

Progetto n°165 PROVIALP
PROTEZIONE DELLA VIABILITÀ ALPINA
relazione finale

Projet n°165 PROVIALP
PROTECTION DE LA VIABILITÉ ALPINE
rapport final

Interreg IIIa 2000-2006 Alpi Latine Cooperazione Transfrontaliera Italia-Francia
Progetto n. 165 PROVIALP, Protezione della viabilità alpina - Relazione finale
Interreg IIIa 2000-2006 Alpes Latines Coopération Transfrontalière France-Italie
Projet n. 165 PROVIALP, Protection de la viabilité alpine - Rapport final

Autori

Arpa Piemonte - Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche, Torino, Italia
Cemagref, Grenoble, Francia
Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Italia
Consorzio Forestale Alta Valle di Susa, Oulx (To), Italia
S.I.R. s.r.l.

Fotografia di copertina

Briga Alta (CN), SP 154 in località Gola delle Fascette

Fotografie archivio Arpa Piemonte, Cemagref, Politecnico Torino, Consorzio Forestale Alta Valle di Susa

Coordinamento redazionale

Daniele Bormioli, Giuseppina Moletta, Carlo Troisi, Arpa Piemonte

Coordinamento editoriale

Elisa Bianchi, Paola Bianchi, Arpa Piemonte

Ideazione e progetto grafico

Chroma, Torino

Finito di stampare nel mese di ottobre 2008 presso la tipografia

Litografia Viscardi, Alessandria

Stampato su carta riciclata al 100% che ha ottenuto il marchio di qualità ecologica Ecolabel Europeo



ISBN 978-88-7479-070-8

Copyright © 2008, Arpa Piemonte
Via Pio VII, 9 – 10135 Torino – Italia
www.arpa.piemonte.it

L'Arpa Piemonte non è responsabile per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo documento.
La riproduzione è autorizzata citando la fonte.

PRESENTAZIONE

Per molto tempo con il termine “ambiente” si è indicato il risultato di una serie di processi essenzialmente naturali, considerati all'origine di tutto ciò che è intorno a noi. Non a caso il termine deriva dal latino “ambire” (ossia circondare, stare intorno): è implicito anche un senso di centralità dell'uomo, visto non come parte integrante della biosfera ma quale componente esterna, capace di plasmare, gestire un “ambiente” creato appositamente per la sua crescita materiale in virtù delle superiori doti intellettive di cui è dotato. Tale visione antropocentrica può rivelarsi pericolosa nella nostra società in cui i bisogni connessi alla crescita demografica e l'utilizzo di tecnologie dal forte impatto possono alterare profondamente l'ambiente. Gli effetti provocati da una gestione inadeguata delle risorse naturali e dei territori, soprattutto nell'ultimo secolo, e le stime relative ai profondi cambiamenti complessivi hanno generato una sorta di “rivoluzione copernicana” relativa al concetto di ambiente. L'ambiente di fatto è dato dalla profonda e continua interazione tra componenti naturali ed antropiche: in ogni territorio si sovrappongono visibilmente le trasformazioni determinatesi nei “tempi brevi” della storia e le modificazioni verificatesi nei “tempi lunghi” della natura fino a formare un *unicum* organico ed inscindibile.

Attualmente è impossibile e per giunta anacronistico parlare di “ambiente” senza considerare la presenza umana in quanto ogni area del pianeta ne risente direttamente o indirettamente. Natura e cultura costituiscono, quindi, un insieme integrato e retroagente: ogni azione dell'uno determina un *feedback* dell'altro in base alla quale si determineranno nuove scelte e nuovi comportamenti.

Il nuovo approccio al problema ambiente, la nuova accezione che tale termine ha acquisito ha rilanciato e valorizzato il ruolo fondamentale che le Scienze della Terra (geologia, geotecnica, meteorologia, idrologia, sismica, previsione e prevenzione rischi naturali...) rappresentano nell'ambito della protezione dalle calamità naturali e nella tutela ambientale. La conoscenza fisica e geologica del territorio, nelle sue espressioni superficiali e sotterranee, è una condizione essenziale per la sopravvivenza dell'uomo, dei suoi insediamenti, delle sue attività e delle altre forme di vita organizzate negli ecosistemi. Essa rappresenta, per un paese industrializzato e densamente abitato come l'Italia, un requisito indispensabile per qualsiasi forma di programmazione territoriale. Non è pensabile prevenire o mitigare i rischi naturali da un lato ed utilizzare, in modo efficiente e responsabile, le risorse dall'altro, prescindendo da tali conoscenze.

La valutazione e la prevenzione dei rischi inerenti i fenomeni naturali è uno degli obiettivi principali che è stato perseguito negli ultimi anni dalla comunità scientifica e da coloro che, a vario titolo, si occupano della gestione dell'ambiente e del territorio. L'analisi storica sugli effetti conseguenti il cosiddetto “rischio idrogeologico” pone in evidenza come il numero di danni, in Italia e sull'intero arco alpino, sia in costante aumento, con notevole incremento a partire dal secondo dopoguerra. Ciò trova spiegazione da una parte nella maggiore disponibilità di fonti di informazione e di sensibilizzazione al problema, dall'altra nel consistente ampliamento delle aree urbanizzate od utilizzate per infrastrutture di varia natura a scapito di aree di naturale pertinenza dei processi di modellamento naturale del territorio. I danni derivanti dal dissesto idrogeologico si rivelano quindi molto spesso associati a scelte territoriali ed ambientali non compatibili e, in prospettiva, rischiano di crescere fortemente, provocando una continua e ripetuta distruzione di ricchezza, solo in parte rinnovabile, a fronte di costi e sforzi superiori a quelli che sarebbero necessari per intraprendere la strada della prevenzione e del riassetto.

Gli aspetti di cui sopra sono tanto più importanti in un ambiente quale quello alpino, che associa una elevata densità di fenomeni legati ai movimenti di versante ed alle attività dei corsi d'acqua ad un sempre maggiore utilizzo del territorio per fini insediativi, ricreativi o di transito tra il nostro paese ed i paesi del centro e nord-Europa.

Nell'affrontare il tema della mitigazione del rischio idrogeologico, è indispensabile una visione globale del problema, che deve prevedere il sinergico coinvolgimento di conoscenze e competenze multidisciplinari e che non può prescindere da un corretto approccio culturale. Da questo punto di vista i progetti Interreg, ponendo a confronto soggetti tecnici provenienti da varie amministrazioni e da vari istituti scientifici offrono una unica ed irrinunciabile occasione di fruttifero interscambio di conoscenze ed esperienze.

In tale ambito si inserisce il progetto Interreg IIIa Alcotra n. 165 PROVIALP, che ha visto la proficua collaborazione tra Arpa Piemonte ed il Cemagref di Grenoble per definire metodi di valutazione della pericolosità da caduta massi lungo le reti viarie alpine, un problema particolarmente gravoso e sentito in tutto l'ambito transfrontaliero. Tale progetto da un lato rappresenta solo uno dei molti esempi di collaborazione transfrontaliera che vede oramai confrontarsi da circa venti anni partner italiani, francesi e svizzeri per il perseguimento di interessi comuni e lo sviluppo di tecniche congiunte, dall'altra rappresenta a sua volta un importante punto di partenza per le nuove collaborazioni in corso di definizione per la nuova programmazione europea relativa ai progetti Interreg.

