato contenente il numero massimo possibile di dati relativi al contesto geologico, strutturale, geomorfologico e meteorologico dei siti inventariati. Hanno altresì confermato ciò che gli attori del progetto supponevano a ragione, ovvero che una tale elaborazione di dati ha valore scientifico soltanto se è praticata su grande scala (soppressione dei bug).

Qualora l’obiettivo del progetto – ottenere grazie a BADABOUM uno strumento che consenta una previsione efficace delle valanghe di roccia potenziali – non sia raggiunto, si sono comunque poste le basi affinché questo lavoro transfrontaliero possa essere proseguito nell’ambito di un ulteriore progetto Interreg IV. Oggi la BD è già esistente ed i diversi test realizzati durante i tre anni del progetto hanno permesso di raggiungere un buon livello di affidabilità (suppression de bug). Per poterla utilizzare, come auspicato dai partner, occorrerà dotarla degli strumenti di elaborazione statistica ed arricchirla di almeno una cinquantina di siti in cui si sono verificate frane note. Tali siti dovranno essere studiati con gli stessi metodi di auscultazione, o almeno con strumenti in grado di fornire risultati confrontabili a livello quantitativo. La sorpresa più penalizzante per il progetto è stata infatti il basso numero di siti franosi ben documentati. Gli studi, che richiedono una ventina di giorni/H per sito, (con il rilievo del terreno come unica analisi-) rappresenta un impegno economico di notevole entità. Ogni partner deve proseguire il suo lavoro e con mezzi propri, nell’attesa di potersi ritrovare per un progetto bis, nell’ambito, per esempio, di Interreg IV.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette action ont démontré l’intérêt de construire une base de données informatisée où est rassemblé un maximum de données relatives au contexte géologique, structural, géomorphologique et météo-climatique des sites inventoriés. Ils ont aussi confirmé ce que les initiateurs du projet supputaient fortement, à savoir qu’un tel traitement ne peut être intéressant scientifiquement que lorsqu’il est pratiqué à une grande échelle.

Même si l’objectif visé par le projet - à savoir obtenir grâce à BADABOUM un outil de prédictibilité abouti en matière d’éboulements de masse potentiels – n’est pas atteint, la voie est toute tracée pour poursuivre ce travail transfrontalier dans le cadre d’un autre projet comme par exemple un programme Interreg IV. La BD est aujourd’hui construite et les nombreux tests réalisés au cours des trois ans impartis au projet ont permis d’atteindre un bon niveau de fiabilité (suppression de bugs). Pour pouvoir l’exploiter dans le sens souhaité par les initiateurs du projet, il faudra encore lui rajouter les outils de traitement statistique et l’enrichir avec au moins une cinquantaine de sites d’éboulements connus. Ces sites devront surtout avoir été étudiés avec les mêmes méthodes d’auscultation, ou du moins celles fournissant des résultats comparables en matière de quantification. En effet, la surprise la plus pénalisante pour le projet a été le très faible taux de sites d’éboulement bien documentés. A raison d’une vingtaine de jours/H par site (sans investigation autre que du lever de terrain), les études nécessaires représentent un coût important. Chaque partenaire doit poursuivre ses efforts dans ce sens et avec ses moyens propres, en attendant de pouvoir retrouver les autres au sein d’un projet bis dans le cadre, par exemple d’Interreg IV.

N°	Date	Volume (x 10 ⁶ m ³)	Nom	Commune	Dép/Rég/Cant	Pays
1	10000 BP	9000	Flims	Flims	Grisons	CH
2	1248	500	Granier	Myans	Savoie	F
3	1963	270	Vajont	Erto e Casso	Friuli-Venezia Giulia	I
4	Préhistorique	52	Cusy	Cusy	Savoie	F
5	1749	50	Derborence 2	Conthey	Valais	CH
6	5000 BP	50	Lauvitel	Bourg d'Oisans	Isère	F
7	1806	40	Goldau	Goldau	Schwyz	CH
8	1987	40	Val Pola	Valdisotto (SO)	Lombardie	I
9	Préhistorique	34	Plaimpalais	St-François de Sales	Savoie	F
10	1991	22.5	Randa 1	Randa	Valais	CH
11	1751	20	Dérochoir – Fiz	Passy	Haute-Savoie	F
12	1564	15	Becca France	Sarre	Val d'Aoste	I
13	Préhistorique	10	Saint-Même	St-Pierre d'Entremont	Isère	F
14	1717	10	Triolet	Courmayeur	Val d'Aoste	I
15	1881	10	Elm	Elm	Glaris	CH
16	1991	7	Randa 2	Randa	Valais	CH
17	1946	6	Six des Eaux Froides	Anzère	Valais	CH
18	Préhistorique	5	Pellaud	Rhêmes Notre Dame	Val d'Aoste	I
19	1920	4	Brenva	Courmayeur	Val d'Aoste	I
20	1925	3	Cima d'Ersa	Valtournanche	Val d'Aoste	I
21	Moyen-âge	2	Fodan	Bonneval-sur-Arc	Savoie	F
22	Moyen-âge	2	Valgrisenche	Valgrisenche	Val d'Aoste	I
23	1248	2	Nances	Nances	Savoie	F
24	2004	2	Cima Thurwieser	Santa Caterina Valfurva	Lombardie	I
25	1996	1.75	Sandalp 2	Linthal	Glaris	CH
26	1442	1.5	Claps de Luc	Luc-en-Diois	Drôme	F
27	1997	1.5	Brenva	Courmayeur	Val d'Aoste	I
28	Moyen-âge	>1	Brenva	Courmayeur	Val d'Aoste	I
29	1767	>1	Brenva	Courmayeur	Val d'Aoste	I
30	2500 BP	>1	Brenva	Courmayeur	Val d'Aoste	I
31	1132	1	Bourdoire	St-Pierre de Chartreuse	Isère	F
32	1602	1	Tête Noire	Sixt-Fer-à-Cheval	Haute-Savoie	F
33	1952	1	Becca di Luseny	Bionaz	Val d'Aoste	I
34	2000	1	Bosmatto	Gressoney SJ	Val d'Aoste	I
35	1901	0.8	<i>Fletschhorn</i>	<i>Simplon</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
36	1985	0.8	<i>Les Crêtaux</i>	<i>Riddes</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
37	1922	0.62	<i>Arvel</i>	<i>Villeneuve</i>	<i>Vaud</i>	<i>CH</i>
38	1982	0.5	<i>Fiernaz</i>	<i>Antey St-André</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
39	1996	0.45	<i>Sandalp</i>	<i>Linthal</i>	<i>Glaris</i>	<i>CH</i>
40	1996	0.45	<i>Sandalp 1</i>	<i>Linthal</i>	<i>Glaris</i>	<i>CH</i>
41	1988	0.3	<i>Tschierva</i>	<i>Samedan</i>	<i>Grisons</i>	<i>CH</i>
42	1988	0.3	<i>Piz Scerscen</i>	<i>Samedan</i>	<i>Grisons</i>	<i>CH</i>
43	1943	0.24	<i>Matterhorn</i>	<i>Cervinia</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
44	1936	0.2	<i>Felik</i>	<i>Ayas</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
45	1986	0.2	<i>Combal - Miage</i>	<i>Courmayeur</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
46	1911-1912	0.16	<i>Liéron</i>	<i>Bard</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
47	1937	0.15	<i>Jungfrau</i>	<i>Fieschertal</i>	<i>Berne</i>	<i>CH</i>
48	1996	0.1	<i>Pic de Bure</i>	<i>St-Etienne en Dévoluy</i>	<i>Hautes-Alpes</i>	<i>F</i>
49	2002	0.1	<i>Meidji</i>	<i>St-Niklaus</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
50	2000	0.1	<i>Mättenberg</i>	<i>Grindelwald</i>	<i>Berne</i>	<i>CH</i>
51	2002	0.1	<i>Gruben</i>	<i>Saas Balen</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
52	1987	0.07	<i>Druesberg</i>	<i>Muotathal</i>	<i>Schwyz</i>	<i>CH</i>
53	1975	0.05	<i>Gspoflüe</i>	<i>Staldenried</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
54	2004	0.03	<i>Les Pics</i>	<i>Collomey-Muraz</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
55	1990	0.025	<i>Aiguille de Tronchey</i>	<i>Courmayeur</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
56	?	0.01	<i>Dégioz</i>	<i>Valsavaranche</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>IT</i>
57	1714	?	<i>Derborence 1</i>	<i>Conthey</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
58	1906	?	<i>Haut-de-Cry</i>	<i>Chamoson</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>

Tableau 1 : liste des 58 événements d'éboulement figurant dans la BD Badaboum au 31.3.2006
(en italique : les éboulements de volume < 10⁶ m³)

Action B : Modélisation géométrique et détermination des volumes instables

1 Introduzione

La valutazione della pericolosità di un pendio in roccia potenzialmente soggetto a fenomeni di valanghe detritiche necessita lo studio della fase di distacco dei blocchi di roccia affioranti sul pendio, e quindi del conseguente innesco del movimento, e lo studio dell'evoluzione del fenomeno lungo il pendio.

I fenomeni denominati "valanghe di roccia" coinvolgono spesso volumi molto elevati che possono raggiungere sul pendio velocità estremamente rapide. L'analisi dello sviluppo di tali fenomeni lungo il pendio è dipendente dal volume di detrito mobilitato che deve quindi essere opportunamente stimato per la valutazione della pericolosità del fenomeno.

Nell'ambito della presente azione si intende trattare, in particolare, la fase di distacco dei blocchi e di innesco dei fenomeni di valanga con particolare attenzione alla stima dei volumi massimi potenzialmente coinvolti.

Scopo della ricerca è, infatti, la messa a punto di una metodologia che permetta, sulla base di accurati rilievi in sito e di modellazioni numeriche, la stima dei potenziali volumi che complessivamente possono evolvere in fenomeni di valanga di roccia.

La determinazione delle condizioni di stabilità di un pendio in roccia richiede in primo luogo l'individuazione di blocchi che hanno la possibilità cinematica di movimento. Le condizioni di stabilità del pendio in roccia sono fortemente influenzate dall'orientazione, dalla spaziatura e dalla persistenza delle discontinuità.

Data l'importanza attribuita alla natura discontinua delle rocce in esame, è indispensabile predisporre rilievi strutturali che siano esaustivi sia per quanto riguarda la posizione, che la lunghezza e l'orientamento delle discontinuità presenti. Tali rilievi, condotti su affioramenti rocciosi, sono diretti alla caratterizzazione delle discontinuità e devono essere eseguiti in modo da evitare errori significativi che possano compromettere l'interpretazione dell'ammasso roccioso.

Nell'ambito della presente ricerca sono state studiate delle metodologie alternative al rilievo tradizionale, avvalendosi delle tecniche fotogrammetriche e della tecnologia laser.

L'orientazione e la posizione spaziale delle discontinuità così rilevate permettono una mappatura deterministica delle discontinuità ed una puntuale ricostruzione dell'ammasso roccioso con la determinazione dei blocchi affioranti sul pendio.

I blocchi affioranti possono poi essere classificati in blocchi infiniti e finiti, i blocchi finiti in rimuovibili e non rimuovibili, i blocchi rimuovibili in potenzialmente instabili e non, tramite analisi geometriche e valutazioni della stabilità con il metodo dell'equilibrio limite. Si giunge così alla valutazione del volume complessivo coinvolto, che potrebbe evolvere in un fenomeno di valanga di roccia.

Volendo procedere ad una stima più elaborata del grado di stabilità dell'ammasso roccioso fratturato per diverse configurazioni di forze esterne applicate, si è ritenuto opportuno ricorrere a metodi in grado di riprodurre il comportamento tenso-deformativo dell'ammasso roccioso quale il metodo degli elementi distinti.

La metodologia messa a punto comporta pertanto le seguenti fasi :

- il rilievo delle pareti rocciose tramite l'applicazione di metodi fotogrammetrici digitali e della tecnologia laser;
- indagini complementari quali sondaggi geognostici e prove geofisiche;
- la ricostruzione geometrica dell'ammasso roccioso fratturato sotto forma di insieme di blocchi;
- lo studio delle condizioni di stabilità del pendio per mezzo di considerazioni geometriche e analisi all'equilibrio limite;
- l'analisi del comportamento meccanico della massa rocciosa con l'ausilio del metodo degli elementi distinti.

2 Il rilievo a distanza

Sebbene la domanda di tecniche efficaci, rapide e possibilmente poco costose sia in continuo aumento, le tecniche di rilievo geometriche degli ammassi rocciosi non si sono adeguate alle esigenze. Attualmente, il rilievo si effettua in sito, utilizzando un equipaggiamento portatile, composto da una bussola e una livella accedendo direttamente all'ammasso roccioso. A volte però questa operazione può essere difficilmente realizzabile per diversi motivi:

- gli ammassi rocciosi, possono essere difficilmente raggiungibili, parte della roccia affiorante può arrivare fino a quote elevate o avere forme geometriche che rendono difficile, se non impossibile, l'accesso. L'acquisizione di dati in questo caso può essere un processo lungo e spesso costoso;

- gli ammassi rocciosi molto fratturati, non supportati da opere di sostegno, possono comportare rischi per l'operatore che effettua il rilievo;
- la scelta di elementi d'interpretazione significativi può essere difficile da eseguire in sito. Tornati in ufficio bisognerà interpretare ed elaborare le misurazioni cercando di ricostruire lo scenario originale senza ambiguità.

Nella pratica corrente la raccolta dei dati necessari al rilievo strutturale si effettua per mezzo di stendimenti, detti "scanline" o, in maniera più raffinata, tramite l'esame esaustivo di finestre di osservazione (figura 1).

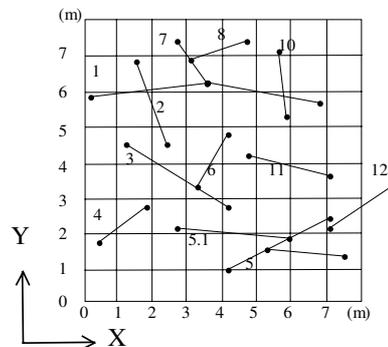


Figura 1 - Acquisizione dei dati tramite finestra di osservazione

I metodi di rilievo tradizionali non consentono inoltre, in molti casi, di cogliere alcuni aspetti del sistema di fratturazione che sono indispensabili all'analisi della stabilità di un ammasso roccioso. In particolare, le relazioni esistenti tra le famiglie di discontinuità (definiti dalla gerarchia dei sistemi di fratturazione), evidenziati dalla tipologia di interruzione dei sistemi di fratturazione, possono essere molto importanti dal punto di vista del comportamento meccanico d'insieme dell'ammasso.

Un metodo adatto ad ottenere informazioni di questo tipo può essere fornito dall'esecuzione di immagini rappresentative dell'ammasso che permettano di effettuare analisi esaustive dell'ammasso dalle immagini stesse.

Per poter procedere alla realizzazione di un modello geometrico 3D della massa rocciosa è necessario disporre delle informazioni topografiche relative alla parete e di informazioni di tipo strutturale relative al sistema di fratturazione dell'ammasso roccioso.

Per la realizzazione di questo tipo di modello, sono state intraprese 2 diverse strade:

1. la prima si basa su tecniche fotogrammetriche digitali stereoscopiche;
2. la seconda si avvale della tecnologia laser.

La prima strada intende utilizzare strumenti semplici e mantenere le informazioni legate all'immagine, la seconda permette di acquisire migliaia di punti in tempi molto ridotti.

3 Definizione analitica dei piani che approssimano una nuvola di punti

I metodi di rilievo topografico a distanza forniscono normalmente soltanto la posizione dei punti nello spazio: una nuvola di punti. Le immagini e le scansioni vengono collimate e orientate nello spazio riferendosi sia ad un riferimento relativo che assoluto. Il risultato dell'elaborazione dei dati ci fornisce come output un file con le coordinate dei punti che appartengono alla maglia del DSM.

Per ottenere le informazioni necessarie alla realizzazione del modello geometrico dell'ammasso roccioso fratturato, il passo successivo deve essere quello di passare alla definizione dei piani che approssimano il pendio e dei piani medi di discontinuità. Una nuvola di punti rappresenta un dato troppo grezzo per ottenere le informazioni di tipo geostrutturale sulla giacitura di tali piani. La procedura di suddivisione in gruppi dei punti appartenenti al DSM, che possano formare superfici approssimativamente piane, prende il nome di segmentazione geometrica del DSM (Roncella, 2004).

Supponendo di aver isolato una porzione di DSM, occorre stimare le equazioni analitiche, nella forma $AX + BY + CZ + D = 0$, che determinano l'orientamento e la posizione nello spazio dei piani che approssimano la nuvola di punti in esame. Noti i parametri A, B, C e D di ogni piano, è poi possibile passare alla definizione degli angoli di *Dip* e *Dip Direction*. I metodi messi a punto per isolare i punti appartenenti ad un unico piano, o ad un insieme di piani, all'interno del DSM rappresentativo di un ammasso roccioso fratturato nel suo complesso verranno illustrati nel paragrafo 4.

Quando si utilizza una stazione totale per la misura della discontinuità, vengono campionati un buon numero di punti che non giacciono sullo stesso piano pur appartenendo alla superficie di discontinuità affiorante. A tale scopo è necessario definire il piano che meglio approssima la superficie di discontinuità, tenendo conto dei punti rilevati sulla superficie stessa.

Pertanto, per individuare correttamente l'orientamento del piano interpolante una nuvola di punti occorre mettere a punto specifici codici di calcolo. Esistono inoltre codici di calcolo in grado non solo di stimare in modo ottimale un piano che interpola una nuvola di punti, ma anche di effettuarne la segmentazione, all'occorrenza, suddividendola opportunamente in gruppi di punti che corrispondono a superfici piane distinte e stimando le relative equazioni caratteristiche.