Silvano Ravera
Direttore Generale di Arpa Piemonte

INTRODUZIONE / INTRODUCTION	
1.1	Sommario del progetto / Sommaire du projet 10
1.2	Presentazione dei partecipanti / Présentation des partenaires 10
1.3	Quadro generale ed obiettivi / Cadre général et objectifs 12
1.4	Attività principali / Les principales activités 13
1.5	Coerenza con i programmi europei / Cohérence avec les programmes européens 15
1.6	Contenuti del DVD / Contenu du DVD 16
IL CONTRIBUTO DI ARPA PIEMONTE	
2.1	Generalità 22
2.1.1	Attività e sviluppo del progetto 22
2.1.2	Terminologia 23
2.1.3	Caratteri specifici degli studi sulla caduta massi 25
2.1.4	La franosità in Piemonte 32
2.1.5	Esperienze precedenti 34
2.2	Metodologia per la scelta delle aree di indagine 36
2.2.1	Analisi storica 36
2.2.2	Il programma Skyline 36
2.2.3	Analisi strutturale a piccola scala 37
2.3	Sviluppo della metodologia per la raccolta dati 40
2.3.1	Aspetti geometrici dei crolli 40
2.3.2	La metodologia 42
2.3.3	Caratterizzazione del pendio 45
2.3.4	Strumenti per la gestione della base dati 50
2.4	La metodologia meccanico-probabilistica 55
2.4.1	Introduzione 55
2.4.2	Il metodo dell'equilibrio limite 55
2.4.3	Il metodo di Monte Carlo 62
2.4.4	Descrizione dei codici di calcolo 62
2.5	Analisi di run out 67
2.5.1	Metodologia 67
2.5.2	Parametri di input 70
2.5.3	Risultati dell'analisi 72
2.6	Considerazioni sulla vulnerabilità connessa ai fenomeni di crollo lungo la viabilità alpina 74
2.6.1	Analisi delle conseguenze o del danno 75

2.7 Applicazione dello strumento ad alcuni siti campione	85
2.7.1 Valle Orco	86
2.7.2 Valle d'Ala di Lanzo	97
2.7.3 Valle Viù di Lanzo	109
2.7.4 Valle Susa	127
2.7.5 Valle Germanasca	136
2.7.6 Valle Tanaro	152
2.8 Il metodo dei coni	164
2.8.1 Descrizione del metodo	164
2.8.2 La funzione <i>viewshed</i>	164
2.8.3 Applicazione del metodo	165
2.8.4 Analisi svolte e risultati	166
2.8.5 Calcolo della pericolosità relativa	169
2.9 Analisi tramite LIDAR	172
2.9.1. Introduzione	172
2.9.2. Tecniche LIDAR	172
2.9.3. L'immagine solida	173
2.9.4 Applicazione del metodo	174
2.9.5 Elaborazione e risultati	175
2.9.6 Considerazioni conclusive	178
2.10 L'indagine PSInSAR™	179
2.10.1 La tecnica PSInSAR™	179
2.10.2 Applicabilità dell'analisi PSInSAR™ ai fenomeni di crollo	180
2.11 Conclusioni e discussione dei risultati	183
2.11.1 Fase di rilievo	184
2.11.2 Fase di distacco, calcolo della probabilità di rottura	186
2.11.3 Fase di <i>run out</i> , calcolo dell'indice di suscettibilità	188
2.12 Ingegneria naturalistica	191
2.12.1 Scopi e ambiti di azione	191
2.12.2 Tecniche di intervento	192
2.12.3 Ambiti di intervento delle opere di ingegneria naturalistica	194
2.12.4 Utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica per la protezione dalla caduta massi (Difesa dall'erosione,.....)	196
2.12.5 Utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica per la protezione dalla caduta massi (Ricostruzione strutturale dei versanti,.....)	202
2.12.6 Utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica per la protezione dalla caduta massi (Ricostruzione di versanti.....)	204
2.12.7 Approfondimenti: cantiere Gran Volta	205
2.12.8 Approfondimenti: cantiere Claviere	215
2.13 Caduta di massi in foresta e analisi dendrocronologica	218
2.13.1 Introduzione	218
2.13.2 Presentazione lavoro	218
2.13.3 Materiali e metodi	224

2.13.4	Analisi	224
2.13.5	Osservazioni	234
2.13.6	Conclusioni	234

2.14 Attività di formazione e divulgazione svolta con il Collegio delle Guide Alpine del Piemonte **236**

2.14.1	Generalità	236
2.14.2	Attività sviluppate nel corso del progetto	236
2.14.3	Attività di divulgazione delle Guide Alpine	237
2.14.4	Monitoraggio sentieri	239

LA CONTRIBUTION DU CEMAGREF

3.1 Contexte général **245**

3.1.1	Le risque de chutes de pierres et de blocs: définition et importance	248
3.1.2	Modèles et préventions des risques par l'affichage	256
3.1.3	Les objectifs des chapitres sur le génie biologique pare pierre de cet ouvrage	260

3.2 Principe de localisation du risque de chutes de pierres **262**

3.2.1	Le modèle de la ligne d'énergie	262
3.2.2	Les logiciels de trajectographie	265
3.2.3	Synthèse sur les avantages et limites des modèles	267
3.2.4	L'apport du LIDAR pour la modélisation des chutes de pierres et de blocs rocheux	268
3.2.5	Conclusions	269

3.3 Le génie biologique pare pierre **270**

3.3.1	Principales définitions et notion en sylviculture	270
3.3.2	Les principaux outils de description des peuplements forestiers	279
3.3.3	Etat de l'art sur les interactions peuplements forestier/chutes de pierres	288
3.3.4	Les outils de diagnostic de la protection offerte par les principaux types de peuplements forestiers	291
3.3.5	La cartographie des forêts à fonction de protection	311
3.3.6	La réalisation d'ouvrages de génie biologique avec les produits des coupes	329
3.3.7	Evaluation de la valeur économique de la protection par une forêt de protection	352

3.4 Présentation des études de cas **354**

3.4.1	Description général de la vallée de la Maurienne: de Saint Michel de Maurienne à Modane	354
3.4.2	Localisation de sites d'étude	355
3.4.3	Mise en place de placettes de références sur nos sites d'études de Murianette et du versant du Freney	355
3.4.4	Cartographie des zones de propagation maximale à grande échelle avec le principe de la ligne d'énergie	356
3.4.5	Le traitement des données LIDAR des sites de Murianette et du versant du Freney	357
3.4.6	Les résultats des travaux de simulations	367
3.4.7	Conclusions	370

CONCLUSIONI / CONCLUSIONS

4.1 Conclusioni e sviluppi futuri / Conclusions et perspectives **374**

INTRODUZIONE INTRODUCTION

1



Sommario del progetto
Sommaire du projet

Presentazione dei partecipanti
Présentation des partenaires

Quadro generale ed obiettivi
Cadre général et objectifs

Attività principali
Les principales activités

Coerenza con i programmi europei
Cohérence avec les programmes européens

Contenuti del DVD
Contenu du DVD

1 INTRODUZIONE

Carlo Troisi¹, Frédéric Berger²
¹Arpa Piemonte, ²Cemagref Grenoble

1.1 SOMMARIO DEL PROGETTO

Il progetto Interreg IIIa Alcotra n. 165 PROVIALP (protezione della viabilità alpina), approvato dal Comitato di programmazione del Programma di cooperazione transfrontaliera Interreg IIIa nel corso della riunione del 19 maggio 2005 a Saint Vincent (AO), ha avuto inizio il 22 giugno 2005 ed è terminato, a seguito di proroga richiesta all'Autorità di Gestione, il 22 dicembre 2007. Il progetto riguarda l'asse 2, misura 2.1 "Mobilità e sistema dei trasporti", tipologia d'azione B2-1 "Migliorare, integrare (...) e mettere in sicurezza le infrastrutture di trasporto (strade, linee ferroviarie, marittime e aeree) di interesse transfrontaliero".

L'esponenziale aumento della circolazione di merci e persone nell'area alpina ha messo in evidenza, negli ultimi anni, i problemi di varia natura connessi con l'adeguamento delle infrastrutture destinate ai trasporti.

Molti di tali problemi sono connessi con le peculiarità dell'ambiente alpino, che rende più problematici, o comunque più onerosi, gli interventi sulle infrastrutture stesse.

Tra gli altri, particolare rilievo rivestono i problemi legati alla sicurezza delle infrastrutture. In particolare nel caso delle vie di comunicazione alpina (primaria e secondaria) i principali problemi sono i fenomeni di crollo, come confermato dai dati storici e statistici relativi alla caduta massi sulle strade.

Gli enti gestori di infrastrutture stradali, i servizi che a vario titolo si occupano della prevenzione dei rischi naturali e della gestione delle foreste hanno spesso palesato la necessità di disporre di uno strumento di sintesi che faccia il punto sullo stato dell'arte circa le valutazioni relative ai fenomeni di caduta massi.

Il progetto PROVIALP risponde a tali richieste sviluppando metodologie di valutazione della pericolosità da caduta massi sulle reti viarie nell'ambiente alpino, affrontando tali problematiche sia dal punto di vista più propriamente geologico e strutturale (aspetti sviluppati essenzialmente da Arpa Piemonte) che dal punto di vista della protezione offerta dalla foresta (aspetti sviluppati essenzialmente dal Cemagref).

1.2 PRESENTAZIONE DEI PARTECIPANTI

Il progetto PROVIALP è stato sviluppato dal Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche di Arpa Piemonte, Torino (Italia) e dal Cemagref di Grenoble (Francia).

1 INTRODUCTION

Carlo Troisi¹, Frédéric Berger²
¹Arpa Piemonte, ²Cemagref Grenoble

1.1.SOMMAIRE DU PROJET

Le projet IIIa Alcotra n. 165 PROVIALP (protection de la viabilité alpine), approuvé par le Comité de programmation du programme de coopération transfrontalière Interreg IIIa lors de la réunion du 19 mai 2005 à Saint Vincent (AO), a démarré le 22 juin 2005 et s'est terminée, après une prorogation de 6 mois, le 22 décembre 2007. Le projet a pour cadre d'action l'axe 2, mesure 2.1 "mobilité et système des transports" typologie d'action B2-1 "améliorer, intégrer et sécuriser les infrastructures des transports d'intérêts transfrontaliers".

L'augmentation exponentielle de la circulation des marchandises et des personnes dans l'arc alpin fait ressortir, depuis plusieurs années, les différents problèmes liés à l'adaptation des infrastructures destinées aux transports. Parmi ces problèmes, plusieurs sont directement liés aux spécificités de l'environnement alpin qui rend les interventions, sur les infrastructures, plus difficiles ou plus onéreuses.

Les problèmes liés à la mise en sécurité des infrastructures sont de loin les plus importants. En particulier dans le cas des voies de communication alpine (primaire, secondaire, itinéraires de loisirs) les problèmes principaux sont générés par les éboulements rocheux; comme le confirme les données historiques et les statistiques relatives aux chutes de pierres et de blocs sur les routes.

Les gestionnaires des infrastructures de communication, les services en charge de la prévention des risques naturels et les gestionnaires forestiers ont émis le besoin de disposer d'un ouvrage de synthèse faisant le point sur l'état de l'art et les savoirs faire sur l'évaluation des risques de mouvement rocheux et leur prévention.

Le projet PROVIALP a répondu à cette demande en développant des méthodologies d'évaluation du risque de chute de blocs rocheux sur les voies de communication alpines; soit du point de vue géologique et structural (aspects développés essentiellement par Arpa Piemonte) soit du point de vue du rôle protecteur de la forêt (aspects développés essentiellement par le Cemagref).

1.2 PRÉSENTATION DES PARTENAIRES

Le projet PROVIALP a été proposé et réalisé par le *Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche*, (Centre régional pour le recherches territoriales et géologiques) Turin

Il Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche è una delle strutture Arpa Piemonte eredi dell'ultraventennale patrimonio di conoscenze maturate nel campo del rischio geologico dalla ex Direzione Regionale Servizi Tecnici di Prevenzione.

Le principali attività del Centro sono:

- gestione e sviluppo di sistemi e tecniche di controllo dell'instabilità dei versanti, analisi ed interpretazione delle risultanze ai fini della comprensione dei relativi meccanismi di innesco ed evoluzione;
- gestione di un insieme di banche dati a carattere geologico (frane, conoidi alluvionali, eventi alluvionali, sistemi di controllo sui movimenti franosi, sondaggi e geotecnica ecc.);
- realizzazione e gestione del Sistema Informativo Geografico di Arpa Piemonte; sviluppo di tecnologie e procedure dedicate alla gestione, elaborazione e alla diffusione di dati tematici georiferiti, nonché di modellistica numerica;
- preparazione e redazione dei rapporti annuali sullo stato dell'ambiente in Piemonte.

Le strutture del Centro hanno partecipato a circa 15 progetti Interreg, molti dei quali in ambito transfrontaliero e maturato stretti legami con organismi francesi ed elvetici che operano nel capo del rischio idrogeologico.

Il Cemagref è un Ente Pubblico francese a carattere Scientifico e Tecnico (EPST) dislocato sul territorio su base regionale. È un centro di ricerca finalizzato alla gestione del territorio e delle acque. Le attività di ricerca sono orientate verso le nuove conoscenze e le innovazioni tecniche che possano essere utilizzate da enti gestori, da decisori e da imprese per rispondere ad esigenze concrete legate alla gestione delle risorse e all'utilizzazione degli ambienti.

Il centro regionale di Grenoble sviluppa le proprie attività di ricerca nel campo della conoscenza e della prevenzione dei rischi naturali derivanti da movimenti gravitativi rapidi (come le valanghe ed i fenomeni di caduta massi), la conoscenza e la gestione degli ecosistemi forestali e degli ambienti rurali montani.

Il gruppo che ha partecipato al progetto PROVIALP appartiene all'unità che si occupa delle foreste di montagna; tema di ricerca sugli ecosistemi montani. Tale gruppo ha partecipato, dal 2000, a tre progetti Interreg.

Tali progetti hanno comportato ricerche per meglio comprendere l'influenza delle diverse coperture forestali sulla mitigazione nei confronti di valanghe e caduta massi ed hanno comportato: la quantificazione della protezione offerta dalle varie tipologie forestali; la definizione e la cartografia di settori di foresta con ruolo di protezione; la gerarchizzazione delle tipologie di popolamento

(Italia) et par le Cemagref de Grenoble (France).

Le Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche est une de structures de Arpa Piemonte qui a héritée de l'expérience et des savoir-faire de l'ex service géologique de la région du Piémont.