3.1 Stima con il metodo dei minimi quadrati

In relazione al caso di una porzione di DSM corrispondente ad un'unica superficie piana, è piuttosto usuale utilizzare il metodo dei minimi quadrati per stimare l'equazione di un solo piano interpolante una nuvola di punti.

L'equazione del piano interpolatore, nella forma $Z = aX + bY + c$, viene calcolato utilizzando la teoria dei minimi quadrati lineari.

Conoscendo le coordinate x, y e z di ogni punto, si può scrivere:

$$\begin{aligned} z_1 &= ax_1 + by_1 + c \\ z_2 &= ax_2 + by_2 + c \\ z_i &= ax_i + by_i + c \\ &\dots \dots \dots \dots \\ z_n &= ax_n + by_n + c \end{aligned}$$

In forma matriciale:

$$[Z] = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

Si opera quindi con la matrice G detta Data Kernel Matrix e il parametro di modello m :

$$Z = G \cdot m$$

$$(G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot Z = [(G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot G] \cdot m$$

$$m = (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot Z$$

Conoscendo i parametri a, b e c , è nota la giacitura del piano trovato, mentre per determinarne la posizione nello spazio è sufficiente calcolare il punto baricentrico della nuvola di punti in esame.

Si noti che le classiche tecniche per la stima dei parametri, come il metodo dei minimi quadrati per l'appunto, ottimizzano il modello considerando tutto il set di dati; questo metodo non ha nessun tipo di meccanismo interno per individuare e rifiutare gli errori grossolani, presenti soprattutto quando vengono trattati dati sperimentali. Inoltre, nel nostro caso il rischio è quello di avere nel set di punti iniziale da interpolare punti appartenenti ad un altro piano: tali punti possono essere considerati come errori grossolani nelle misure. Si rischia pertanto di avere una alta percentuale di errori grossolani non compensati che vanno ad inficiare la validità del modello assunto.

Si può facilmente dimostrare come un singolo errore grossolano in mezzo ad una serie di dati privi di errori possa minare la validità del modello assunto. Analizzando il caso in figura 2 si evidenzia come sei fra i sette punti dati sono validi e possono essere approssimati dalla linea rossa.

Usando l'approssimazione a minimi quadrati, cioè eliminando i punti con massimo residuo, si nota che tra i punti rimanenti c'è il numero sette che è un errore grossolano.

Si conclude pertanto che le tecniche di *media* non sono particolarmente adatte a set di dati sperimentali non verificati, cioè affetti da errori grossolani.

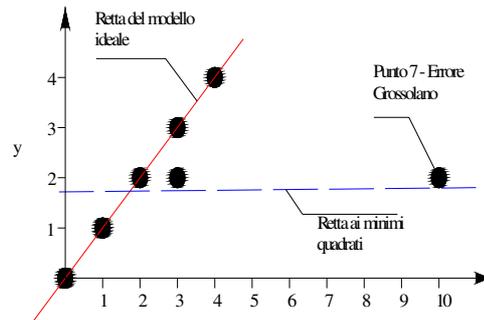


Figura 2 – Il fallimento della riduzione a minimi quadrati per la stima di dati affetti da errori grossolani

3.2 Algoritmo RANSAC (Fischler & Bolles, 1981)

Nel caso di una porzione di DSM corrispondente ad un insieme di piani, l'algoritmo descritto in questo paragrafo permette di individuare i vari piani e stimare le relative equazioni caratteristiche, anche in presenza di una rilevante percentuale d'errori grossolani. RANSAC è utilizzato nell'analisi d'immagini e nella cartografia automatizzata per ricercare in un insieme di dati sperimentali un modello predefinito.

Si possono distinguere due tipi di errori: di classificazione e di misura. Gli errori di classificazione si verificano quando vengono identificate porzioni di immagini come errori del modello; gli errori di misurazione avvengono, invece, quando si commettono errori nel tarare i parametri pur avendo identificato correttamente il modello. Gli errori di misura solitamente seguono una distribuzione normale, mentre quelli di classificazione possono essere identificati come errori grossolani: questi ultimi influenzano maggiormente la correttezza del modello assunto e, come già visto, non sono allontanabili con operazioni di media.

La procedura seguita dall'algoritmo è totalmente diversa da quelle impiegate nelle normali metodologie di stima: anziché utilizzare inizialmente il maggior numero possibile di dati per ottenere una soluzione di partenza, dalla quale poi distinguere i punti non validi, RANSAC utilizza il minor numero possibile di dati iniziali per generare il modello, cercando poi di allargare questo set con dati coerenti al modello, se possibile.

Per chiarire il procedimento alla base dall'algoritmo si riportano di seguito i passi dell'algoritmo con riferimento al caso bidimensionale di una retta, da ricercare in un insieme di dati sperimentali contenente una percentuale anche molto rilevante di errori grossolani (figura 3.a):

- Vengono eseguite un numero adeguato i di prove:
 - o estrazione casuale di $n=2$ dati (il minimo indispensabile per definire il modello)
 - o valutazione degli scarti rispetto al modello: vengono selezionati i punti che cadono entro una soglia predefinita s (verdi) e scartando gli altri (rosso)
- L'insieme che contiene il numero maggiore di dati rappresenta il modello ricercato:
 - o il modello prescelto viene ristimato a minimi quadrati utilizzando tutti i punti classificati come inliers.

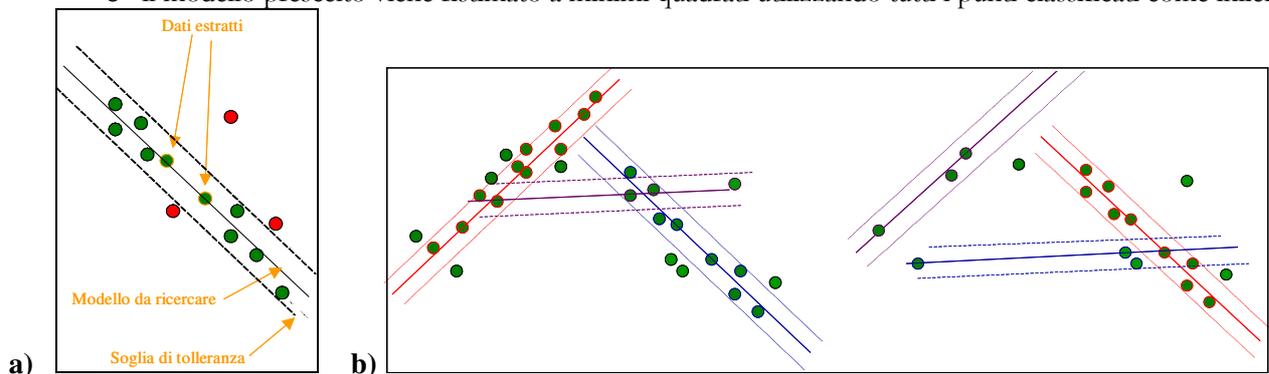


Figura 3 – a) Individuazione della retta interpolante nel caso sia presente un solo insieme di dati
b) Individuazione della retta interpolante nel caso siano presenti più sottoinsiemi coerenti di dati (più rette)

Ripetendo il procedimento per i volte si otterranno pertanto i insiemi di punti ognuno generato da una differente scelta dei 2 punti iniziali. Per un appropriato valore di i , si può asserire che con una determinata probabilità p almeno una delle coppie di punti iniziali non comprende al suo interno nemmeno un outlier.

Nel caso in cui siano presenti più sottoinsiemi coerenti di dati (figura 3.b), l'algoritmo elimina tutti i punti appartenenti alla retta che ha ottenuto il maggior consenso (in rosso) e ripete la procedura di ricerca della retta che meglio approssima i punti rimanenti.

Per ognuno dei casi pratici esaminati nell'ambito del progetto è stato necessario procedere alla quantificazione del parametro di soglia corretto per il problema di stima applicato alle superfici di ammassi rocciosi fratturati. In effetti, tale parametro risulta l'unico, tra i parametri da cui dipende il funzionamento dell'algoritmo, che richiede un'attenta analisi: la valutazione deve essere accurata poiché un valore troppo basso tende a segmentare eccessivamente la superficie, mentre un valore troppo alto porta all'aggregazione di porzioni con giaciture differenti. A tale fine, per ogni modello, sono state condotte delle prove su diverse porzioni di DTM, per ricercare un valore di soglia che si dimostrasse efficiente indipendentemente dalla dimensione media delle porzioni, dalla rugosità e dall'ondulazione della parete.

3.3 Determinazione degli angoli di inclinazione ed immersione

Gli angoli di inclinazione e di direzione del piano approssimatore di una superficie di discontinuità possono essere determinati direttamente una volta noti i parametri euclidei della sua equazione caratteristica.

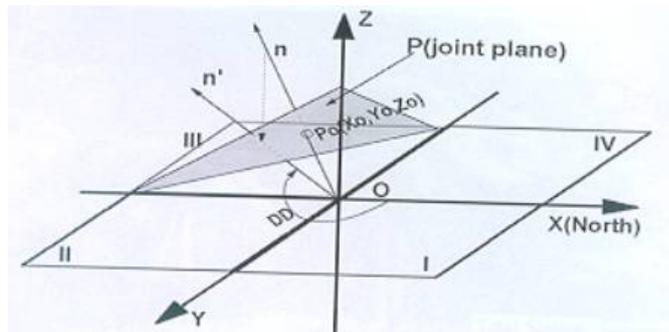


Figura 4 - Determinazione dell'angolo di immersione e di inclinazione

Il piano X–Y è assunto come piano orizzontale nel sistema di coordinate cartesiane. L'angolo ψ di inclinazione può essere ottenuto dal prodotto scalare dei vettori normali ai due piani, n_h (normale al piano orizzontale) e n (normale al piano approssimatore). Le componenti del vettore n possono essere definite dai coefficienti dell'equazione del piano di discontinuità $A \cdot X + B \cdot Y + C \cdot Z + D = 0$.

I coefficienti A, B, C sono le componenti lungo gli assi X, Y, Z di un generico vettore perpendicolare al piano con punto d'applicazione nell'origine del sistema cartesiano.

Il prodotto scalare dei vettori $N = (A, B, C)$ e $n_h = (0, 0, 1)$ è:

$$n_h \cdot N = |n_h| |N| \cos \varphi$$

L'angolo ψ tra questi due piani risulta essere:

$$\cos \psi = \frac{|n_h \cdot N|}{|n_h| |N|} = \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$

Perciò la DIP risulta:

$$DIP = \arccos \left| \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right|$$

L'angolo k tra la componente orizzontale del vettore normale al piano di discontinuità e la direzione positiva dell'asse x è definita come:

$$\cos(k) = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

Tuttavia questa equazione non può essere usata per determinare direttamente la direzione di immersione del piano di discontinuità per le seguenti ragioni:

- la direzione di immersione è definita nel campo $0 - 360$ gradi ma l'equazione di sopra può determinare angoli solo nel campo $0 - 180$;
- dal punto di vista matematico, il vettore normale a un piano può essere sia diretto verso l'alto sia diretto verso il basso.

Questo dipende dalla posizione del piano nel sistema cartesiano tridimensionale. La convenzione di meccanica delle rocce è quella di scegliere il vettore normale al piano di discontinuità diretto verso l'alto per la determinazione della direzione di immersione.

Per avere quindi una corretta definizione dell'angolo di direzione di immersione è necessario utilizzare i coseni direttori del vettore normale al piano di discontinuità così definiti:

$$\cos(\alpha) = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$

$$\cos(\beta) = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$

$$\cos(\gamma) = \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$

Dove α è l'angolo tra la direzione positiva dell'asse x e il vettore normale n, β è l'angolo tra la direzione positiva dell'asse y e il vettore normale n, γ è l'angolo tra la direzione positiva dell'asse z e il vettore normale n. Si noti che nel caso in cui l'equazione caratteristica del piano fornisca un valore negativo di C, ci si riconduce al caso in cui $C > 0$.

La direzione di immersione DIP DIRECTION (DD) sarà definita da:

DD = arccos(k) se $\cos(\gamma) \geq 0$ e $\cos(\beta) \geq 0$;

DD = $360^\circ - \arccos(k)$ se $\cos(\gamma) \geq 0$ e $\cos(\beta) < 0$;

DD = $180^\circ + \arccos(k)$ se $\cos(\gamma) < 0$ e $\cos(\beta) \geq 0$;

DD = $180^\circ - \arccos(k)$ se $\cos(\gamma) < 0$ e $\cos(\beta) < 0$.

4 Modelli numerici 3D accoppiati a immagini fotografiche

Scopo del presente lavoro era ottenere modelli numerici tridimensionali in forma digitale (DSM) dell'ammasso roccioso accoppiati ad immagini dell'ammasso stesso ottenendo quindi immagini fotografiche sulle quali è possibile leggere direttamente le coordinate di ogni punto visibile del pendio per procedere alla realizzazione di un modello geometrico 3D della massa rocciosa.

Entrambe le metodologie messe a punto portano quindi alla realizzazione di un modello numerico 3D dei punti rilevati sulla parete (DSM), sotto forma di nuvola di punti localizzati nello spazio, accoppiato ad immagini dell'ammasso roccioso e permettono, tramite appositi strumenti messi a punto, non solo di risalire alla topografia della falesia, ma anche di localizzare le fratture presenti, di calcolare l'orientazione dei piani di fratturazione in parte esposti, di effettuare misure di spaziatura tra le tracce delle fratture, e di interpretare le relazioni che intercorrono tra le famiglie di discontinuità per determinare la gerarchia della fratturazione.

Disponendo di tali modelli, rispetto ad un rilievo geostrutturale classico:

- si può avere accesso ad un numero maggiore di informazioni spaziali;
- è possibile il rilievo di pendii non accessibili;
- vi è una riduzione del carattere soggettivo del campionamento in quanto il modello è consultabile anche in fasi successive all'esecuzione del rilievo.

4.1 Metodologia fotogrammetrica

La metodologia fotogrammetrica messa a punto si basa innanzi tutto sulla realizzazione di un rilievo fotogrammetrico tramite l'utilizzo di una camera digitale, seguito dall'elaborazione di un modello stereoscopico per mezzo del software Virtuozo (Supresoft Inc., China), per ottenere il modello digitale 3D dei punti del terreno. Disponendo così della nuvola di punti che descrive la geometria superficiale dell'ammasso roccioso fratturato, si intende determinare una scomposizione di questa superficie in entità geometriche approssimativamente piane. Occorre dunque inserire all'interno della procedura un metodo per l'estrazione di porzioni approssimativamente piane del DSM, chiamata procedura di segmentazione della geometria del DSM, che permetta l'individuazione dei piani che approssimano il pendio e dei piani medi di discontinuità.

E' stato dunque elaborato, in collaborazione con il gruppo di ricerca di topografia e fotogrammetria dell'università degli studi di Parma, in particolare il professor Gianfranco Forlani e l'ingegner Riccardo Roncella, uno specifico software che consente, selezionando delle zone della parete rocciosa interattivamente sulle stesse immagini utilizzate per la generazione della nuvola di punti, di isolare le corrispondenti porzioni di DSM e di effettuarne la segmentazione.

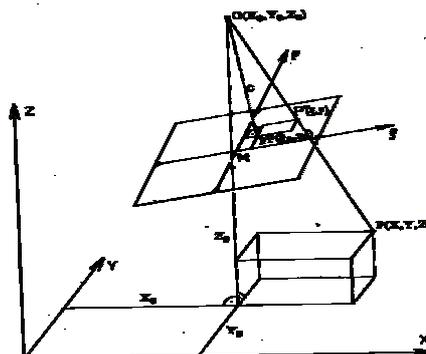


Figura 5 – Camera digitale Nikon D100 - Relazione tra le coordinate di punti immagine e punti oggetto

In realtà esistono in commercio diversi applicativi in grado di effettuare l'estrazione di una porzione di superficie digitale, ma molti di questi applicativi hanno costi decisamente elevati e la definizione delle porzioni avviene di norma direttamente sul modello digitale tridimensionale. In questo modo però, se non viene applicata una texture fotografica, che si rivela un'operazione piuttosto laboriosa, si perdono tutte le informazioni legate alle immagini e l'identificazione delle aree di interesse risulta poco intuitiva. Inoltre, siccome nell'ambito della metodologia in esame l'estrazione di porzioni di DSM è un passaggio intermedio di una procedura ben più complessa, l'introduzione di uno o più applicativi di terze parti può rendere decisamente più macchinosa la metodologia.

4.1.1 ESP

Lo strumento appositamente sviluppato è stato chiamato ESP (estrazione di superfici piane) e permette per l'esattezza di:

- conoscere le coordinate del punto corrispondente del DSM selezionando un punto sull'immagine;
- calcolare la distanza tra due punti della parete rocciosa selezionati sull'immagine e di conseguenza di effettuare scanlines fittizi sull'immagine per determinare la spaziatura tra le fratture;
- selezionare sull'immagine una porzione di DSM corrispondente ad una o diverse superfici piane.

Il software è stato testato e calibrato nell'applicazione al caso della parete rocciosa del sito pilota di Arnad in Valle d'Aosta, per il quale erano disponibili le informazioni derivanti da 2 rilievi geostrukturali eseguiti secondo tecniche tradizionali: il primo effettuato dal geologo Alessandro Bellini e il secondo dal geologo Dario Tosoni.



Figura 6 – Selezione sull'immagine di porzioni di DTM – Sito pilota di Arnad

Le equazioni dei piani che approssimano la nuvola di punti corrispondente alla zona selezionata, vengono stimate tramite l'algoritmo di segmentazione RANSAC.

Infine, dall'equazione caratteristica di ogni piano, ESP fornisce i corrispondenti parametri di orientazione dip e dip direction e le coordinate del suo punto baricentrico in un file di testo.