Les principales activités du Centre sont:

- gestion et développement de systèmes d'auscultation des mouvements de versants dans la région Piémont; interprétation des résultats pour la compréhension des mécanismes de déclenchement et d'évolution des éboulements;
- gestion de nombreuses bases de données géologiques (éboulements, cônes de déjections, crues, auscultation des mouvements de versant, géotechnique etc.);
- gestion et développement du Système d'Information Géographique de l'Arpa Piemonte; développement d'outils et de méthodologies pour la gestion, l'élaboration et la diffusion de données géoréférencées issues de travaux de télédétection et de modélisations numériques;
- rédaction du rapport annuel sur l'état de l'environnement en Piemonte.

Le Centre a participé à environ 15 projets Interreg et a développé de très forts liens d'échanges et de coopération avec des organismes français et suisses travaillant sur les risques géologiques.

Le Cemagref est un Etablissement Public français à caractère Scientifique et Technique (EPST) avec une implantation régionale sur le territoire français. C'est un centre de recherche finalisée sur la gestion des territoires et des eaux. Ses recherches sont orientées vers la production de connaissances nouvelles et d'innovations techniques utilisées par les gestionnaires, les décideurs et les entreprises pour répondre à des questions concrètes de société dans les domaines de la gestion des ressources, de l'aménagement et de l'utilisation de l'espace.

Le centre régional de Grenoble axe plus spécifiquement ses travaux de recherches finalisées sur la connaissance et la prévention des risques naturels de type mouvements gravitaires rapides (avalanches, chutes de pierres,...), la connaissance et la gestion des écosystèmes forestiers et des espaces à dominante rurale en zone de montagne.

C'est l'équipe forêt de montagne du thème de recherche sur les écosystèmes montagnards qui est le partenaire Cemagref du projet PROVIALP. Depuis l'année 2000, elle a participé à 3 projets Interreg. Ses recherches visent à mieux comprendre l'influence des différentes végétations forestières sur la mitigation

forestale in funzione della priorità degli interventi silviculturali da realizzare per migliorare e consolidare il ruolo protettivo.

Le principali attività del gruppo sono:

- valutazione e modellazione delle capacità di dissipazione da parte degli alberi e da parte delle opere di ingegneria naturalistica;
- l'introduzione degli effetti della copertura forestale nei modelli di simulazione balistica relativi alla caduta massi;
- la zonizzazione delle foreste di protezione;
- la redazione di modalità descrittive per i popolamenti;
- la redazione e la diffusione di guide di silvicoltura;
- la redazione e la diffusione di metodologie per lo sviluppo dei piani forestali nell'ambito dei più ampi piani di prevenzione dei rischi naturali prevedibili;
- la formazione dei tecnici forestali;
- il supporto alle politiche pubbliche per la gestione sostenibile dell'ambiente;
- redazione di rapporti specifici.

1.3 QUADRO GENERALE ED OBIETTIVI

Le problematiche connesse con i fenomeni di caduta massi sono gravi e rilevanti per l'intero sistema viario sull'area alpina. Le valutazioni di pericolosità e rischio (in senso generale) e gli interventi nei confronti di tale tipo di fenomeni sono condotti essenzialmente a posteriori, ovvero a seguito di un fenomeno franoso verificatosi. Tale approccio è, in linea di massima, sufficiente nei casi di vie di comunicazione storiche o a bassa densità di traffico. Nel caso di vie storiche in quanto si può ipotizzare che, nel tempo, si sia sostanzialmente intervenuti, in fasi successive, ovunque sussistano problemi di crollo; nel caso di basse densità di traffico in quanto diminuisce fortemente il rischio di coinvolgimento di mezzi o persone.

Di fronte allo sviluppo di nuove vie di comunicazione, all'adeguamento di quelle esistenti ed all'esponentiale aumento dei traffici e all'utilizzo a fini turistici degli itinerari escursionistici, l'approccio a posteriori presenta numerosi ed ovvi aspetti negativi:

- non evidenzia i problemi sino a che gli stessi non si siano palesati;
- l'aumento delle vie e del traffico aumenta statisticamente, e di molto, la probabilità che il fenomeno che ci segnala l'esistenza del problema causi danni e/o vittime;
- non permette valutazioni di pericolosità e rischio estese agli interi assi interessati;
- impedisce una corretta pianificazione degli interventi, non essendo nota a priori l'entità dei problemi;
- non permette di valorizzare i settori nei quali il ruolo di protezione da parte della foresta è efficace e arresta i fenomeni.

des chutes de blocs et des avalanches. Il s'agit à la fois de quantifier la protection offerte par les différents peuplements forestiers, de localiser les secteurs forestiers qui jouent un rôle de protection et les cartographier, de hiérarchiser les peuplements en fonction de l'urgence des interventions sylvicoles à réaliser pour pérenniser et améliorer ce rôle de protection. Elles sont menées principalement dans l'arc alpin et plus précisément en France, Italie, Suisse et Autriche.

Les principales activités de cette équipe sont:

- la connaissance et la modélisation de la capacité de dissipation d'énergie des arbres et des ouvrages de génie biologique pare risques;
- la prise en compte de l'action de la végétation forestière dans les logiciels de simulation trajectographique de chutes de pierres et de blocs rocheux;
- le zonage des forêts à fonction de protection;
- la réalisation de typologies de description des peuplements forestiers;
- la rédaction et diffusion de guides de sylviculture;
- la rédaction et diffusion de fiches méthodologiques pour la réalisation des volets forestiers des Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles;
- la formation initiale et continue des forestiers;
- l'appui aux politiques publiques pour la gestion durable de l'environnement;
- la réalisation d'expertises.

1.3 CADRE GÉNÉRAL ET OBJECTIFS

Les problèmes générés par les phénomènes de chutes de blocs rocheux peuvent avoir des conséquences importantes et catastrophiques pour toutes les voies de communication alpines. L'évaluation du risque (en général) et les interventions de mise en sécurité par rapport à ce genre de phénomène sont bien souvent réalisées a posteriori, c'est à dire après que le phénomène se soit produit. Cette approche s'est avérée suffisante dans le cas de voies historiques de communication ou à faible densité de trafic. Pour les voies historiques de communication on suppose que les interventions ont été réalisées par étapes successives dans les zones assujetties aux éboulements rocheux. En ce qui concerne, les voies de communication à faible trafic ceci est dû à la faible probabilité de concomitance du phénomène et de la présence d'un véhicule ou d'une personne.

Si on prend en compte le développement des nouvelles voies de communication, de l'exploitation de celles existantes, de l'augmentation exponentielle du trafic et de l'utilisation des itinéraires de loisirs à des fins touristiques, l'approche a posteriori présente de nombreux aspects négatifs:

Riassumendo, tale approccio fa sì che la gestione dei rischi connessi con i fenomeni franosi lungo le vie di comunicazione venga sempre condotta in regime di post-emergenza.

L'obiettivo principale del PROVIALP è quindi quello di sviluppare un metodo agile, da mettere a disposizione degli enti preposti alla sicurezza delle reti viarie, al fine di poter predisporre valutazioni di pericolosità e rischio *ex ante*, per minimizzare i rischi per persone o mezzi in transito sulle vie di comunicazione, permettere una migliore gestione delle risorse per la messa in sicurezza e permettere una migliore gestione del pericolo e del rischio.