Il programma è stato sviluppato appositamente per interfacciarsi con Virtuozo: di conseguenza l'inserimento delle informazioni avviene in maniera rapida e agevole, consentendo all'utente di procedere all'individuazione delle zone di interesse in pochi secondi.

L'algoritmo, attualmente sviluppato in ambiente MatLab, richiede all'utente di specificare il file contenente le coordinate della nuvola di punti, un file immagine di una vista qualsiasi della superficie in oggetto, il file di calibrazione della camera con i relativi parametri di distorsione e un file contenente i parametri di orientamento (punto di presa e assetto) del fotogramma selezionato. Noti quindi tutti i parametri, il programma proietta i punti della nuvola sul piano del fotogramma: in altre parole produce sul piano del fotogramma l'immagine dei punti del DSM.

Una volta ottenuta la proiezione della nuvola di punti sull'immagine è possibile definire interattivamente sul fotogramma le zone che si intendono isolare: l'algoritmo procede all'individuazione dei punti del DSM che vengono effettivamente proiettati nella regione indicata dall'utente.

4.2 Metodologia Laser

Gli scanner 3D generalmente acquisiscono le informazioni tridimensionali sottoforma di nuvole di punti (*Points clouds*). Per ognuno di essi sono noti i valori di riflettività, le coordinate spaziali e, nel caso si abbinino al laser anche una camera digitale ad alta risoluzione, l'informazione radiometrica (R,G,B).

La prima forma in cui si possono utilizzare questi dati è il modello tridimensionale a punti dell'oggetto rilevato. Questo, inserito in opportuni software (Rapidform, Geomagic...), può essere utile per analisi di tipo strutturale.

In realtà, però, a causa della difficile interpretabilità, le informazioni raccolte con il laser scanner sono poco utilizzabili se presentate in questa forma.

Un prodotto più facilmente utilizzabile ai fini dell'indagine tridimensionale della nuvola di punti si ottiene mediante la modellazione solida (effettuata con software come Rapidform, Rhinoceros, Polyworks...). Questi *software*, peraltro generalmente molto costosi, permettono di ottenere un modello a superfici, a partire dalla nuvola di punti attraverso tecniche di triangolazione o di creazione di NURBS (Non Uniform Rational B-Spline). Da questi modelli è poi possibile ricavare sezioni, profili, volumi tramite le piattaforme abitualmente utilizzate per il disegno (Autocad, Microstation). I modelli tridimensionali a superfici così generati, risultano essere più intuitivi e naturali e consentono un utilizzo più immediato rispetto ai modelli 3D a punti, ma per il rilievo della fratturazione la qualità dell'informazione visiva non è ancora sufficiente: occorre accoppiare ai modelli 3D a punti la relativa immagine dell'ammasso roccioso.

Un'ulteriore possibile elaborazione dei dati forniti dal laser scanner, è l'immagine solida, che consente di ottenere un'immagine bidimensionale, contenente tutte le informazioni raccolte dallo *scanner* 3D. Anche in questo caso è possibile effettuare misure dirette di angoli, distanze, aree e, particolare interessante in campo geomeccanico, è possibile estrarre l'equazione del piano medio di una nuvola di punti qualsiasi, semplicemente selezionando l'area sull'immagine solida. Quest'ultima tecnica risulta particolarmente interessante, in particolar modo per le misure che ci si propone di effettuare. E' infatti sicuramente molto più semplice e meno problematico effettuare misure dirette su una fotografia, che non su un modello solido, in ambiente tridimensionale.

Una normale immagine digitale è formata in genere da tre matrici all'interno delle quali sono contenute le componenti radiometriche fondamentali R, G e B (rosso, verde e blu). L'immagine solida è definita come un'immagine digitale classica alla quale viene aggiunta una matrice supplementare, delle stesse dimensioni delle matrici RGB (in termini di righe e colonne), contenente i valori di distanza D ricavati dal DSM. Se si dispone soltanto di un'immagine non è però possibile determinare la posizione spaziale, nelle coordinate X Y Z, dell'oggetto rappresentato. Per fare questo, infatti, occorre utilizzare almeno due immagini cui si applicano i principi della fotogrammetria. Un'alternativa all'utilizzo delle due immagini è rappresentata dalla conoscenza, per ogni *pixel* (quindi per ogni direzione nello spazio), della distanza dei singoli punti appartenenti all'oggetto rappresentato dal centro di proiezione della prospettiva centrale. È, infatti, possibile ricostruire la posizione di ogni punto dell'immagine conoscendone le coordinate sferiche (due angoli che definiscono una direzione e una distanza lungo tale direzione) tramite semplici equazioni geometriche.

Visti i vantaggi e le semplificazioni offerti dall'uso dell'immagine solida, si è deciso di sperimentare questa tecnica per valutare i parametri che caratterizzano le fratturazioni negli ammassi rocciosi.

Il metodo di rilievo messo a punto, in collaborazione con il laboratorio di fotogrammetria e laser del Politecnico di Torino, prende quindi avvio con la realizzazione di acquisizioni tramite laser accoppiate a immagini digitali scattate con una fotocamera montata sullo strumento per mezzo di un braccio calibrato. I dati risultanti vengono trattati per mezzo di specifici softwares commerciali per ottenere il modello digitale 3D dei punti della parete.

Per procedere poi alla realizzazione dell'immagine solida e per consentire all'operatore di effettuare le misure di tipo geostrutturale in modo interattivo, il gruppo di ricerca di fotogrammetria e laser del Politecnico di Torino ha sviluppato uno specifico software: LSR2004.

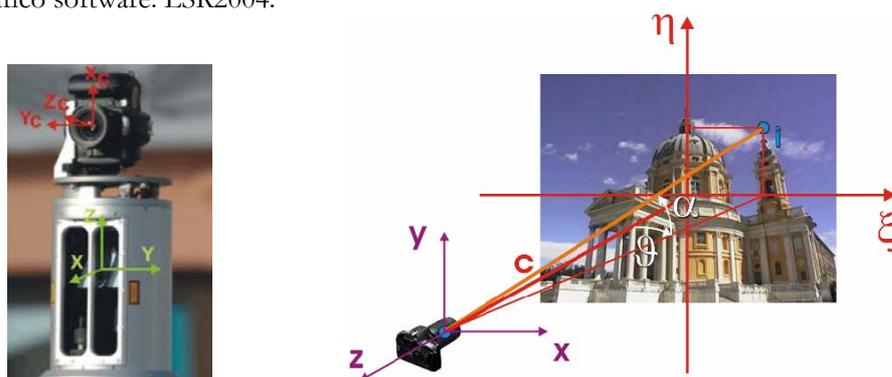


Figura 7 – Laser scanner LMS Z420 Riegl - Relazione tra le coordinate di punti immagine e punti oggetto

4.2.1 LSR2004

Si tratta di un software specialmente concepito per il trattamento dei dati laser scanner terrestri, tutti gli algoritmi utilizzati sono stati studiati dai ricercatori del Politecnico di Torino, sono stati oggetto di test e sono stati presentati in occasione di congressi internazionali di topografia, fotogrammetria e telerilevamento.

Questo software è tuttora oggetto di integrazioni e miglioramenti secondo le nuove tecniche di acquisizione laser proposte sul mercato e si propone di riuscire a utilizzare i dati laser in tutta la loro complessità.

Per quanto riguarda l'applicazione al rilievo geostrutturale di pareti rocciose, in collaborazione con il professor Fulvio Rinaudo e l'ingegner Leandro Bornaz, sono state implementate specifiche funzioni nel software LSR2004 per ottenere i parametri geotecnici necessari alla realizzazione del modello geometrico dell'ammasso roccioso fratturato

in esame, nella forma specificamente richiesta per l'utilizzo nel campo della meccanica delle rocce, e sono stati effettuati diversi test sulla applicazione del programma per determinare le sue potenzialità e per valutare gli aspetti prestazionali. In particolare il software è stato testato e calibrato nell'applicazione al caso della parete rocciosa "Falaise des Trappistes" nel cantone del Vallese, per il quale erano disponibili le informazioni derivanti da un rilievo geostrutturale eseguito secondo tecniche tradizionali fornito dal centro di ricerca CREALP di Sion.



Figura 8 – Calibrazione del software 2004 sulla parete rocciosa "Falaises des Trappistes"

Il software LSR2004 permette:

- di leggere direttamente, in un'apposita finestra, le coordinate di ogni punto visibile del pendio visibile spostando semplicemente il cursore nell'immagine;
- di effettuare scanlines fittizi sull'immagine per determinare la spaziatura tra le fratture;
- di selezionare sull'immagine una porzione di DSM corrispondente ad un piano. LSR fornisce la stima ai minimi quadrati dell'equazione caratteristica del piano e infine i corrispondenti valori dei parametri di orientazione dip e dip direction del piano e le coordinate del suo punto baricentrico.

5 Modellazione geometrica

Nella modellazione di ammassi rocciosi fratturati si possono distinguere due fasi:

- la modellazione geometrica;
- la modellazione meccanica.

L'affidabilità di una simulazione del comportamento meccanico del mezzo fratturato dipende dalla precisione con cui viene definito l'ammasso roccioso; pertanto la modellazione meccanica dipende dai risultati della modellazione geometrica.

Pertanto, per una corretta modellazione di un ammasso roccioso fratturato, sebbene sia indispensabile disporre, oltre che di un rilievo topografico del versante, di un rilievo strutturale esaustivo eseguito in modo accurato, l'aspetto più rilevante è la sua corretta interpretazione. E' fondamentale infatti capire come interagiscono tra di loro le caratteristiche strutturali rilevate e quali siano importanti dal punto di vista del comportamento meccanico globale dell'ammasso roccioso.

Il modello geometrico al quale ci si riferisce è quello proposto da Héliot (1988), che descrive l'ammasso roccioso sotto forma di insieme di blocchi basandosi sul concetto di *gerarchia del sistema di fratturazione*, osservando che le relazioni tra i sistemi di discontinuità comportano ad esempio l'interruzione di alcune fratture in corrispondenza di altre oppure spostamenti relativi tra strutture e sono molto importanti dal punto di vista del comportamento meccanico d'insieme dell'ammasso. Tali relazioni traducono il sopraggiungere di una successione di fenomeni di rottura: i primi creano di solito uno o più sistemi di discontinuità, mentre gli ultimi si limitano in genere ad agire su fratture preesistenti.

Nell'ambito di questa ricerca è stato utilizzato il codice di calcolo Resoblok. Si tratta di uno strumento integrato per la modellazione di ammassi rocciosi fratturati, sotto forma di insiemi di blocchi, elaborato in origine da Héliot [1988], utilizzato e sviluppato nell'ambito delle attività del laboratorio LAEGO, Laboratoire Environnement Géomécanique & Ouvrages (INPL – INERIS), presso l'Ecole de Mines di Nancy.

Resoblok, permette sia l'introduzione deterministica delle fratture osservate in sito che la simulazione stocastica dei sistemi di discontinuità. L'obiettivo è di ottenere dei modelli tridimensionali che contengano le discontinuità osservabili in sito e che estendano lo stato di fratturazione, in modo stocastico ma rispettandone la gerarchia, alle zone in cui l'osservazione diretta non è possibile. Per ricostruire la geometria della fratturazione in tre dimensioni e per poter meglio interpretare le relazioni tra le diverse famiglie di discontinuità, è opportuno cercare di ottenere delle

informazioni sullo stato della fratturazione all'interno della massa rocciosa. A tal fine è necessario disporre indagini complementari quali sondaggi geognostici, prove geofisiche, osservazioni su fronti esposti con diverse orientazioni o in gallerie, ove possibile.

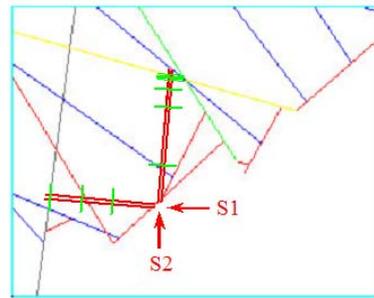


Figura 9 – Sezione orizzontale con simulazione dei sondaggi – Sito pilota di Arnad

La modellazione sotto forma di insieme di blocchi, cioè con fratture completamente persistenti, oltre a metterci in condizione di sicurezza, è necessaria per il passaggio al codice di calcolo utilizzato per la modellazione del comportamento meccanico della parete di Arnad, 3DEC, che prende in considerazione soltanto blocchi completamente definiti.

6 Analisi di stabilità

Lo strumento utilizzato nell'ambito di questa ricerca per l'analisi della stabilità degli ammassi rocciosi fratturati è il modulo B.S.A. (Block Stability Analysis) di Resoblok, che partendo dalle condizioni geometriche ottenute dall'insieme di blocchi generato con il modulo *bg*, ci fornisce delle indicazioni a riguardo della stabilità di ogni singolo blocco creato dalle intersezioni delle discontinuità (o dalle opere di scavo) che abbia almeno una faccia libera.

L'algoritmo impiegato da questo software si basa sul metodo di Warburton, e viene applicato ad ogni blocco considerato instabile.

B.S.A. effettua l'analisi di stabilità dei blocchi che ritiene instabili sfruttando l'equazione dell'equilibrio limite; per default considera come blocchi da analizzare tutti quelli che hanno almeno una faccia libera.

L'esecuzione del programma si divide in tre tappe: la preparazione dei dati, il calcolo e la restituzione dei risultati.

Partendo dai dati elaborati tramite il modulo *bg* di Resoblok, B.S.A. permette di determinare quali blocchi sono instabili attorno a contatto con lo scavo, di calcolare il loro fattore di sicurezza e di visualizzarli.

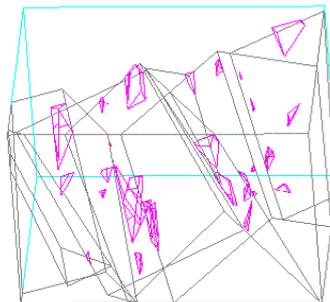


Figura 10 – Visualizzazione dei blocchi instabili alla prima iterazione – Sito pilota di Arnad

L'analisi in questione può proseguire per numerose iterazioni: i blocchi che risultano instabili sono eliminati, ed una nuova analisi viene effettuata.

Per ridurre il numero di blocchi instabili è anche possibile introdurre delle opere di sostegno come i bulloni.

B.S.A. utilizza come dati d'entrata il file risultante dallo studio effettuato con Resoblok. Al file scenario originale, quello utilizzato dal modulo *bg* di Resoblok, si aggiungono le caratteristiche fisiche dell'ammasso roccioso: peso specifico, coesione ed angolo d'attrito.

L'introduzione di questi parametri, che non è necessaria ai fini della generazione del modello geometrico, diventa fondamentale per poter procedere all'analisi della stabilità dell'ammasso roccioso fratturato.

7 Modellazione del comportamento meccanico

Oltre alle analisi delle condizioni di stabilità, effettuate con il metodo dell'equilibrio limite a partire dai modelli numerici generati tramite Resoblok, descritte nel paragrafo precedente, si è ritenuto opportuno procedere all'elaborazione di un modello tridimensionale in grado di riprodurre il comportamento tenso-deformativo

dell'ammasso roccioso fratturato del sito pilota di Arnad. In particolare è stato utilizzato il metodo degli elementi distinti, tramite il codice di calcolo 3DEC sviluppato da Itasca Group Inc., per analisi tridimensionali.

La geometria iniziale dell'insieme di blocchi è ancora quella definita nel modello geometrico realizzato tramite Resoblok, acquisita da 3DEC grazie ad una specifica interfaccia Resoblok-3DEC messa a punto dal Prof. T. Korini nell'ambito delle attività del laboratorio LAEGO.

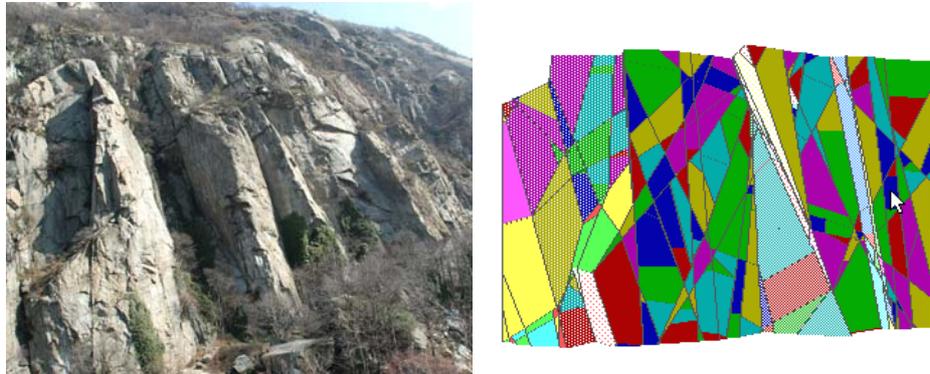


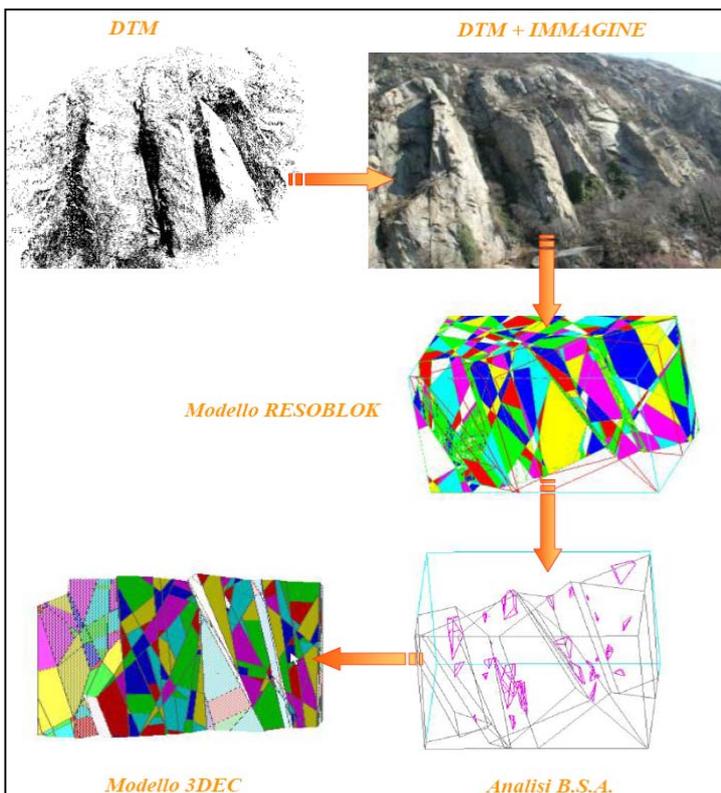
Figura 11 – Versante oggetto di studio / Modello 3DEC – Sito pilota di Arnad

8 Contenuti del CD

In allegato, nel CD, sono disponibili i dettagli degli studi effettuati su 4 siti.