Tali metodi, se applicati, dovrebbero permettere:

- una riduzione dei rischi per il traffico;
- una ottimizzazione della gestione degli ecosistemi forestali con funzione di protezione;
- una migliore determinazione sia delle strategie che dei siti di intervento per la riduzione dei rischi nei confronti di beni e persone;
- una miglior gestione della pericolosità e del rischio.

La presente relazione è indirizzata essenzialmente a tecnici che a vario titolo si occupano di gestione dei rischi naturali, a coloro che si occupano della gestione di infrastrutture di comunicazione ed ai gestori delle risorse forestali. Da questo punto di vista può anche permettere a tali soggetti di meglio conoscere i vari campi trasversali di comune interesse.

1.4 ATTIVITÀ PRINCIPALI

Vengono di seguito elencate le principali attività sviluppate dai due partner.

Arpa Piemonte

- Sviluppo di uno strumento per la valutazione di pericolosità e rischio da fenomeni di crollo lungo la viabilità alpina (indicata come attività n. 2 sugli elaborati progettuali). Congiuntamente con il Politecnico di Torino è stata sviluppata una metodologia automatica e speditiva per l'analisi a scala degli interi assi vallivi delle condizioni di pericolosità dovute alla caduta di massi che interessano le vie di comunicazione alpina.
- Validazione dello strumento mediante applicazione ad alcuni siti campione (indicata come attività n. 3 sugli elaborati progettuali). I metodi definiti al punto precedente sono stati applicati a otto assi vallivi campione, sull'intero arco alpino (valle Orco, valle Ala di Lanzo, valle Viù di Lanzo, valle Grande di Lanzo, alcuni settori nella valle Susa, valle Germanasca, valle Tanaro, valle Divedro). Per i rilievi strutturali è stata predisposta una specifica base-dati.

- elle ne permet pas d'anticiper les problèmes avant leur occurrence;
- le développement des routes et du trafic accroît la probabilité de dommage de part l'augmentation en fréquence et en nombre des enjeux susceptibles d'être menacés par les aléas;
- elle ne permet pas l'évaluation exhaustive du risque pour tous les axes de communication;
- l'origine des problèmes n'étant pas connue a priori, elle ne permet pas une programmation adaptée des interventions nécessaires à la mise en sécurité des biens et des personnes;
- elle ne permet pas de valoriser les secteurs où le rôle de protection de la forêt est efficace et masque les phénomènes.

En résumé avec cette approche le gestionnaire est bien souvent contraint de courir derrière l'urgence.

L'objectif général du projet PROVIALP a donc été de construire une méthodologie de raisonnement et de proposer des outils d'aide à sa mise en œuvre, à disposition des organismes en charge de la gestion des risques et ceux en charge de voies de communication, pour développer des évaluations de dangerosité et de risque *ex ante*. Cette évaluation doit permettre:

- une diminution du risque pour le trafic routier et ferroviaire;
- une optimisation de la gestion des écosystèmes forestiers à fonction de protection;
- une meilleure détermination des stratégies et des lieux d'intervention pour la sécurisation des biens et des personnes;
- et au final une meilleure gestion de la dangerosité et du risque.

La vocation de cet ouvrage est de s'adresser aussi bien aux gestionnaires des risques naturels, qu'aux gestionnaires des infrastructures de communication et qu'aux gestionnaires forestiers. A ce titre il permet à chacune de ces communautés de travail d'avoir une meilleure connaissance du travail des autres.

1.4 LES PRINCIPALES ACTIVITÉS

Sont ici décrites les principales activités des deux partenaires du projet.

Arpa Piemonte

- Développement d'une méthode d'évaluation du risque de chute de blocs rocheux sur les voies de communication en zone alpine et ce à l'échelle d'une vallée alpine (activité 2 sur la fiche du projet). Cette méthodologie automatisée et

- Nel campo dell'ingegneria naturalistica (indicata come attività n. 5 sugli elaborati progettuali) sono state esaminate e valutate le tipologie di intervento possibili per la protezione delle reti viarie.
- Particolare cura è stata posta nelle attività di disseminazione ed informazione (indicata come attività n. 6 sugli elaborati progettuali), specificatamente previste nei piani europei. Le attività di formazione e divulgazione si sono sviluppate secondo due assi principali:
 - formazione, sia in aula che sul terreno, di circa 30 Guide Alpine del collegio piemontese, per permettere loro sia di divulgare a loro volta le conoscenze apprese che di fornire un valido supporto alle autorità preposte in caso di emergenze idrogeologiche lungo la rete viaria;
 - attività di formazione e divulgazione nei confronti delle scuole, con corsi di formazione che hanno toccato circa 150 insegnanti e progetti che hanno coinvolto circa 400 ragazzi. Le risultanze di tali attività sono oggetto di una pubblicazione specifica.

Cemagref

- Sviluppo di un metodo cartografico per la delimitazione della zona massima di propagazione per fenomeni da caduta massi.
- Validazione del metodo su di un sito-pilota.
- Sviluppo di un metodo di definizione, cartografia, quantificazione e gerarchizzazione delle foreste di protezione utilizzabili nell'ambito delle gestione forestale e nei piani di prevenzione dei rischi naturali prevedibili.
- Sviluppo e validazione di uno strumento informatico di valutazione rapida della pericolosità residuale in funzione della copertura forestale (programma Rockfor^{NET}, accessibile gratuitamente su Internet).
- Presentazione e valutazione delle principali tecniche di ingegneria naturalistica utilizzabili nel capo della difesa da caduta massi.
- Sviluppo di uno studio sul contributo dei dati acquisiti tramite laser-scanner per la modellazione dei fenomeni da caduta massi e la descrizione dei popolamenti forestali.

Nel corso del progetto e conformemente ai dettati generali dei programmi Interreg, il Cemagref ha sviluppato azioni di formazione e di divulgazione dei risultati ottenuti nel quadro del progetto. Tali azioni hanno comportato essenzialmente:

- formazione di base rivolta a tecnici forestali ed a tecnici nel campo della gestione ambientale;
- la formazione, sia in aula che sul terreno, di tecnici forestali (sia presso enti pubblici che privati);
- la partecipazione a seminari e convegni internazionali per la diffusione delle conoscenze scientifiche acquisite;

rapide d'analyse a été développée en collaboration avec le Polytechnique de Turin.

- Validation de la méthode et mise en œuvre sur des sites pilotes (activité 3 de la fiche projet). La méthode a été appliquée sur sept vallées du Piémont (valle Orco, valle Ala di Lanzo, valle Viù di Lanzo, valle Grande di Lanzo, des secteurs de la valle Susa, valle Germanasca, valle Tanaro, valle Divedro). Pour les enquêtes structurales une base de données spécifique a été élaborée.
- Pour le génie biologique (activité 5 sur la fiche du projet); évaluation de plusieurs techniques d'intervention possible le long des voies de communication.
- Durant le projet et en conformité avec le plan d'action des projets Interreg, l'Arpa a développé d'importantes activités de formation et de diffusion. Ces activités ont principalement concernées:
 - la formation, soit en salle soit sur le terrain, de 30 guides alpins du collège du Piémont. Le but de cette formation est double: permettre aux guides de diffuser, à leur tour, les informations reçues lors des cours, et d'accroître l'efficacité de leur aide aux autorités dans le domaine du porter à connaissance et du suivi des secteurs à risques;
 - la réalisation de cours de formation pour environ 150 enseignants des écoles primaires et des étudiants. Au total, environ 400 personnes ont bénéficié de ces cours. Les résultats de cette action de formation et diffusion auprès des écoles sont présentés dans une publication spécifique.

Cemagref

- Développement d'une méthode de cartographie de l'enveloppe maximale de la zone de propagation du risque de chute de blocs rocheux.
- Validation de la méthode et mise en œuvre sur un site pilote.
- Développement d'une méthode de localisation, cartographie, quantification et hiérarchisation des forêts à fonction de protection utilisable dans les aménagements forestiers et les plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles.
- Fin du développement et de la validation d'un outil de diagnostic rapide de l'aléa résiduel à l'aval de la forêt (outil Rockfor^{NET} en accès gratuit sur internet).
- Présentation des principaux ouvrages de génie biologique pare pierre et évaluation de leur durée d'efficacité.
- Réalisation d'une étude sur l'apport des données laser-scanner aériennes pour la modélisation des chutes de pierres et la description des peuplements forestiers.

Durant le projet et en conformité avec le plan d'action des

- interventi nell'ambito di manifestazioni rivolte al grande pubblico (festival della scienza, giornate "porte aperte", attività di formazione e divulgazione nelle scuole);
- realizzazione di tre filmati sui diversi aspetti dello studio e della gestione della foreste con funzioni di protezione.

1.5 COERENZA CON I PROGRAMMI EUROPEI

Il vertice di Goteborg ha confermato le strategie del processo di Lisbona riguardo l'integrazione ambientale che prevede un migliore coordinamento delle politiche in atto, sia a livello nazionale che comunitario, in modo da garantire omogeneità nell'applicazione della legislazione comunitaria in materia. Pertanto, il progetto PROVIALP è in linea con tali strategie, incentrando i propri obiettivi sull'approfondimento, la divulgazione e l'applicazione di processi che:

- siano applicabili su vaste aree transfrontaliere;
- garantiscano un adeguato grado di sicurezza dei cittadini;
- siano sostenibili per l'ambiente.

Nell'ambito del programma Interreg III, sono stati sviluppati o terminati diversi progetti che associano regioni italiane, dipartimenti francesi, istituti di ricerca ed università di entrambi i Paesi e rappresentano gran parte del territorio della COTRAO (*Communauté de Travail des Alpes Occidentales*). Tali progetti hanno come obiettivo comune il miglioramento e della gestione dei rischi naturali in un contesto di pianificazione del territorio alpino, facendo lavorare insieme i partner di tali Paesi per quanto attiene all'analisi del rischio, la comprensione dei meccanismi ad esso collegati, l'elaborazione e la convalida di metodi e strumenti utili sia per quanto attiene alla cartografia dei rischi sia per quanto attiene alla gestione del rischio residuo (reti di sorveglianza/allerta, ecc.).

Il progetto PROVIALP si inserisce perfettamente in tale quadro, avendo sviluppato temi di estrema importanza per il loro aspetto transfrontaliero ed avendo comportato la stretta collaborazione di due partner, a convalida di una quasi ventennale attività di cooperazione internazionale, cresciuta e sviluppatasi nel corso di numerosi passati progetti Interreg. A tal proposito occorre sottolineare come il progetto PROVIALP si ponga in stretta continuità, sia in termini logici che di contenuti con una pluralità di progetti Interreg quali:

- INTERREG I: Rischi generati da grandi movimenti franosi. Studio comparato di 4 siti nelle Alpi franco-italiane. Consolidamento ed armonizzazione dell'esperienza acquisita sui due versanti alpini in materia di supporto alla decisione nella gestione del rischio.
- INTERREG II Italia/Francia 1994/99: Collegamento delle reti di rilevamento e condivisione delle esperienze e delle conoscenze

projets Interreg, le Cemagref a réalisé des actions de formation et de diffusion des résultats obtenus dans le cadre de ce projet. Ces activités ont principalement concernées:

- la formation initiales des étudiants forestiers et ceux dans le domaine de la gestion de l'environnement;
- la formation continue des personnels forestiers aussi bien publics que privés et en poste en montagne. Ces formations ont été menées aussi bien en salle que sur le terrain;
- la participation à des colloques internationaux pour la diffusion des connaissances scientifiques acquises;
- les interventions dans le cadre de manifestations grand public (fêtes de la science, journées portes ouvertes, interventions dans des écoles primaires,...);
- La réalisation de trois films sur différents aspects de la connaissance et de la gestion des forêts à fonction de protection.

1.5 COHÉRENCE AVEC LES PROGRAMMES EUROPÉENS

Le sommet de Göteborg a confirmé les stratégies de la conférence de Lisbonne, en ce qui concerne la prise en compte environnemental, l'amélioration de la coordination des enjeux politiques, autant au niveau national que communautaire, et ce pour garantir une homogénéisation de l'application des politiques communautaire dans ce domaine. Ainsi, le projet PROVIALP est en adéquations avec ces stratégies, car ses objectives sont d'approfondir, de diffuser et d'appliquer des méthodes et outils qui:

- soient applicables à des zone transfrontalières et ce sur une vaste échelle;
- garantissent une appropriation par les usagers du niveau de sécurité;
- aident à la gestion durable de l'environnement.

Dans le programme Interreg III ont été développés de nombreux projets qui associent des régions italiennes, départements français, instituts de recherches et universités des deux pays et qui représentent plusieurs secteurs du territoire de la COTRAO (*Communauté de Travail des Alpes Occidentales*). Ces projets ont eu pour objectif commun d'améliorer la gestion des risques naturels dans un contexte de planification du territoire alpin, en favorisant le travail en commun des partenaires transfrontaliers dans le domaine des risques, de la compréhension de leurs mécanismes, l'élaboration et la validation de méthodes et des outils d'aide à leur cartographie et à la gestion des risques résiduels (réseaux d'auscultation, d'alerte etc.). Le projet PROVIALP est parfaitement intégrée dans ce cadre, car il a développé des thèmes importants du point de vue transfrontalier et a impliqué la collaboration de deux partenaires, en validant une

per la gestione del rischio idrogeologico in ambiente alpino.

- INTERREG II Italia/Svizzera 1994/99: Collegamento delle reti di rilevamento e condivisione delle esperienze e delle conoscenze per la gestione del rischio idrogeologico.
- INTERREG IIC: Gestione del territorio e Prevenzione delle Inondazioni. Raccolta ed organizzazione di dati territoriali; valutazione di pericolosità e rischio da fenomeni naturali e predisposizione di piani comunali di protezione civile.
- INTERREG IIC FALAISES: prevenzione dei fenomeni d'instabilità delle pareti rocciose.
- INTERREG IIIA ALCOTRA Italia-Francia PRINAT: Creazione del polo dei rischi naturali in montagna della COTRAO.
- INTERREG IIIA France-Italie-Suisse: Gestion durable des forêts de montagne.
- INTERREG III B Espace Alpin 2004-2007: Forest Knowledge transfer in the Alpine Space (*knowforalp*).

1.6 CONTENUTI DEL DVD

Al presente volume è associato un DVD che contiene il seguente materiale:

Relazione finale in formato .pdf

- Relazione finale (bassa risoluzione)
- Relazione finale (alta risoluzione)

Base dati dei rilievi strutturali

- Base dati
- Dati geografici (*shapefile*)
- Foto
 - Valle Divedro
 - Valle Orco
 - Valle Lanzo-Grande
 - Valle Lanzo-Ala
 - Valle Lanzo-Viù
 - Valle Susa
 - Valle Germanasca
 - Valle Tanaro

Codici di calcolo dei metodi meccanico-probabilistici

Tablelle delle analisi cinematiche e probabilistiche

Immagini delle aree strutturali omogenee e risultanze delle analisi

Documentazione software analisi dati LIDAR

Fotografie di ingegneria naturalistica

coopération transfrontalière franco-italienne qui a été engagée et développée depuis maintenant vingt ans, grâce entre autres aux projets Interreg.