SITO 1 ARNAD

La metodologia fotogrammetrica è stata messa a punto sul sito pilota ubicato nel comune di Arnad, in bassa Valle d'Aosta, sul versante idrografico sinistro della Dora Baltea, presso il fondovalle. Si tratta di una parete rocciosa estesa per circa 150 m in larghezza e 90 m in altezza costituita da gneiss e interessata da occasionali fenomeni di caduta blocchi.



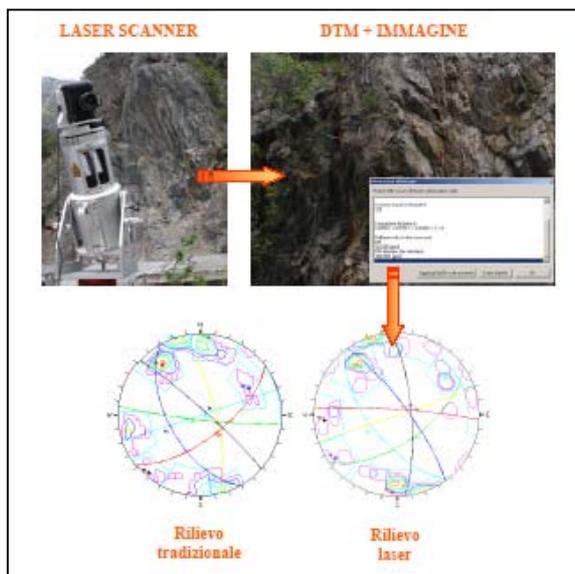
Lo studio di questo sito ha comportato le seguenti fasi descritte in dettaglio nel CD :

- 1.1 Inquadramento geologico
- 1.2 Il rilievo tradizionale
 - 1.2.1 Risultati ottenuti tramite tecniche di rilievo classiche
- 1.3 Il rilievo fotogrammetrico
 - 1.3.1 Il modello stereoscopico
 - 1.3.2 Individuazione dei piani
- 1.4 Confronto tra rilievo strutturale classico e la metodologia messa a punto
- 1.5 Il modello Resoblok della parete rocciosa di Arnad
- 1.6 Analisi di stabilità della parete rocciosa di Arnad
- 1.7 Il modello 3DEC della parete rocciosa di Arnad
- 1.8 Risultati e confronto con B.S.A.

SITO 2 FALAISE DES TRAPPISTES

La metodologia Laser è stata messa a punto sulla parete rocciosa costituita da gneiss denominata Falaise des Trappistes, situata in corrispondenza della galleria paravalanghe de la Monnaie, nella quale passa la strada internazionale del Gd-St-Bernardo, nel comune di Sembrancher, nel cantone Vallese.

La parete in questione è attraversata da un tunnel ferroviario, e al piede si trova una galleria stradale paravalanghe, dimensionata per impedire l'invasione della sede stradale da parte delle masse di neve provenienti dal versante opposto. Quest'ultima galleria è stata distrutta, nell'inverno 2003, per un tratto di lunghezza pari a circa 20 m a causa del ribaltamento di un blocco roccioso di circa 600 m³.



Lo studio di questo sito ha comportato essenzialmente l'applicazione della metodologia Laser per il rilievo geostrutturale della parete ed il confronto con il rilievo effettuato tramite tecniche tradizionali. Le seguenti fasi di studio sono descritte in dettaglio nel CD :

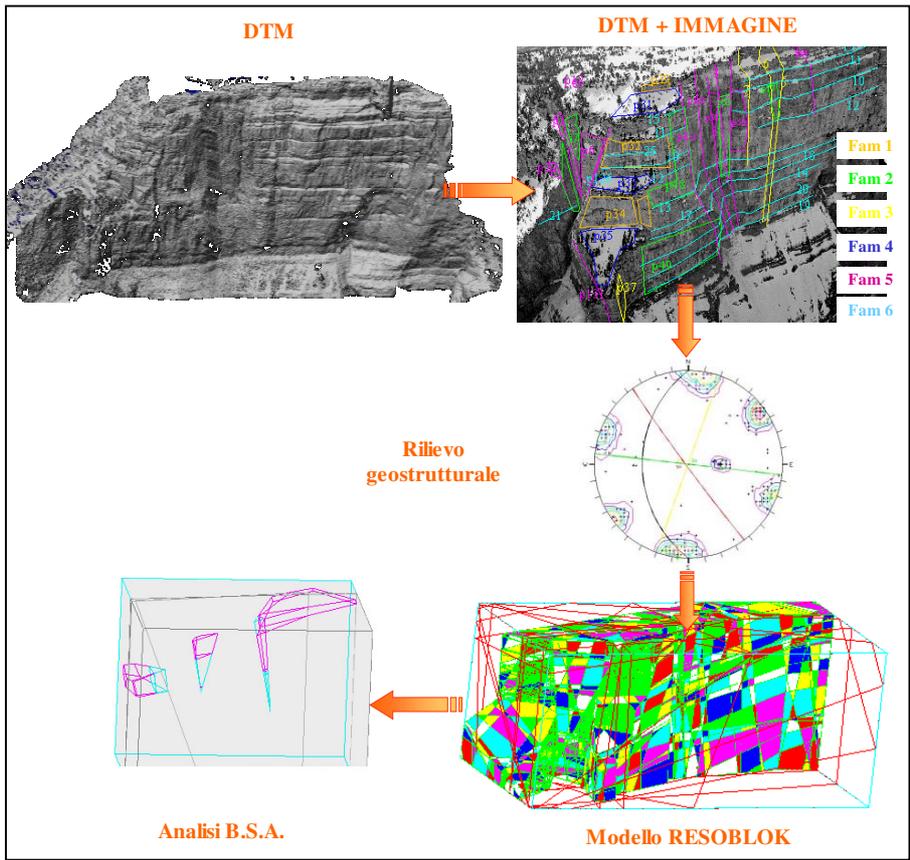
- 2.1 Il rilievo tradizionale
- 2.2 Il rilievo Laser
- 2.2.1 Risultati
- 2.3 Il confronto

SITO 3 MONT GRANIER

Il Monte Granier forma lo sperone Nord del massiccio della Chartreuse e si trova al confine tra i dipartimenti dell'Isère e della Savoia, nel comune di Chambéry, in Francia.

Nel novembre del 1248, un crollo il cui volume è stimato entro i 300 e i 500 milioni di metri cubi, si produsse a partire dalla faccia Nord del Monte Granier. Al giorno d'oggi, il monte Granier forma un bastione di massa calcarea dalle pareti verticali che appoggia su livelli marnocalcarei, aventi pendenza di 15° verso Sud-Est.



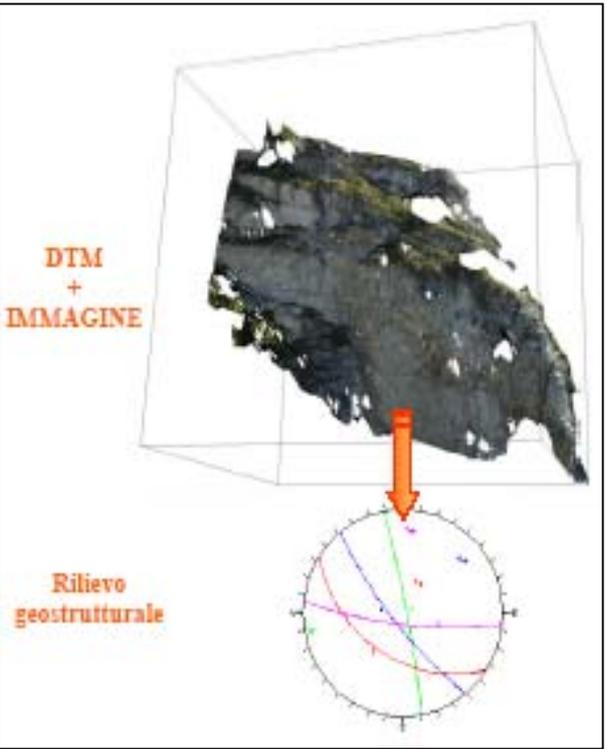


Lo studio di questo sito ha comportato essenzialmente l'applicazione della metodologia fotogrammetrica lavorando a partire da immagini digitalizzate di un precedente rilievo fotogrammetrico con camera metrica effettuato da elicottero. Le seguenti fasi di studio sono descritte in dettaglio nel CD :

- 3.1 Ubicazione geografica e descrizione del sito
- 3.2 Il modello stereoscopico
- 3.3 Individuazione dei piani
- 3.4 Risultati

SITO 4 LONGEBORGNE

L' ammasso roccioso analizzato è situato nel comune di Bramois, nel cantone Vallese della Svizzera. Si tratta dell'ammasso roccioso sovrastante l'Ermitage de Longeborgne, situato tra le Alpi cernesi e le Alpi pennine, che negli ultimi decenni è stato soggetto a numerosi fenomeni di distacco, che rappresentano un rischio elevato per gli edifici che sorgono ai suoi piedi.



Lo studio di questo sito ha comportato essenzialmente l'applicazione della metodologia fotogrammetrica digitale in condizioni non ottimali per l'acquisizione delle immagini a causa delle difficoltà di accesso alla parete: l'elevata distanza e l'impossibilità di realizzare basi di presa ampie limitano la capacità di ottenere geometrie di blocco favorevoli. Pertanto al momento attuale l'analisi è stata limitata alla parete Ovest, di dimensioni più contenute e di più facile accesso. Le seguenti fasi di studio sono descritte in dettaglio nel CD:

- 4.1 Ubicazione geografica e descrizione del sito
- 4.2 Il rilievo fotogrammetrico
- 4.3 Individuazione dei piani

Azione C: Studio e modellazione della propagazione

1 Bibliografia

1.1 Modellazione fisica (V. Labiouse, I. Manzella)

Classificazione dei riferimenti bibliografici più significativi sulla modellazione fisica dello scorrimento granulare di blocchi, articolata secondo le condizioni di prova per consentire al lettore una rapida individuazione del tipo di studio di suo interesse (per la lista completa dei riferimenti bibliografici riferirsi al CD).

				Material, Diameter [mm]	Amount	Height [cm]	Slope	Reference
Granular material	2D	Steady flow	Small scale	Glass beads D=0.3	<7.2Kg/s/m	<130	<40°	Ancey et al (1997)
				Steel beads D=3	1200-1700 particles/s	~60<h<~80	18°-24°	Azanza et al (1997)
				Quartz sand D=0.035		50<h<90	33°	Bagnold (1954)
				Plastic spheres D=6	2230,1280 particles/s	~250 cm	42.75°	Drake (1990 and 1991)
				Sand, rock flour, polystyrene beads	200 Kg/s	400<h<700	28.4°,33.6°	Hungr, Morgesten (1984)
				Glass beads D=0.5,1.3,1.15		<100	20°-28°	Pouliquen (1999)
		Unsteady flow	Small scale	Glass, Vestolen, Quartz, marmor beads 2.5<D<5	1.5, 3 l	~ 200	Curved	Greve, Hutter (1993)
				Chick peas D=10	15000, 16000 peas	~90<h<~165	20°-50°	Bouزيد (1999 and 2001)
				Debris?	V,1/19V			Broilli (1976)
				Gravel density=2650 kg/m ³	~9,-18dm ³	~200<h<350	27°-44°	Chu et al (1995)
	Silica sand D ₅₀ =0.19, gravel D ₅₀ =2			0.1-1-10-1000 l	~100<h<150	35°, 45°	Davies, McSaveney (1999) Davies et al (1999)	
	Fine silica D=0.19			1.8 l	H _{CM} =14,21,35	45°	Davies, McSaveney (2002 and 2003)	
	Glass, Vestolen, Quartz, marmor beads 2.5<D<5			1.5,2.5,3 l	~200	curved	Hutter, Koch (1991)	
	Plastic particles D=4, glass beads D=3			500 to 5000gr		40°-60°	Hutter, Savage (1988)	
	Glass, alumina, zirconia beads D=14			100 to 600 part.	~50<h<100	15°,25°	Okura et al (2000 and 2001)	
	Ticino sand D=0.6			22.5 dm ³	~170	25°	Valentino et al (2004)	
	3D	Unsteady flow	Small scale	Chick peas D=10	15000, 16000 peas	~90<h<~165	20°-50°	Bouزيد (1999)
				Glass, Vestolen, Quartz, marmor beads 2.5<D<5	<3dm ³	~200	20°-60°	Greve et al (1994)
				Silt, dry ice (also oil, bentonite, thixotropic flow)	<160 cm ³	~60	41°	Hsü (1975)
				Dry quartz sand D=0.5	290 cm ³	~19.5	31.4°	Denlinger, Iverson (2001)
Glass beads D=0.5				62,231,524 g	<100	19°-24°	Pouliquen, Fortierre (2002)	
Vestolen beads D=2-3.5, marble chips D=2-4, quartz chips D=4-5				<3 dm ³	~180	40°	Wieland et al (1999)	
Large scale			Water saturated sand and gravel	10 m ³	~5000	31°	Denlinger, Iverson (2001)	
Blocks	3D	Unsteady flow	Small scale	Jointed mass, block of 36x36x110	~2dm ³		20°,28°, 36°	Reik, Hesselmann (1976)
			Small scale	Jointed mass, block of 120x120x30, 120x30x30	~2dm ³		35°, 40°	Rengers, Müller (1970)
			Large scale	Square block	0.001 to 1 m ³	290	35° and 20°	Okura et al (2000 and 2002)

1.2 Modellazione numerica della propagazione dei grandi movimenti franosi (M. Naaim)

Ai fini della descrizione delle valanghe di roccia, sono stati sviluppati ed impiegati diversi *modelli numerici*. Occorre ricordare, innanzitutto, che un modello è soltanto una *rappresentazione* della realtà, più o meno semplificata in funzione delle ipotesi considerate, che deve spiegare i fenomeni complessi, nella maggior parte dei casi concomitanti e interagenti con maggiore o minore intensità. I modelli numerici, quindi, prevedono una parte empirica, una sorta di “scatola nera” più o meno in relazione con la fisica. Essa consente di calare una certa realtà fisica (dedotta da esperimenti in modelli ridotti o ipotesi fisiche) senza preoccuparsi assolutamente dei meccanismi fisici sottostanti e delle leggi di scala.

1.2.1 Rappresentazione del suolo

Nella modellazione, il suolo sul quale si produce la valanga di roccia viene rappresentato mediante una discretizzazione dello spazio, ovvero una maglia spaziale che rappresenta il sito attraverso una serie di segmenti o superfici. Ogni singolo elemento spaziale è caratterizzato dalla pendenza media, l'orientamento, l'estensione o la superficie e dagli elementi vicini. Tale rappresentazione è una delle chiavi del successo della simulazione numerica. Affinché i calcoli siano precisi, occorre che le principali caratteristiche del sito siano integrate nella rappresentazione, in particolare i bruschi cambiamenti di pendenza e i thalweg.

1.2.2 Rappresentazione della massa in movimento

Discreto o continuo?

Esistono almeno due modalità di rappresentazione della massa in movimento: la meccanica dei mezzi discreti e l'ambito formale della meccanica dei mezzi continui. La prima descrizione è particolarmente adatta alle frane di piccola dimensione dove è possibile scomporre la massa in elementi rappresentativi della massa reale. La seconda rappresentazione è preferibile per le grandi frane in terra, dove la dimensione degli elementi rappresentativi è irrilevante rispetto alla dimensione della frana, il che consente di considerare la massa un mezzo continuo deformabile e di applicare il formalismo classico dei mezzi continui.

Principio di conservazione e legge del comportamento

A prescindere dalla rappresentazione scelta, la dinamica della massa è disciplinata da due categorie di equazioni. La prima corrisponde ai principi fondamentali di conservazione, ovvero la conservazione della massa, la conservazione della quantità di movimento e la conservazione dell'energia. Oltre ai termini inerziali ed alle forze esterne, tali equazioni indicano le dissipazioni all'interno e nell'interfaccia con il substrato. La dissipazione necessita la determinazione empirica o la scelta di una formulazione teorica delle equazioni di stato dette anche leggi di comportamento.

Modellazione discreta

L'approccio discreto consente di calcolare la cinematica (campo di velocità) di un insieme di particelle rigide legate tra loro dalle leggi d'attrito, tenendo conto delle forze di contatto (attrito, coesione, collisione), delle forze di volume (peso) e delle condizioni al contorno (forza, spostamento, accelerazione). Ad ogni incremento di tempo, la soluzione delle equazioni della dinamica è calcolata in modo implicito per l'insieme delle particelle, grazie ad un metodo iterativo, il cui risultato converge verso un'unica soluzione. Questo metodo consente di analizzare sistemi costituiti da diverse migliaia di particelle in un tempo di calcolo ragionevole su un computer di media potenza. È particolarmente appropriato allo studio dei problemi di propagazione di frane composte da un numero limitato di blocchi.

Modellazione continua

L'approccio continuo consente di calcolare la dinamica (campo di velocità e spessore) di una massa deformabile rappresentata da una discretizzazione spaziale (proiezione su maglia), una legge di comportamento, forze di volume (peso) e condizioni al contorno.

Sono impiegate tre forme di equazione. Senza ipotesi ulteriori, è possibile risolvere le equazioni di conservazione completa, chiamate di equazioni di Navier Stokes. Codici generici, quali Fluent, Star CD, Flows 3D, offrono la possibilità di simulare grandi scivolamenti. Data la complessità, il tempo ed il costo dei calcoli, l'utilizzo di questo tipo di software non è adatto allo studio delle frane. Il progetto esaminato in questa sede non ha sviluppato nessun modello di questo tipo. È invece possibile, attraverso ipotesi obiettive, semplificare le equazioni ed ottenere strumenti di simulazione più semplici:

- L'equazione di Saint Venant (formalismo di onda lunga), qualora si presupponga che l'estensione dell'accumulo sia grande rispetto allo spessore, il che giustifica l'integrazione sullo spessore e riduce di una dimensione la complessità del sistema da risolvere. In questo progetto, sono stati utilizzati tre modelli che hanno impiegato

questo formalismo: Politecnico di Torino /IPGP), DAN (Politecnico de Torino/Hungr) ed il modello del Cemagref.

- Il modello di Voellmy, qualora si presupponga che la deformazione dell'ammasso della frana sia trascurabile rispetto alla distanza percorsa, il che permette di considerare la frana un blocco indeformabile e di utilizzare l'equazione del moto di un blocco che scivola su un piano inclinato.
- Il modello del CETE Méditerranée Espan3D, ovvero scomponendo la frana in volumi elementari e studiando la traiettoria di ogni singolo elemento nella sua interazione con gli elementi vicini, con dissipazione d'energia per attrito.

Ad ogni incremento di tempo, la soluzione delle equazioni della dinamica è calcolata in modo esplicito od implicito per l'insieme degli elementi della maglia, grazie ad un metodo iterativo. Questo metodo permette di considerare, per gli ammassi di grandi dimensioni, il campo velocità ed altezza. I calcoli di tipo traiettografico si eseguono per segmenti elementari senza necessariamente raffinare ulteriormente la maglia rispetto alla rappresentazione iniziale. I modelli Saint Venant, invece, richiedono un miglioramento della rappresentazione iniziale mediante il perfezionamento della maglia. La precisione, ma anche la dimensione e la durata della simulazione dipendono dal livello di accuratezza. È possibile eseguire un calcolo con ragionevole precisione su un computer di potenza media, adottando maglie con spaziatura compresa tra 1 e 10 m. Questo modello è adatto allo studio della propagazione dei movimenti franosi.

Tabella ricapitolava dei modelli di simulazione dei grandi movimenti franosi:

Codice	Rappresentazione della massa in movimento	Leggi di comportamento	Parametri	Volume (m ³)	Rappresentazione e del terreno	Risultati auspicati
PFC2d/3d	Discreta	Legge di contatto tra granuli, attrito, collisione, coesione	Coefficiente di attrito intergranulare, coefficiente di restituzione, coefficiente di dumping	<10000	1D ou 3D	Cinematica degli elementi rappresentativi, estensione della frana
Saint Venant : DAN, DAN3D, CemagrefR ASH ^{3D}	Continua	Legge d'attrito: Mohr-Coulomb Voellmy Hershel Bulkley Granulaire (de Bagnold à Pouliquen)	Coefficiente di attrito (Mohr-Coulomb, Voellmy,)	>100000	1D 2D	Campi velocità medie e altezze, estensione
EBMAS/ EPAN3D	Discreta e continue	idem	idem	idem	idem	Estensione

2 Descrizione dei metodi numerici

2.1 Descrizione dei metodi

In questa sezione sono presentati i quattro metodi sviluppati o rappresentati dai partner del progetto. Per i dettagli di ogni singolo autore, fare riferimento al CD.

2.2 Metodo del CETE Aix : modello EPAN3D (Serratrice)

Il metodo di calcolo per espansione ha come obiettivo la simulazione della propagazione lungo un versante montuoso, nonché l'accumulo e la distribuzione spaziale nella valle di grossi ammassi rocciosi. Il calcolo si basa sulla topografia del sito definita nelle sue tre dimensioni da un modello digitale del suolo (DTM). Il volume roccioso instabile è discretizzato in piccoli elementi di volume. Dopo l'avvio del movimento, questi elementi si spostano sul DTM gli uni rispetto agli altri, continuando a scivolare fino al momento in cui trovano un equilibrio nel fondo valle

dove si accumulano e si distribuiscono nello spazio. Durante la frana, la morfologia del versante è aggiornata ad ogni singolo calcolo, integrando l'insieme degli elementi in movimento.

Dopo la discretizzazione del volume roccioso instabile in piccoli elementi, il calcolo per espansione si esegue in successione. Ad un dato istante, la traiettoria di un elemento che scivola all'interno di un ammasso roccioso è determinata dall'equazione dinamica del movimento applicata al piano tangente locale coperto dall'elemento. In totale, il modello comporta una ventina di parametri, di cui otto governano la propagazione (parametri meccanici). Gli altri parametri riguardano la discretizzazione e l'esecuzione del calcolo numerico (numero di elementi, volume elementare, test di convergenza, ecc.)

La dissipazione dell'energia è prodotta essenzialmente per attrito tra gli elementi e tra l'elemento e la superficie del versante. Una legge definisce l'attrito $\mu = \text{tg}\phi$ come funzione della velocità istantanea v di ogni elemento (quattro parametri ϕ_0, ϕ_1, v_0, v_1):

$$\begin{array}{lll} v \leq v_0 & \mu = \mu_0 & \mu_0 = \text{tg}\phi_0 \\ v > v_0 & \mu = \mu_0 + (\mu_1 - \mu_0) [1 - \exp(-(v - v_0)/v_1)] & \mu_1 = \text{tg}\phi_1 \end{array}$$

Un'altra legge tratta l'evoluzione della forma e del volume di ogni singolo elemento che scivola lungo il percorso. Ogni volume elementare assume la forma di una paraboloida a sezione circolare (a raggio della base, e a altezza, e distribuzione). Il peso di volume iniziale della roccia è γ . Il volume elementare V e della sua distribuzione spaziale evolvono in funzione dell'ascissa curvilinea s dell'elemento (tre parametri s_0, r_f, r_e):

$$f(s) = \exp(-s/s_0) \quad V = V_0 [1 + r_f (1 - f(s))] \quad e = 1 + r_e (1 - f(s))$$

Gli otto parametri meccanici del modello sono quindi:

γ	Peso di volume iniziale della roccia (kN/m ³)	
ϕ_0, ϕ_1	Parametri di attrito (°)	$\phi_0 < \phi(v) < \phi_1$
v_0, v_1	Velocità caratteristiche	
s_0	Distanza caratteristica di propagazione (m)	
r_f	coefficiente di dilatazione ()	$r_f > 0$
r_e	coefficiente di distribuzione spaziale ()	$r_e > 0$

Il peso di volume γ è dato dal massiccio roccioso. Il rigonfiamento r_f indica l'aumento del volume della roccia in movimento. I parametri ϕ_0 e ϕ_1 si riferiscono alla dissipazione d'energia. Il parametro r_e contribuisce altresì alla dissipazione, poiché gli elementi bombati (debole distribuzione) consumano più energia degli elementi piatti (grande diffusione). Tutti gli altri parametri sono più o meno calati sulla dimensione del sito, in particolare v_0 e s_0 , mentre $v_1 \approx 5 v_0$. La modellazione dei quattro casi documentati è consistita principalmente nell'aggiustamento dei parametri di dissipazione dell'energia, che nei calcoli assumono maggior peso. La discretizzazione del volume iniziale instabile è un fattore altrettanto fondamentale e determinante.

2.1.2 Metodo del CETE Lione: modello EBMAS (Effendiantz)

La propagazione dei grandi movimenti franosi (superiore a 0.5hm³) genera un effetto massa che a sua volta riduce i meccanismi di dissipazione d'energia all'interno dei materiali in movimento e accentua la propagazione dei materiali stessi. L'influenza del volume totale in gioco simultaneamente in un grande evento franoso è determinante per la propagazione e l'estensione del fenomeno

Il modello di propagazione applicabile alle frane indipendenti (PROPAG) è stato trasposto ai grandi movimenti franosi. A prescindere dagli aspetti meccanici specifici, l'importanza dei volumi interessati impone che venga considerato l'effetto 3D. I punti principali del metodo sono i seguenti:

- estensione del concetto di funzione di trasferimento che caratterizza la dissipazione d'energia in caso di propagazione indipendente di un blocco elementare;
- calcolo per incrementi di volumi successivi che tenga conto del continuo cambiamento del profilo del versante dovuto alle fasi successive della frana;
- calcolo effettuato per parti giustapposte secondo le direzioni di propagazione definite manualmente dall'utente. Il calcolo tiene conto delle interazioni in funzione della geometria dei canali di propagazione vicini e dei volumi coinvolti.

Questi tre aspetti sono integrati in un modello complessivo che consente di simulare in modo omogeneo e continuo il verificarsi della frana nel suo insieme, prendendo in considerazione l'effetto dell'interazione reciproca tra direzioni di propagazione.

La verifica del modello è stata effettuata su grandi movimenti franosi documentati (cf. frana del Mont Granier) per i grandi volumi e, per l'altra estremità della gamma, si è fatto riferimento alle frane classiche per le quali si dispongono parecchi dati convalidati.

2.1.3 Metodo del Cemagref (Naaim)

Nell'ambito del progetto, il Cemagref ha sviluppato un modello numerico ai fini dell'analisi dinamica dello scorrimento rapido di valanghe di detrito. Il modello si basa sull'approccio della meccanica degli mezzi continui ed impiega l'equazione di Saint Venant. Utilizza le leggi di comportamento degli mezzi granulari derivanti dagli ultimi progressi nella reologia dei mezzi discreti..

Le caratteristiche del modello sono le seguenti:

- Capacità di simulare il movimento su un terreno complesso tridimensionale,
- Capacità di considerare l'anisotropia del campo di pressione
- L'algoritmo di risoluzione delle equazioni in forma conservativa impiega schemi numerici del tipo volumi finiti, particolarmente adatti all'idrodinamica. Il modello è stato testato analizzando una serie di esperimenti in laboratorio con materiali granulari in scorrimento permanente o transitorio. Successivamente il modello ha consentito di ricostituire in modo realistico gli eventi franosi sottoposti in questo progetto a back analysis.

2.1.4 Metodo del Politecnico di Torino: modelli DAN e RASH3D (C. Scavia, M. Pirulli)

La simulazione del flusso di una massa è realizzata dal Politecnico di Torino con l'impiego di una metodologia che prevede la combinazione di due modelli, un modello semplice bidimensionale (DAN, Hungr 1995), ed un modello tridimensionale più complesso (RASH^{3D}, Pirulli 2005). DAN viene impiegato innanzitutto per determinare rapidamente l'intervallo di variazione dei parametri reologici e, successivamente, per ottenere risultati più completi e realistici, si utilizzano i valori espressi da DAN per calare il modello tridimensionale.

I due modelli sono sviluppati nell'ambito della meccanica dei mezzi continui e consentono di utilizzare una reologia semplificata, per attrito ("frictional") ad esempio, nella quale gli unici parametri da determinare sono l'angolo di attrito alla base della massa in movimento (φ) e, quando si suppone l'anisotropia degli sforzi, l'angolo di attrito interno del materiale (ϕ).

Il codice **DAN** (Hungr, 1995) risolve le equazioni del movimento secondo la soluzione di Lagrange monodimensionale. Esso consente di scegliere tra reologie diverse (plastica, di attrito, Newton, turbolenta, Bingham, viscosa, di Coulomb, Voellmy) che possono cambiare sia lungo il percorso, sia all'interno della massa.

Il profilo del pendio e della massa instabile sono i dati principali da fornire al codice. Per realizzare analisi pseudo-tridimensionali, occorre definire la larghezza della superficie di scorrimento su ogni singolo punto del profilo del pendio avendo presente che tutta la larghezza determinata sarà occupata dalla massa in movimento. Il problema è facilmente risolto mediante back analysis, dato che consente di conoscere i contorni laterali dello spazio occupato dalla massa in movimento. La rappresentazione di casi di "splitting" della massa (separazioni in più canali di scorrimento) resta tuttavia impossibile.

I risultati principali ottenuti sono: la distanza della propagazione, la risalita sul versante opposto rispetto alla zona instabile, la velocità del movimento, i confini della zona di propagazione e lo spessore della massa accumulata. L'impiego del modello richiede una formulazione semplice della topografia, malgrado quest'ultima sia spesso complessa. Questo limite rende i risultati per forza di cose approssimativi, ma consente una grande rapidità nella simulazione numerica dei casi reali.

Il codice tridimensionale **RASH^{3D}** (Pirulli, 2005) utilizza un approccio tipo Eulerian, che risolve le equazioni del movimento impiegando una schema per volumi finiti (Audusse et al. 2001, Bristeau et al. 2001, Mangeney et al. 2003). Il modello consente di scegliere tra una reologia di tipo "frictional" e una reologia di tipo Voellmy. La reologia può cambiare lungo il percorso della massa in movimento.

I principali dati geometrici da fornire al codice sono il DTM prima della frana ed il volume potenzialmente instabile. La geometria del percorso di propagazione della massa non deve essere determinata in anticipo ma si determina automaticamente durante l'analisi di propagazione, in funzione della topografia. Il codice è altresì capace di simulare il comportamento della massa in caso di "splitting" separazione in più canali di scorrimento.

I file creati da RASH^{3D} forniscono tutte le informazioni necessarie alla realizzazione, con uno strumento geografico (es. Surfer), di una rappresentazione tridimensionale su topografia reale dei limiti di propagazione della massa ed ottenere, per esempio, gli spessori lungo il percorso su una qualsiasi sezione.

Nell'ambito del progetto Rockslidetec, le analisi con DAN e RASH^{3D} sono state effettuate impiegando una reologia di tipo "frictional", ovvero la reologia che richiede il minore numero di parametri. Scelta questa giustificata

dal fatto che il valore dei parametri reologici è difficilmente determinabile a priori. Occorre quindi limitare al meglio il numero di parametri da impiegare.

2.3 Sintesi – raffronto per l'utilizzatore

Tra i codici impiegati nel progetto, due sono diffusi: DAN su licenza e il codice Cemagref gratuitamente. Quest'ultimo beneficia delle possibilità di aggiornamento. RASH3D è in fase di sviluppo e non è ancora utilizzabile da terzi. Gli altri codici appartengono agli organismi che li hanno sviluppati per loro scopi.

I tempi d'utilizzo riferiti corrispondono al tempo stimato per uno studio di propagazione a partire dal momento in cui è attribuito l'incarico ed i dati disponibili (DTM e scenari di distacco).

Modello / partener	Proprietario/referente	Modalità d'impiego	Tipo di validazione
DAN (Politecnico Torino)	University of British Columbia Contact : Oldrich Hungr Department of Earth and Ocean Sciences University of British Columbia 6339 Stores Rd., Vancouver, B.C., V6T 1Z4, Canada Tel : 001 604 8228471 ohungr@eos.ubc.ca	Licenza / impiego + Prestazione	Publicazioni scientifiche Hungr, 1995 Hungr & Evans, 1996 Hungr & Evans, 1997 Hungr, 1997
RASH 3D (Politecnico Torino)	Politecnico di Torino/Institut de Physique du Globe de Paris/INRIA Contact : Marina Pirulli Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica Corso Duca degli Abruzzi, 24 10129 TORINO Tel : 0039 011564 4823 marina.pirulli@polito.it	Prestazione	Publicazioni scientifiche: Pirulli, 2005
Cemagref	Cemagref Contact : Mohammed Naaïm Division ETNA 2 rue de la Papeterie BP 76 38 402 saint Martin d'Hères Cedex Tel : 00 33 4 76 76 27 22 mohamed.naaim@cemagref.fr	Gratuito / impiego + Prestazione	Publicazioni scientifiche
EPAN 3D (CETE Méditerranée)	CETE Méditerranée Contact : Jean-François Serratrice Pôle d'activités d'Aix en Provence CS 70499 13593 Aix en Provence cedex 3 Tel : 04 42 24 78 52 jean-francois.serratrice@equipement.gouv.fr	Prestazione	o Ministère Equipement
EBMAS (CETE Lyon)	Rochet Consultants (R&R) Contact Louis Rochet 4 rue Clément Ader 69500 Bron Tel : 00 33 4 72 37 13 96 rr.consultants@wanadoo.fr	Prestation (R&R)	Interne R&R

Modello / partenere	Back analysis	Analisi predittiva ?	Tempo (con DTM)	Prospettive di miglioramento
DAN (Politecnico Torino)	Si	Già impiegata (Ceppo Morelli)	4 giorni	Estensione al tridimensionale (vedi McDougall and Hungr, 2004)
RASH 3D (Politecnico Torino)	Si	Non ancora impiegata	6,5 giorni	Creare un'interfaccia "user friendly"
Cemagref	Si	Non ancora impiegata	2,5 giorni	Aperto alle collaborazioni / trasferimento a utenti
EPAN 3D (CETE Méditerranée)	Si	Già impiegata (Sechilienne)	6 giorni	
EBMAS (CETE Lyon)	Si	Già impiegata (Sechilienne)	15 giorni	Approfondimento degli aspetti relativi alle propagazioni che non interessano il piede del versante e delle morfologie dei depositi complessi (contropendenze, assenza di depositi...)