A ce sujet il faut souligner que le projet PROVIALP est en parfaite continuité, tant du point de vue thématique que du point de vue résultats, avec plusieurs précédents projets Interreg tels que:

- INTERREG I: Risques générés par les grands mouvements de versant. Etude comparative de 4 sites des Alpes franco-italienne. Consolidation et harmonisation de l'expérience acquise sur les deux versants alpins en matière d'aide à la décision pour la gestion du risque.
- INTERREG II Italie/France 1994/99: Connexion des réseaux de données et mise en commun des connaissances et des expériences pour la gestion des risques d'inondation en région alpine.
- INTERREG IIC: Gestion du territoire et prévention des inondations. Rassemblement et organisation de données territoriales; évaluations de dangerosité et risques dérivant des phénomènes naturels et élaboration de plans communaux de protection civile.
- INTERREG IIC FALAISES: Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises.
- INTERREG IIIA ALCOTRA Italie/France PRINAT: Création du Pôle des risques naturels. en montagne de la COTRAO.
- INTERREG IIIA France-Italie-Suisse Gestion durable des forêts de montagne.
- INTERREG III B Espace Alpin 2004-2007: Forest Knowledge transfer in the Alpine Space (KNOWFORALP).

1.6 CONTENU DU DVD

A cet ouvrage est associé un DVD qui contient:

Rapport final en format .pdf

- Rapport final (basse résolution)
- Rapport final (haute résolution)

Base de données des enquêtes structurales

- Base de données
- Données géographiques (*shapefile*)
- Photographies
 - Valle Divedro
 - Valle Orco
 - Valle Lanzo-Grande
 - Valle Lanzo-Ala
 - Valle Lanzo-Viù
 - Valle Susa
 - Valle Germanasca
 - Valle Tanaro

Filmati del Cemagref

- La foresta in montagna: un paramassi naturale
- Lo strumento Rockfor^{net} (quantificazione del ruolo di protezione delle popolazioni forestali)
- Tecniche di abbattimento trasverso
- Utilizzazione del tomografo per valutare la qualità della base dei tronchi

Codes de calcul des méthodes mécaniques-probabilistes

Tableaux des résultats des analyses cinématiques et probabilistes

Images des aires structurales homogènes et résultats des analyses

Documentation logiciel pour l'analyse LIDAR

Photographies de génie biologique

Films du Cemagref

- La foret en montagne: un filet pare-pierres naturel
- L'utilitarie Rockfor^{net} (quantification du rôle de protection des peuplements forestiers)
- Les techniques d'abattage d'arbres en travers
- Présentation de l'utilisation du tomographe pour apprécier la qualité des bois sur pied

Partecipanti al progetto/Participants au projet**Arpa Piemonte - Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche**

Nome/Prenom	Cognome/Nom	Ruolo svolto nel progetto/Rôle dans le projet
Gianfranca	Bellardone	Attività di formazione e divulgazione.
Luca	Bertino	Rilievi di terreno, redazione dei testi.
Claudia	Borgarello	Sviluppo generale metodologie, rilievi di terreno, elaborazioni balistiche, attività di formazione e divulgazione, redazione dei testi.
Daniele	Bormioli	Coordinamento dei rilievi, sviluppo generale metodologie, rilievi di terreno, attività di formazione e divulgazione, redazione dei testi.
Stefano	Campus	Organizzazione e sviluppo dei rilievi LIDAR, sviluppo metodo dei coni.
Massimiliano	Carrino	Attività di formazione e divulgazione.
Alessio	Colombo	Applicazioni PSInSAR, attività di formazione e divulgazione.
Anselmo	Cucchi	Rilievi di terreno, attività di formazione e divulgazione.
Paolo	Falletti	Attività di formazione e divulgazione.
Claudia	Giampani	Attività di formazione e divulgazione.
Noemi	Giordano	Responsabile amministrativo.
Chiara	Girelli	Attività di formazione e divulgazione.
Luca	Lanteri	Rilievi di terreno, creazione e sviluppo della base-dati.
Luca	Mallen	Rilievi di terreno, elaborazioni balistiche, valutazioni pericolosità.
Federica	Marco	Attività di formazione e divulgazione.
Giuseppina	Moletta	Attività di formazione e divulgazione, redazione dei testi.
Michele	Morelli	Applicazioni telerilevamento.
Nicoletta	Negro	Attività di formazione e divulgazione.
Luca	Paro	Rilievi di terreno, valutazioni di vulnerabilità e pericolosità.
Mara	Perardi	Rilievi di terreno.
Rocco	Pispico	Attività di formazione e divulgazione.
Nicola	Quaranta	Attività di formazione e divulgazione.
Giacomo	Re Fiorentin	Rilievi di terreno, attività di formazione e divulgazione.
Simonetta	Riva	Gestione amministrativa e rendicontazione.
Maria G.	Rombi	Rilievi di terreno.
Carlo	Troisi	Responsabile tecnico del progetto, attività di formazione e divulgazione, redazione dei testi.

Arpa Piemonte - Area delle Attività Regionali per l'Indirizzo e il Coordinamento in Materia di Prevenzione dei Rischi Naturali

Nome/Prenom	Cognome/Nom	Ruolo svolto nel progetto/Rôle dans le projet
Vittorio	Giraud	Attività di formazione e divulgazione.
Ilaria	Prinzi	Attività di formazione e divulgazione.

Cemagref Grenoble

Nome/Prenom	Cognome/Nom	Ruolo svolto nel progetto/Rôle dans le projet
Frédéric	Berger	Responsable technique du projet, participation à l'ensemble des activités
Luuk	Dorren	Co-responsable technique du projet, participation à l'ensemble des activités
Christophe	Bigot	Relevé de terrain, expérimentations de terrain, synthèses bibliographiques
Caterina	Allegra	Relevé de terrain, expérimentations de terrain, ouvrage génie biologique
Oliver	Janke	Etude du taillis
Jérôme	Lopez	Relevé de terrain et synthèse bibliographique dendrogéomorphologie
Eric	Mermin	Relevé de terrain, expérimentations de terrain, analyses des données
Pascal	Tardif	Relevé de terrain, expérimentations de terrain, analyses des données

Subcontrattisti/Sous-traitants

Nome/Prenom	Cognome/Nom	Ente/Organisation
Alberto	Dotta	Consorzio Forestale Alta Valle di Susa, Oulx
Lucia	Caffo	
Rinaldo	Gros	
Marco	Manfredi	
Maurizio	Tomatis	
Marta	Castelli	Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
Claudio	Scavia	
Andrea	Allodi	
Mariano	Bruno	
Fabio	De Benedittis	
Raffaella	Di Lieto	
Gianluca	Larnè	
Sara	Ligorio	
Davide	Mantelli	
Cristina	Occhiena	
Luciano	Neirotti	
Solange	Pennazio	
Gabriele	Pisani	
Manuela	Rocca	
Andrea	Terziano	
Davide	Anchieri	Collegio delle Guide Alpine del Piemonte
Alberto	Bolognesi	
Matteo	Canova	
Cecilia	Cova	
Stefano	Dalla Gasperina	
Luca	Daniele	
Diego	Dho	
Adriano	Ferrero	
Carlo	Gabasio	
Tristano	Gallo	
Andrea	Ghiardi	
Alberto	Giolitti	
Fabio	Iacchini	
Paolo	Intropido	
Gianni	Lanza	
Pier	Mattiel	
Anna	Monari	
Alberto	Re	
Giorgio	Sacco	
Andrea	Lingua	
Andrea	Biasion	
Leandro	Bornaz	