3 La Modellazione fisica (I. Manzella, V. Labiouse)

3.1 Descrizione delle prove

E' stata condotta una campagna sperimentale su un modello geometricamente semplice (figura in basso) rappresentato da una scatola su un piano inclinato a 45° e da un piano orizzontale. Il materiale granulare contenuto nella scatola e rappresentante la massa instabile viene improvvisamente liberato. La sua propagazione filmata mediante telecamera digitale ad acquisizione rapida. I test sono stati condotti al fine di porre in evidenza l'influenza sulla propagazione della massa e la morfologia del deposito (lunghezza, larghezza, altezza) dei seguenti parametri:

- natura del materiale: sabbia di Hostun (0.315-0.8 mm) et ghiaia d'acquario (1-4 mm);
- altezza del rilascio (1 e 2 m);
- volume del materiale (tra 10 e 40 litri);
- sequenza di rilascio (es. 30 litri in una volta o 10 litri in tre volte);
- geometria di partenza della massa rilasciata

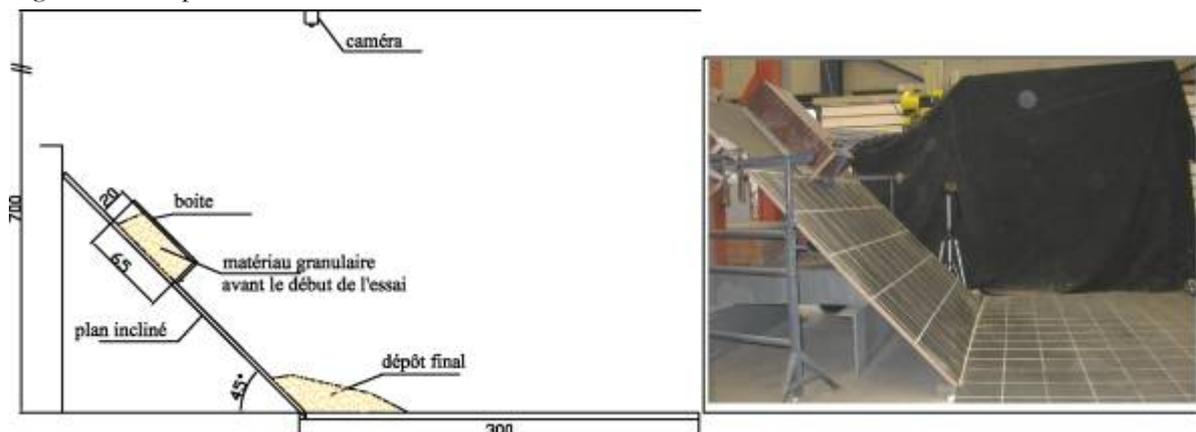


Figura 1: Dispositivo di prova

Paramètres		Matériau			Hauteur (m)		Volume (l)				Nombre de lâchers				Géométrie de départ hauteur (cm) * largeur (cm)				
		Hs	Gr2	Gr4	1	2	10	20	30	40	1	2	3	4	20*20	20*30	20*40	8.5*40	
Séries	1 ^{er} modèle	1A		Gr2		1		10	20	30	40	1						20*40	
		1B		Gr2		1			20	30	40	1	2	3	4			20*40	
		2A	Hs			1		10	20	30		1						20*40	
		2B	Hs			1				30		1	2	3				20*40	
		3A		Gr2		1		10	20			1							8.5*40
		3B		Gr2		1			20			1	2						8.5*40
	2 ^e	4A		Gr2		1			20	30	40	1						20*40	

	4B	Gr2		1				40	1	2				20*40
	5	Hs		1		20	30		1					20*40
	6A	Gr2		2		20	30	40	1					20*40
	6B	Gr2		2				40	1	2				20*40
	7	Hs			2		30		1					20*40
	8		Gr4		2		30		1					20*40
	9	Gr2			2	20			1			20*20		
	10	Gr2			2	20	30		1			20*30		
	11	Gr2			2	20			1					20*40 plat

La distanza percorsa dalla massa sul piano orizzontale (run out) nonché la lunghezza, altezza e larghezza del deposito finale sono state misurate manualmente dopo ogni prova. La velocità del fronte della massa è stata valutata a partire da riprese effettuate con il software WINalyze (analisi di immagini). Il volume e la morfologia del deposito sono studiati mediante una nuova tecnologia metrologica basata sulla proiezione di frange.

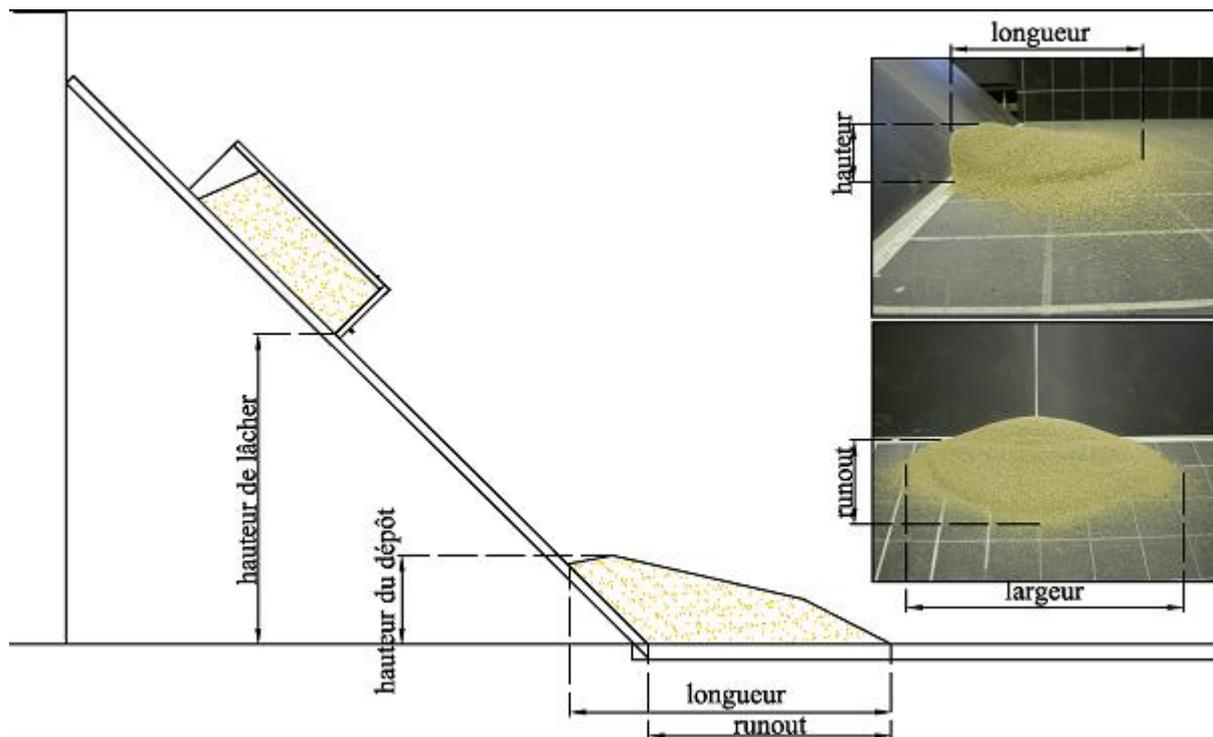


Figura 2: caratteristiche del deposito

La tabella qui riportata riassume qualitativamente l'influenza di un aumento dei parametri studiati (righe) sulle caratteristiche del deposito (colonne).

Paramètres	Runout	Largeur	Hauteur	Longueur	Morphologie	Vitesse
Matériaux De Hs à Gr2	↗	↗	↘↘	↗	Différence significative	↗
Volume	↗	↗	↗	↗	↔	↗ À la fin
Hauteur de lâcher	↗ Faible	↗	↘	↗ Faible	Formes différentes	↗ Même allure
Largeur de la masse au départ	↔	↗ Faible	Variable	Variable	↔	↔
Nombre de lâchers	↘	Variable	↗↗	↗	Evolution vers un cône	-
Lâchers successifs	↔	↗	↗↗	↗	-	-

Tra i due materiali granulari testati, si osserva una netta differenza nella morfologia del deposito. La configurazione del deposito di sabbia è conforme alle numerose esperienze descritte in letteratura (Hutter, Savage, Bagnold...), mentre la morfologia del deposito con ghiaia di acquario presenta discontinuità angolari molto evidenti

(zona centrale in lieve pendenza, ma fronte anteriore, posteriore e laterale molto inclinato) come si riscontra sul sito delle Six des eaux froides (Vallese, cf. 4.1) e su altri siti di valanghe di roccia (quali Frank Slide, secondo il professor Oldrich Hungr). Tale differenza morfologica deriva più dall'allungamento e dall'angolarità degli elementi rappresentativi che dall'estensione della granulometria. Questo punto andrà comunque successivamente chiarito.

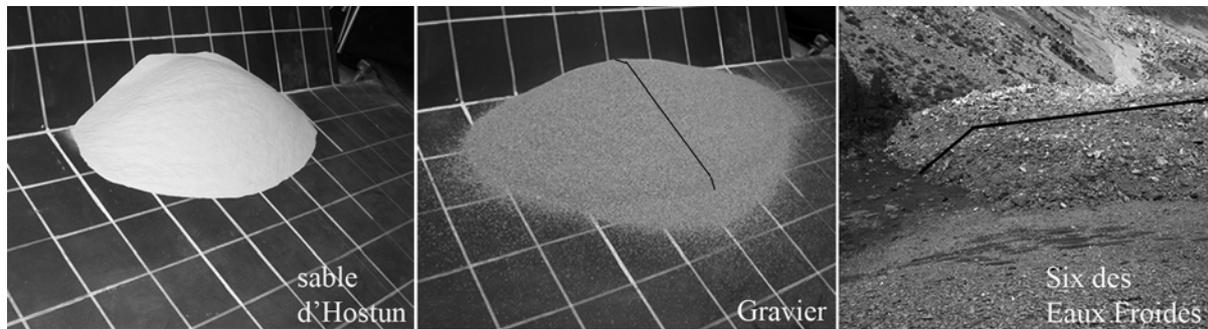


Figura 3: Raffronto delle morfologie dei depositi di sabbia, ghiaia e nel caso di Six des Eaux Froides

La morfologia del deposito si è del resto dimostrata assolutamente indipendente dalla sequenza del rilascio della massa. Se quest'ultima viene liberata in varie riprese, si osserva un deposito relativamente conico, come nel caso della frana di Randa (come in una clessidra ad es.), mentre un unico rilascio genera una distanza di propagazione molto più lunga, ma larghezze ed altezze di deposito ridotte.

L'analisi del deposito dovuto a rilasci unici della massa (eventi reali dalle conseguenze più catastrofiche) evidenzia il ruolo preponderante del volume e quello secondario dell'altezza di partenza sulla distanza di propagazione della massa (runout). Queste constatazioni corrispondono alle proposte formulate da Legros (2002) e sono in contraddizione con le teorie basate sul concetto dell'angolo di attrito equivalente (Fahrbohung).

In fine, la morfologia del deposito finale sembra dipendere ampiamente dalla geometria della massa al momento del distacco e, in modo particolare, dalla larghezza.

3.2 Raffronto dei diversi modelli numerici su una prova di laboratorio

Un rilascio di 20 litri di ghiaia Gr2 ($\phi_i=33^\circ$, $\phi_b=32^\circ$) da 1 m di altezza è stato oggetto di un'attenzione particolare in termini metrologici, ai fini della costituzione di una base di confronto sperimentale per i modelli numerici dei partner.

Ogni équipe ha previsto la creazione del modello digitale del suolo (DTM) che rappresenta la geometria del modello (un piano inclinato a 45° ed un piano orizzontale) nonché la definizione di una zona di partenza (scatola di 0.25 m x 0.20 m x 0.4 riempita di materiale granulare), senza che ciò generi differenze nei risultati. Per contro, vi sono alcuni dati propri delle modellazioni di ogni partner :

- Il Cemagref ha impiegato il suo codice con un modello di tipo "frictional" ed un coefficiente di attrito pari a 0.62 che corrisponde alla tangente dell'angolo di attrito alla base ($\phi_b=32^\circ$). Non è stata effettuata nessuna procedura di calaggio.
- Per il modello EPAN3D la massa rilasciata è stata discretizzata in 1911 volumi elementari disposti in sette strati secondo una rete cubica. La back analysis della prova fisica ha consentito di calare i parametri del modello comportamentale sviluppato. Il gioco ottenuto è il seguente:

γ (kN/m ³)	ϕ_0 (°)	ϕ_1 (°)	v_0 (m/s)	v_1 (m/s)	s_0 (m)	r_f ()	g_0 ()	r_g ()	e_0 ()	r_e ()
16.5	11	44.5	0.1	0.5	0.05	0.05	1	0	1	-0.96

- L'applicazione del modello RASH3D altresì basata su un modello "frictional". L'angolo alla base è stato fissato a 42° , dopo calaggio sui risultati del test in laboratorio.

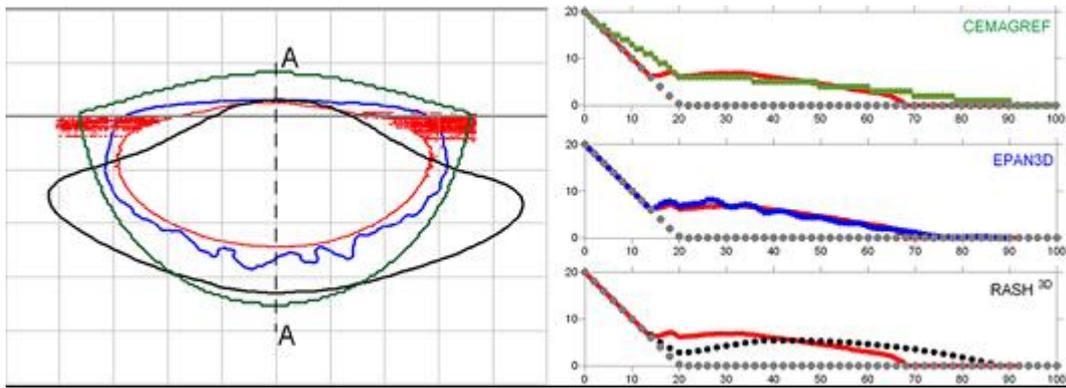


Fig. 4. Distribuzione del deposito in seguito al rilascio di 20 litri di ghiaia da un metro di altezza. Raffronto delle misurazioni (in rosso) e delle modellazioni numeriche: Cémagref in verde, Cete in blu e Politecnico in nero. I contorni sono tracciati per un deposito spesso 5 mm, allo scopo di non inglobare gli elementi rappresentativi della ghiaia ($D_{max} = 4$ mm) proiettati all'esterno del deposito principale. Sezione longitudinale del deposito reale (rosso) e dei depositi risultanti modellazioni, secondo l'asse AA.

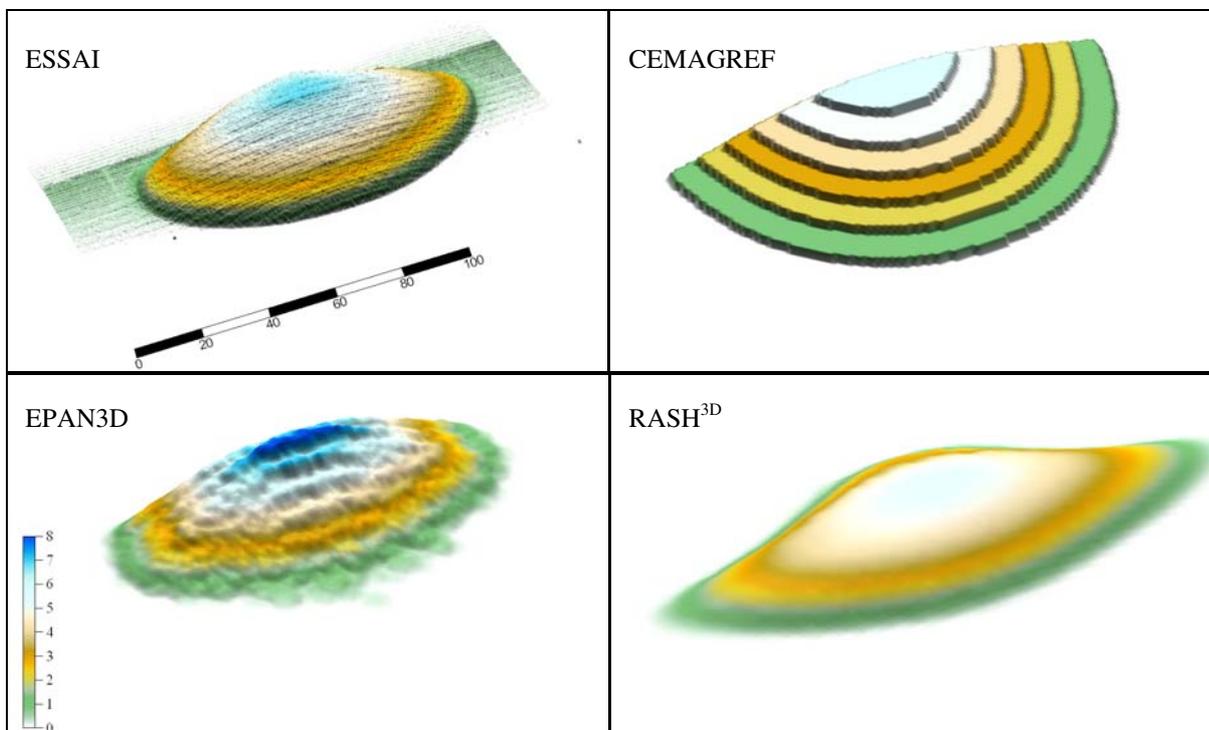


Fig. 5. Immagine 3D del deposito osservato e dei depositi risultanti da modellazioni dai 3 partner.

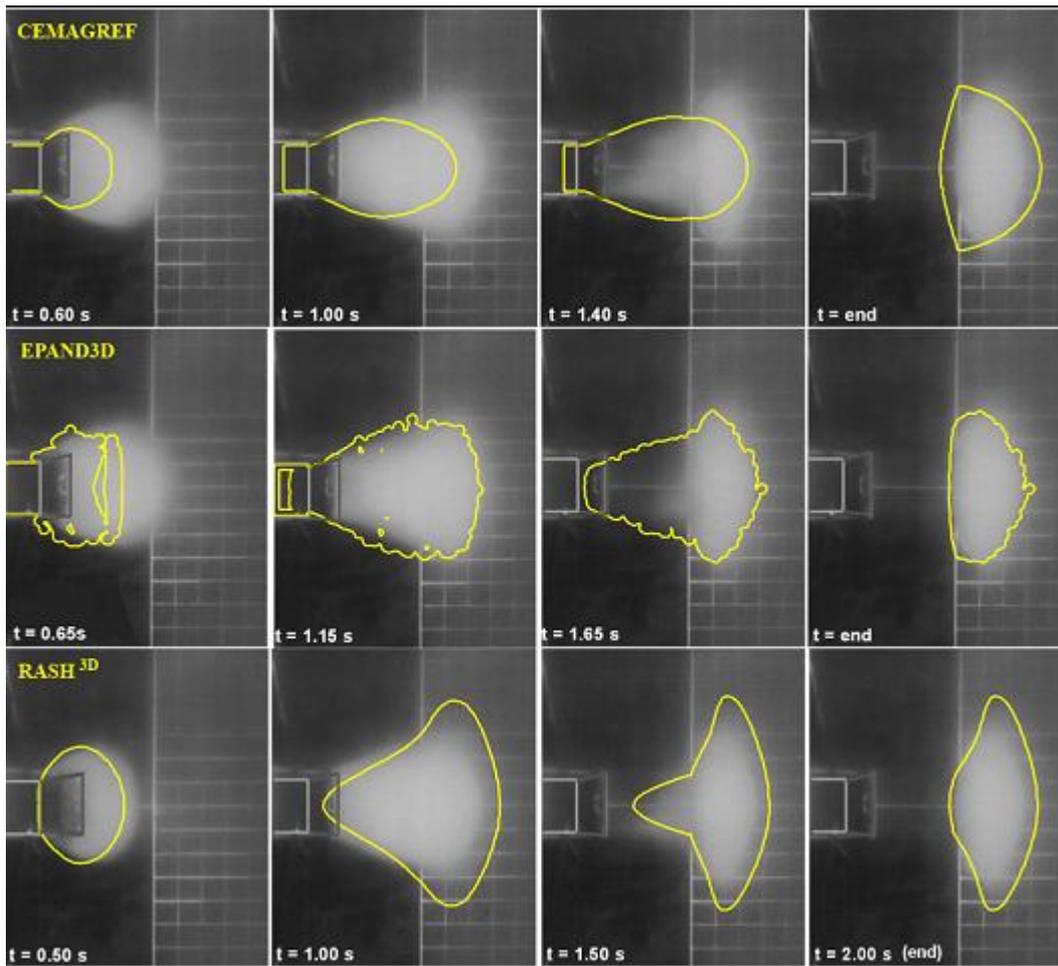


Fig. 6. Raffronto della propagazione della massa, così come osservata in laboratorio (immagini sullo sfondo) e modellata dai tre programmi di calcolo. Il contorno in giallo è relativo ad uno spessore di 1 mm.

La tabella qui riportata raffronta qualitativamente le previsioni delle tre modellazioni digitali con le osservazioni avanzate durante la prova fisica. I simboli +, +/- e - corrispondono rispettivamente a un buono, medio, imperfetto adeguamento, rispetto ad ogni singolo item indicato in cima a ciascuna colonna.

	Modello		Propagazione		Dimensione del deposito			Morfologia del deposito		
			Runout	Velocità	Estensione longitudinale	Estensione laterale	Altezza	Forma generale	Fronte ant.	Fronte post.
Cemagref	'frictional'	Senza calaggio	+/-	-	-	+/-	+/-	-	-	-
EPAN3D	11 parametri	Back analysis	+	-	+	+	+	+	+/-	+
RASH^{3D}	'frictional'	Back analysis	+/-	+	+/-	-	+/-	-	+/-	-

Ancorché distanti rispetto alle osservazioni formulate sull'estensione e la morfologia del deposito di ghiaia, i risultati ottenuti dal Cemagref risultano assolutamente pertinenti in termini di distanza raggiunta (runout), se si tiene presente che non si è proceduto a nessun calaggio dei parametri. Rispetto alla predizioni avanzate dagli altri partner, i risultati ottenuti dal modello EPAN3D risultano i migliori, ma derivano da una back analysis della prova e dal calaggio di almeno 11 parametri, di cui alcuni privi di significato fisico. Il calcolo effettuato da RASH^{3D} riproduce bene la velocità di propagazione dei fronti anteriore e posteriore della massa, ma non altrettanto bene il deposito, in posizione trasversale soprattutto. Inoltre, gli angoli di attrito scelti sono distanti dai valori sperimentali.

Dato che la base di questo lavoro di raffronto con i codici di calcolo è un solo rilascio, è indispensabile relativizzare le ipotesi formulate in questa sede. Soltanto un raffronto delle predizioni numeriche per diverse configurazioni di laboratorio (volume, altezza, pendio) consentirebbe di valutare l'adeguatezza tra modelli di calcolo e modellazione fisica.

4 Modellazione numerica delle frane documentate

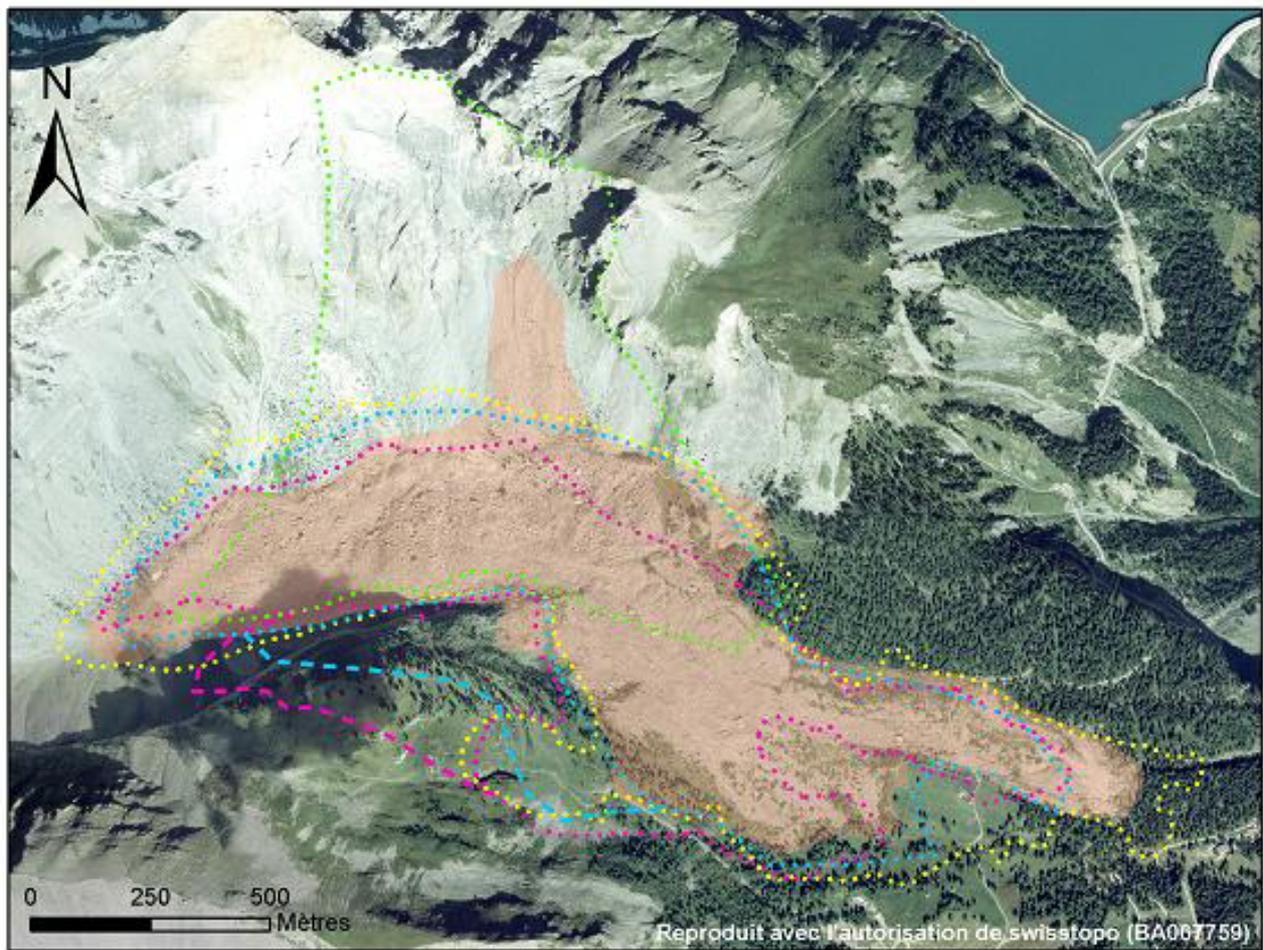
In questa sezione, i partner hanno impiegato il loro metodo di simulazione digitale per riprodurre eventi franosi già noti. Si tratta di un processo di calaggio (“back analysis”) e non di modellazioni predittive “alla cieca” poiché i partner, per calare il loro modello, disponevano delle informazioni qui riportate:

- Descrizione: geologia, volume
- Modelli digitali del suolo (DTM) prima e dopo la frana.

4.1 Six des Eaux Froides

Descrizione del sito:

- Nome del sito, dipartimento, paese	:	Six des Eaux Froides, Vallese, Svizzera
- Data dell'evento	:	30 maggio 1946
- Fattore di innesco	:	sisma
- Litologia	:	calcare e marna
- Volume di partenza	:	5.8 mio m ³
- Volume del deposito	:	9 mio m ³
- Distanza orizzontale massima di propagazione	:	2.1 km



Principali parametri di simulazione (specifici per ogni modello):

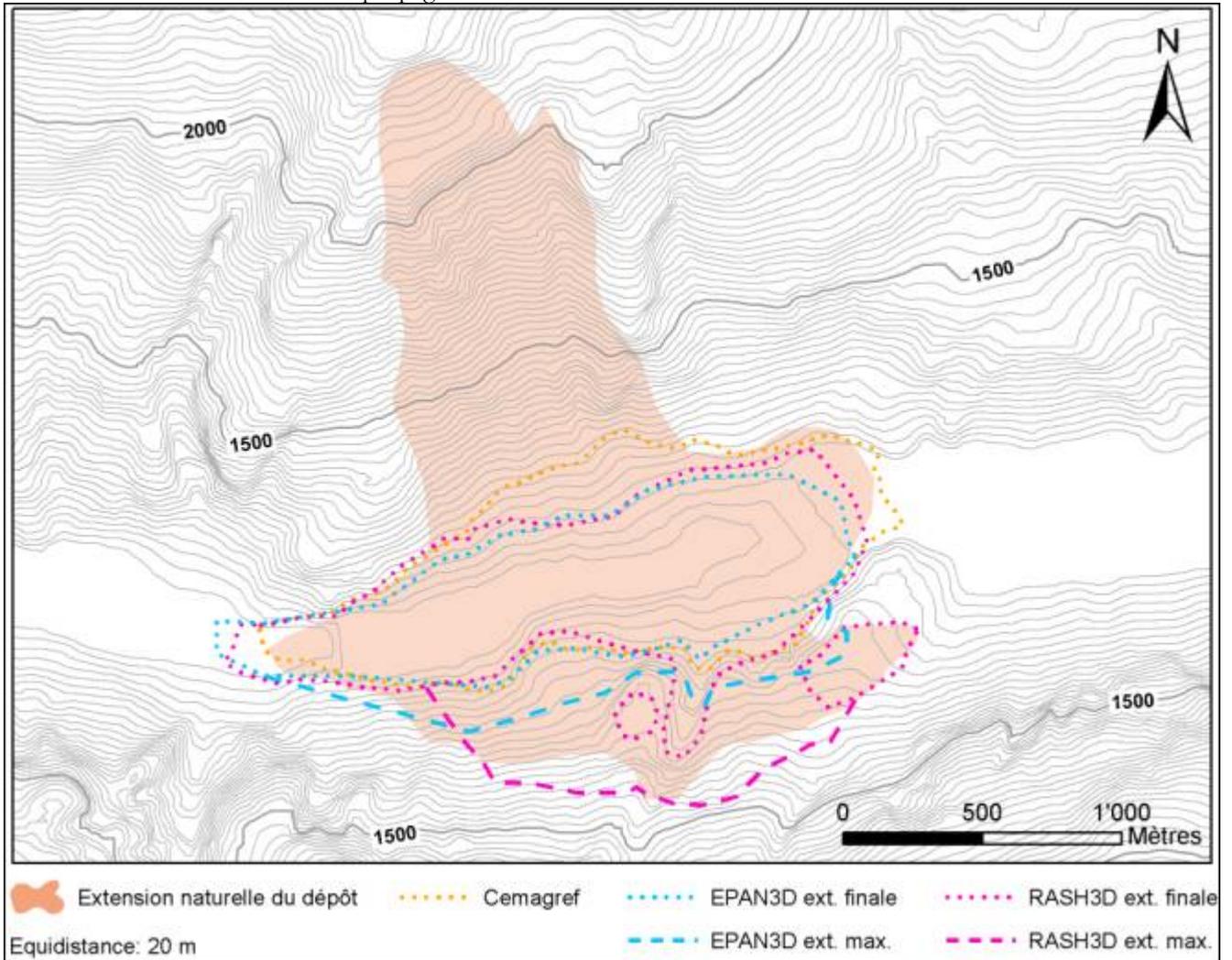
▪ Cemagref :	coefficiente di attrito statico	:	$\mu = 0.22$
▪ EBMAS:	pendenza limite di deposito	:	26.2°
▪ EPAN3D:	peso di volume iniziale della roccia	:	$\gamma = 24,5 \text{ [kN/m}^3\text{]}$
	parametri di attrito	:	$\phi_0 = 10^\circ ; \phi_1 = 27^\circ$

- | | | |
|------------|---|--------------------------------------|
| | velocità caratteristiche | : $v_0 = 5$ [m/s] ; $v_1 = 50$ [m/s] |
| | distanza caratteristica di propagazione | : $s_0 = 50$ [m] |
| | coefficienti di dilatazione e di "éclatement" | : $r_f = 0.25$; $r_e = -0.96$ |
| ▪ DAN : | angolo di attrito alla base della massa | : $\varphi = 17^\circ$ |
| | angolo di attrito interno del materiale | : $\phi = 35^\circ$ |
| ▪ RASH3D : | angolo di attrito alla base della massa | : $\varphi = 17^\circ$ |

4.2 Val Pola

Descrizione del sito:

- | | |
|--|--------------------------------|
| - Nome del sito, paese | : Val Pola, Italia |
| - Data dell'evento | : 28 luglio 1987 |
| - Fattore di innesco | : temporale |
| - Litologia | : diorite, gabbro e paragneiss |
| - Volume di partenza | : 30 mio m ³ |
| - Volume del deposito | : 40 mio m ³ |
| - Distanza orizzontale massima di propagazione | : 2.4 km |



Principali parametri di simulazione (specifici per ogni modello):

- | | | |
|----------|---|--|
| Cemagref | : coefficiente di attrito statico | : $\mu = 0.4$ |
| EBMAS | : pendenza limite di deposito | : 23° |
| EPAN3D | : peso di volume iniziale della roccia | : $\gamma = 24,5$ [kN/m ³] |
| | parametri di attrito | : $\phi_0 = 8^\circ$; $\phi_1 = 30^\circ$ |
| | velocità caratteristiche | : $v_0 = 7.55$ [m/s] ; $v_1 = 37.5$ [m/s] |
| | distanza caratteristica di propagazione | : $s_0 = 100$ [m] |

	coefficienti di dilatazione e di “éclatement”	: $r_f = 0.25$; $r_c = -0.90$
DAN	: angolo di attrito alla base della massa	: $\varphi = 18^\circ$
	angolo di attrito interno del materiale	: $\phi = 35^\circ$
RASH ^{3D}	: angolo di attrito alla base della massa	: $\varphi = 18^\circ$

5 Discussione e conclusioni

La simulazione numerica delle valanghe di roccia è, e resterà ancora a lungo, una sfida molto difficile da raccogliere. I lavori realizzati nell’ambito dell’azione C del progetto Rockslidetec indicano che gli attuali modelli non possono ancora essere impiegati come strumento di prevenzione, il che resta comunque l’obiettivo principale del loro sviluppo. I risultati ottenuti, tuttavia, sono di grande interesse, in quanto consentono d’individuare i problemi e di intravedere le strade da intraprendere per il prosieguo della ricerca. Tra i problemi incontrati, occorre rilevare la grande difficoltà a reperire casi sufficientemente documentati ed i limiti di applicazione dei modelli in funzione della modalità di rappresentazione scelta.

L’acquisizione dei dati: le simulazioni possono essere realizzate soltanto qualora si conosca la topografia del sito prima e dopo l’evento, che esso sia passato (back analysis) o potenziale. I casi di valanghe di roccia censiti per i quali si conosce la topografia del sito prima dell’evento sono poco numerosi, il che limita il numero di siti che possono essere studiati. Nell’ambito della predizione, mancano soprattutto i dati geologici ed i dati strutturali. Infine, si è potuto constatare che i modelli digitali del suolo (D’TM) ad alta risoluzione coprono solo raramente i siti oggetto di studio.

I limiti d’applicazione dei modelli: un fatto importante rilevato nel corso del progetto è l’influenza del volume dell’instabilità. A partire da quale volume è possibile una valanga di roccia? In altre parole, a partire da quando bisogna passare da un modello in ambiente “discreto” ad un modello in ambiente “continuo”? I test eseguiti presso l’EPFL nonché l’applicazione di svariati software di simulazione hanno dimostrato che non bisogna assolutamente limitarsi alla stima del volume degli eventi, ma che la granulometria è altrettanto cruciale. È stato interessante rilevare che il numero di elementi rappresentativi della ghiaia utilizzata nei test fisici rientra nello stesso ordine di grandezza del volume della frana del Six des Eaux Froides diviso per la dimensione media dei blocchi. Semplice coincidenza? In ogni caso, il raffronto dei depositi indica similitudini degne di nota, mentre questo non accade per i test effettuati con la sabbia di Hostun, dove la dimensione degli elementi rappresentativi è molto più piccola. Nel dibattito tra l’approccio “discreto” o “continuo”, pare che la soglia non sia stabilita soltanto in funzione del volume, ma anche in funzione del rapporto tra volume e granulometria media.

Cosa fare per migliorare i modelli esistenti? L’esperienza acquisita grazie al progetto Rockslidetec indica che è essenziale moltiplicare il numero di back analysis per calare meglio i programmi di simulazione e controllare meglio i parametri. In seguito al numero relativamente limitato di siti sufficientemente documentati, il raffronto tra modelli digitali ed i risultati dei test fisici in laboratorio, come realizzato presso l’EPFL ed il Cemagref, sembra una strada particolarmente promettente.

La simulazione delle valanghe di roccia è per ora solo in fase embrionale, ma i risultati ottenuti nell’ambito del progetto Rockslidetec sono incoraggianti. È essenziale continuare la collaborazione e la discussione costruttiva tra i partner del progetto.

Azione D: Azioni di promozione e comunicazione

1 Workshop Rockslidetec – 1° dicembre 2004

A conclusione del secondo anno di attività, il 1 dicembre 2004, si è svolto ad Aosta, un primo workshop rivolto a tecnici, personalità scientifiche e amministratori del territorio, con la partecipazione di esperti di fama internazionale.

Obiettivi del workshop

1. Stato dell'arte, per quanto non esauriente, relativamente :
 - a) alla definizione di volumi instabili mediante modellazione geometrica e del comportamento meccanico degli ammassi di roccia;
 - b) alla modellazione della propagazione delle frane rocciose;
2. Sintesi azione A (approntamento di una BD frane);
3. Valutazione dello stato d'avanzamento dei lavori condotti nell'ambito delle azioni B e C di Rockslidetec e dell'applicabilità dei metodi sviluppati; individuazione dei problemi scientifici e dei programmi esistenti per risolvere i problemi sollevati;
4. Coordinamento delle modellazioni digitali e fisiche per valorizzare gli apporti di queste ultime.

Sono intervenuti

CERISE Alberto	Regione autonoma Valle d'Aosta– Aosta, I
PASQUALOTTO Massimo	Regione autonoma Valle d'Aosta– Aosta, I
ROUILLER Jean-Daniel	CREALP - Centre de Recherche sur l'Environnement –Sion, CH
LEROI Eric	URBATER – Urbanisme-Aménagement du Territoire-Evaluation des Risques, Roquevaire - F

Relatori scientifici

DERSHOWITZ Bill	Golder Associates - Washington , USA
FERRERO Anna Maria	Università di Parma - Parma, I
HARRISON John	Imperial College of London - Londres, UK
HUNGR Oldrich	University of British Columbia – Vancouver, CAN
HUTTER Kolumban	Institut fur mechanik, Technische Universitat – Darmstadt, D
LABIOUSE Vincent	EPFL-ENAC-ICARE-LMR – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - LausanneCH
MANZELLA Irene	EPFL-ENAC-ICARE-LMR – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Lausanne, CH
MAYORAZ Raphaël	CREALP - Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin - Sion, CH
NAAIM Mohamed	CEMAGREF – Unité de Recherche ETNA - Grenoble, F
PASTOR Manuel	ETS de Ingenieros de Caminos, UPM – Madrid, E
PIRULLI Marina	Politecnico di Torino – Torino, I
SCAVIA Claudio	Politecnico di Torino – Torino, I
VOYAT Iris	Politecnico di Torino – Torino, I

2 Workshop conclusivo del progetto Rockslidetec – Aosta 13 aprile 2006

Un secondo workshop, a conclusione del progetto, si è svolto ad Aosta il 13 aprile 2006. Si riporta di seguito il documento di sintesi redatto dal moderatore

2.1 Objectifs du workshop

Les objectifs du workshop qui s'est tenu à Aoste le 13 avril 2006 étaient les suivants :

- Réaliser une synthèse finale et présenter les travaux menés dans le cadre du projet Rockslidetec ;
- Mettre en contact les techniciens et les utilisateurs afin de vérifier l'adéquation entre l'offre et la demande, et le cas échéant, afin d'évaluer le travail à réaliser pour répondre aux besoins ;

- Identifier, en complément du point précédent, les besoins non satisfaits et les problèmes scientifiques non résolus, les hiérarchiser pour définir les axes de collaboration futurs.

Ce workshop fait suite à un workshop organisé en 2004 avec la participation d'experts internationaux (O. Hungr, M. Pastor, K. Hutter, B. Dershowitz, J. Harrisson), et dont la vocation était plus scientifique.

2.2 Organisation

Le workshop était organisé en trois temps :

- présentation par chacune des équipes du projet des résultats acquis, des incertitudes et des besoins ;
- mise en place d'un débat entre les scientifiques et les utilisateurs ; il s'agissait d'une part d'engager un débat scientifique sur chacune des actions du projet, mais d'autre part d'ouvrir la discussion aux applications opérationnelles avales ;
- positionnement du projet et des résultats dans la problématique générale de la gestion des risques et de la prise en compte des risques dans l'aménagement du territoire, et définition des perspectives.

Introduit par Monsieur A. Cerise, Assesseur au Territoire, à l'Environnement et aux Ouvrages Publics, qui a rappelé l'importance de ces travaux et le lien étroit avec l'urbanisme et le développement, puis par Monsieur M. Pasqualotto, chef de file du projet, Directeur de la Protection du Territoire, qui a présenté les différents partenaires et actions du projet, le workshop a permis d'engager un débat animé avec de nombreuses réactions ; il a sur ce point totalement répondu aux attentes des organisateurs.

Afin d'ouvrir l'analyse aux applications opérationnelles, deux présentations complémentaires réalisées par des professionnels externes se sont tenues sur le module B (modélisation géométrique et détermination des volumes instables).

Concernant le module C (étude et modélisation de la propagation), un questionnaire avait été envoyé préalablement au workshop, à l'ensemble des partenaires, afin de disposer d'informations complémentaires et comparatives sur les modélisations ; les points suivants étaient abordés :

- cadrage : propriétaire, concepteur, caractéristiques de dissémination et de mise à disposition ;
- description du logiciel : type de modélisation, lois et paramètres d'entrée, paramètres de sortie, données nécessaires, méthodes de calage utilisées, possibilité ou non d'une utilisation prospective, temps de modélisation, limites du logiciels, modèles équivalents, perspectives de développement.

L'analyse des réponses a permis d'alimenter le débat tant sur les résultats scientifiques que sur l'adéquation aux besoins des utilisateurs et des gestionnaires des risques.

2.3 Analyse et synthèse des résultats

Action A : constitution d'un catalogue des principaux éboulements

Il s'agit d'une nouvelle base de données dans un domaine qui en est déjà largement pourvu ; ses spécificités et son organisation informatique devraient lui garantir une pérennité, sous réserve qu'une structure porteuse opérationnelle en assure la maintenance et l'administration, au-delà d'une utilité de principe qui devrait lui être reconnue dans le cadre projet Interreg PRINAT.

Les évolutions envisagées à terme, notamment le passage sous Internet, poseront les questions classiques auxquelles les bases de données sont confrontées, notamment :

- qui contrôle et valide les informations acquises, que ce soit sur le contenu ou sur la redondance des événements ?
- quelle protection de la base par rapport à des accès Internet ?
- y a-t'il des limitations dans les accès aux informations ?

Avec 38 tables et 305 champs, le choix s'est porté vers l'exhaustivité des données. Pour autant, les champs et les informations sont-ils en adéquation avec les besoins des scientifiques pour les modélisations, qu'il s'agisse de la morphologie, de l'état de fracturation, de la lithologie ou des caractéristiques géotechniques.

Pour ce qui est de l'exploitation statistique de la base afin de fournir, à terme, des lois « fréquence » associées aux différents types de mouvements répertoriés, la difficulté réside, au-delà de la masse critique d'informations à recueillir, dans la capacité à définir des typologies discriminantes et des conditions similaires de rupture et de propagation. Quand bien même serait-on capable de définir des séries typologiques similaires, la question de leur stabilité temporelle sera posée, et avec elle l'approche quantitative du risque mouvements de terrain.

Quoi qu'il en soit, cette base de données représente une première étape structurée vers une démarche intégrée de prévention des risques de mouvements en grande masse. Sa maintenance doit être définie dans le cadre d'une coopération transfrontalière large, en abordant les ressources financières nécessaires et son exploitation opérationnelle.

Action B : modélisation géométrique et détermination des volumes instables

Cette action n'a été réalisée que par une seule personne dans le cadre du projet ; la synthèse qui en a été faite représente toutefois une structuration claire et complète de la problématique. Il s'agit incontestablement d'un domaine d'innovation fort du projet Rockslidetec, avec des perspectives intéressantes sur le plan opérationnel.

Les présentations externes témoignent de l'intérêt des outils utilisés, qu'il s'agisse de la modélisation détaillée de l'état de surface, de la détermination des discontinuités en surface, ou de la stabilité des massifs rocheux. Si les outils d'acquisition de données (laser) restent onéreux, donc peu diffusés, l'exploitation des données est désormais relativement bien maîtrisée.

Quelques verrous scientifiques demeurent dans la chaîne complète, depuis la modélisation géométrique jusqu'à la détermination de l'état d'instabilité voire le déclenchement du mouvement en masse :

- si les informations surfaciques sont connues avec une précision importante, l'extrapolation au sein du massif reste sujette à caution ; quelles méthodes complémentaires utiliser pour garantir une pertinence des masses instables calculées et de leur granulométrie ;
- au-delà de la connaissance géométrique des discontinuités et des modélisations de type Resoblock, comment évaluer l'état de stabilité réelle en intégrant des informations sur les ponts rocheux et les circulations des fluides ?

S'il est indéniable que la résolution des informations permet d'appréhender avec beaucoup plus de précision l'état de surface des massifs rocheux (une telle précision est-elle d'ailleurs nécessaire pour des mouvements en grande masse ?), elle permet également de réaliser un suivi temporel de ces massifs et donc de mettre en œuvre des moyens de surveillance permettant d'accéder à un champ continu (dans l'espace) des déplacements et des déformations.

Beaucoup reste à faire dans ce domaine pour valoriser une information importante et de qualité. Différentes applications opérationnelles ont déjà été développées, mais le lien avec la modélisation de la propagation reste à consolider, non seulement pour l'évaluation de la masse potentiellement mobilisable, mais pour le déclenchement de la rupture, et pour la détermination de la granulométrie attendue.

Action C : Etude et modélisation de la propagation

Le projet Rockslidetec présentait l'intérêt d'offrir une palette de modélisation très large, comme ont pu en témoigner les présentations lors du workshop : entre la modélisation expérimentale et la modélisation numérique bien sûr, mais également au sein de la modélisation numérique même, depuis les approches fortement théoriques jusqu'aux approches plus pragmatiques et proches du terrain. Rares toutefois sont les modélisations qui se sont fortement appuyées sur les conditions spécifiques de site en terme de géologie, fracturation et connaissance de l'histoire du mouvement.

Comme cela a été rappelé dans le rapport final, et au cours de la présentation de synthèse, beaucoup reste à faire pour disposer d'une modélisation prospective opérationnelle. Les étapes franchies dans le cadre du projet Rockslidetec sont importantes, et la bonne adéquation avec la modélisation expérimentale le montre. Quelques points particuliers méritent d'être rappelés :

- Qu'en est-il de l'efficacité des modélisations dans le cadre d'une démarche prospective ; peu de résultats ont été fournis en la matière ;
- Si l'on excepte les résultats obtenus en modélisation expérimentale sur la granulométrie, les diverses modélisations, faute de temps et d'échanges suffisants, n'ont pas permis de définir des « lois » génériques ou des caractéristiques spécifiques des éboulements, qui permettraient d'engager une approche prospective ;
- Aucune incertitude ou calcul d'erreur ne sont fournis dans les estimations des distances de propagation ; pas plus que des probabilités. Or de telles informations permettraient d'aborder le risque sur la base d'une approche quantitative avec des critères d'acceptabilité ; les incidences sur les zonages, les moyens de protection et les ressources financières à mobiliser sont pourtant majeures.
- Les évaluations des temps nécessaires à une modélisation opérationnelle restent très largement sous estimées par les modélisateurs, et témoignent d'une interaction insuffisante avec la modélisation géométrique des volumes instables et avec sa caractérisation lithologique et structurale.

De nombreux verrous scientifiques demeurent pour aboutir à une modélisation prospective, parmi lesquels on peut citer la détermination du déclenchement de l'instabilité, et les changements de lois de comportement au cours de la propagation, ...

Les présentations, ainsi que les débats qui ont suivi, ont clairement exposé le travail réalisé, avec un échange certes encore insuffisant entre les différentes modélisations, mais avec la mise en place d'un socle commun de travail et d'analyse qu'il conviendra de pérenniser.

La modélisation expérimentale a permis de faire un lien avec l'ensemble des modélisations, encore doit-elle prouver tout son apport pour la mise à disposition d'information de base sur les caractéristiques à intégrer a priori dans les modélisations numériques, et ce à des fins prospectives.

Analyse globale des résultats

Au-delà des résultats obtenus au niveau de chacune des actions et qui constituent l'acquis majeur de ce projet, il faut souligner l'insuffisance d'interactions entre les différents modules ; pour ne souligner que deux points significatifs :

- les informations stockées dans la base de données sont-elles pertinentes et utilisables pour la modélisation ?
- quel lien entre la caractérisation géométrique de la falaise et les caractéristiques de modélisation de la propagation, en terme de volume et de granulométrie notamment ?

Le projet était ambitieux, et il a permis, au-delà des résultats spécifiques de chaque action, de poser les bases d'une structure commune d'analyse et de modélisation de la propagation en grande masse des éboulements. L'organisation mise en place doit désormais être consolidée pour aboutir à une modélisation, si ce n'est totalement, du moins partiellement prospective, et définir, sur la base d'un cahier des charges rigoureux, un mode opératoire commun afin de déterminer les champs de pertinence des modèles présentés, à l'instar de l'inventaire réalisé sur les modélisations expérimentales.

Par ailleurs, la modélisation doit constamment conserver comme ligne directrice les attentes et les besoins tant de la société que des gestionnaires des risques. Face à une société qui demande de plus en plus des comptes, y compris sur le plan de la responsabilité, et qui souhaite des investissements publics si ce n'est rentabilisés, tout au moins optimisés, les modélisations doivent être en mesure d'apporter des résultats dans le cadre d'une approche globale de gestion (prévention et réduction) des risques naturels ; elles doivent notamment associer les résultats à des probabilités de survenance (temporelles) et spatiales afin que les décisions soient prises sur la base de critères quantifiés de risque acceptable.

2.4 Perspectives et propositions

Sur la base du travail important réalisé dans le cadre du projet Rockslidetec et des résultats présentés lors du workshop du 13 avril 2006 à Aoste, plusieurs éléments peuvent être rappelés pour commencer à structurer un programme Interreg qui permettra de valoriser les acquis :

- les investissements importants qui ont été consentis pour mettre en place une collaboration fructueuse sur un thème complexe et difficile, doivent être reconduits voire pérennisés ; il convient toutefois d'ouvrir cette collaboration, afin de l'enrichir, et de bénéficier d'expériences et de compétences avancées sur le sujet ;
- le prochain programme devra mettre l'accent sur les liens entre les trois modules afin de disposer d'une chaîne d'analyse et de traitement intégrée ; les liens avec les programmes en cours sur des thématiques complémentaires (surveillance, calcul de stabilité, déclenchement des instabilités, caractérisation des discontinuités à l'intérieur des massifs rocheux) devront être renforcés, ou à défaut, les thématiques pourront être intégrées au nouveau programme ;
- un protocole rigoureux de la modélisation devra être mis en place suivant une logique de « blind test », l'objectif n'étant pas d'exclure des modèles, mais de leur associer des domaines de pertinences au regard des typologies et des conditions de site rencontrées ;
- les questions touchant à l'évaluation quantitative du risque devront être associées à la modélisation scientifique et technique, non seulement pour faire le lien entre les modélisateurs et les gestionnaires des risques, mais pour faire le lien essentiel entre le calcul et la prise de décision, c'est-à-dire pour assurer la transcription de l'incertitude scientifique en choix opérationnel et politique, sur la base d'une prise de responsabilité.

3 Rapporto finale

È stato stampato un rapporto finale sui risultati ottenuti.

È disponibile inoltre un CD che raccoglie tutti i documenti prodotti dai partner nell'ambito del progetto.

Per informazioni sul progetto o sul CD consultare i seguenti siti internet :

www.regione.vda.it

www.crealp.ch

www.fondazionemontagnasicura.org

www.risknat.org