IL CONTRIBUTO DI ARPA PIEMONTE

2



Generalità

**Metodologia
per la scelta delle
aree di indagine**

**Sviluppo della
metodologia per la
raccolta dati**

**La metodologia
meccanico-probabilistica**

Analisi di *run out*

**Considerazioni sulla
vulnerabilità connessa
ai fenomeni di crollo
lungo la viabilità alpina**

**Applicazione dello strumento
ad alcuni siti campione**

Il metodo dei coni

Analisi tramite LIDAR

L'indagine PSInSAR™

Conclusioni e discussione dei risultati

Ingegneria naturalistica

**Caduta di massi in foresta e analisi
dendrocronologica**

**Attività di formazione e divulgazione svolta con il
Collegio delle Guide Alpine del Piemonte**

2.1 GENERALITÀ

Claudia Borgarello, Carlo Troisi, Daniele Bormioli - Arpa Piemonte

2.1.1 Attività e sviluppo del progetto

Conformemente a quanto previsto dagli elaborati progettuali le attività di Arpa Piemonte si sono svolte secondo i seguenti punti principali:

1. Pericolosità da caduta massi.

Il *corpus* principale del progetto, sviluppato di concerto con il Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, ha previsto lo sviluppo di una metodologia speditiva per la valutazione della pericolosità da caduta massi lungo le vie di comunicazione impostate lungo gli assi vallivi in zona alpina. Il metodo ha previsto lo sviluppo dei passi seguenti:

- identificazione delle aree ove applicare l'indagine (capitolo 2.2);
- rilievo geologico-strutturale speditivo lungo gli assi vallivi (capitolo 2.3);
- definizione di un metodo meccanico-probabilistico per determinare, sulla base del rilievo strutturale, la pericolosità connessa con le probabilità di rottura in parete (capitolo 2.4);
- analisi balistica con programma di simulazione tridimensionale per valutare le zone di invasione e combinazione delle probabilità di rottura in parete e di invasione per ottenere una valutazione complessiva di pericolosità, o meglio di suscettività (capitolo 2.5);
- considerazioni circa la vulnerabilità (capitolo 2.6);
- il completo iter di cui sopra è poi stato applicato ad alcune aree-campione sul territorio piemontese (capitolo 2.7).

Alcune considerazioni generali.

La pericolosità calcolata è, a stretto rigore terminologico, una suscettività, in quanto non viene tenuto conto del fattore tempo. L'introduzione del fattore tempo richiederebbe la disponibilità di serie storiche di dati sui crolli che non sono in linea di massima disponibili.

Tutte le valutazioni sono state effettuate ignorando la presenza di opere di difesa da caduta massi sia di tipo attivo (chiodature, tiranti, pannelli di rete, pannelli a fune ecc.) sia passivo (reti o rilevati paramassi ecc.) installati dagli enti responsabili della sicurezza del tratto di rete viaria considerato. Questo in quanto la presa in considerazione di tali opere ed il loro ruolo nella riduzione di pericolosità e/o di vulnerabilità avrebbe richiesto una valutazione critica di elementi quali lo stato di efficienza ed efficacia delle opere stesse, lo stato di manutenzione, la rispondenza dell'opera ai dettati dei relativi elaborati progettuali ecc.

La valutazione di tali elementi esula dagli scopi del progetto PROVIALP; avrebbe richiesto valutazioni difficili da effettuarsi senza specifiche prove in sito (come altrimenti valutare, ad esempio, la bontà di un ancoraggio?) nonché l'accesso agli elaborati del progetto esecutivo, quasi mai disponibili.

Il confronto tra le risultanze delle valutazioni effettuate mediante la metodologia speditiva proposta nel progetto PROVIALP e gli effetti delle opere esistenti viene quindi demandato agli enti che volessero applicare la metodologia stessa.

2. Ingegneria naturalistica.

L'attività, descritta ai capitoli 2.12, 2.13, sviluppata di concerto con il Consorzio Forestale Alta Valle di Susa di Oulx (TO), ha comportato una valutazione delle principali tecniche di ingegneria naturalistica applicabili per la difesa da caduta massi lungo le reti viarie nonché un'analisi su siti campione di tecniche di dendrocronologia per la valutazione della ricorrenza dei fenomeni di caduta massi. Questa parte si integra armonicamente con il contributo francese del partner Cemagraf.

3. Attività di divulgazione

Il progetto PROVIALP ha comportato una corposa attività di divulgazione, questo in quanto:

- i regolamenti relativi ai progetti europei prevedono esplicitamente (ed ovviamente) l'obbligo di dare massima divulgazione alle attività connesse con i progetti europei stessi;
- Arpa Piemonte, nell'ambito delle proprie attività istituzionali, è attivamente impegnata in attività di divulgazione in campo ambientale;
- la larga divulgazione e la diffusione delle informazioni alle popolazioni rappresenta una forma di intervento non strutturale essenziale per una corretta gestione del "rischio idrogeologico" in senso lato.

Le attività di divulgazione hanno seguito due filoni principali: attività nei confronti delle scuole e degli insegnanti ed attività di formazione nei confronti delle guide alpine del collegio piemontese.

Le attività di divulgazione relative alle scuole ed agli insegnanti hanno comportato otto corsi rivolti agli insegnanti, presso varie sedi lungo l'arco alpino, e circa trenta progetti sviluppati dalle scuole stesse con i ragazzi; tali attività sono dettagliatamente descritte in una specifica pubblicazione.

Le attività di formazione nei confronti delle guide sono descritte in dettaglio al capitolo 2.14.

2.1.2 Terminologia

Al fine di condividere in maniera più ampia possibile la tematica sviluppata dal progetto, è stato ritenuto opportuno sviluppare un glossario che specifichi la terminologia affrontata nel prosieguo della pubblicazione.

Il glossario che segue è limitato ai principali termini tecnici che si possono ritrovare negli studi sull'instabilità delle pareti rocciose. Tali studi sono finalizzati ad indicare la probabilità che un evento di caduta massi, con caratteristiche precise, possa raggiungere un luogo determinato.

I termini tecnici sono stati desunti dai glossari presenti in letteratura e adottati a livello internazionale (UNESCO – WP-WLI, 1993; RIG, 1995, terminologia UNI, ecc.), mentre i principali termini inerenti i rischi naturali sono stati estrapolati e tradotti a partire da importanti studi nazionali e internazionali (Arpa, 2005; Varnes e IAEG, 1984; Bonnard *et al.*, 2004, ecc.).

Ammasso roccioso: ammasso costituito da volumi di roccia separati da superfici di discontinuità.

Analisi del fenomeno di caduta massi: complesso di attività comprendenti la raccolta di dati su eventi pregressi, l'analisi preliminare dei dati geologici (litologici e strutturali), geomorfologici e geomeccanici per le aree di versante considerate, l'analisi delle possibilità cinematiche di distacco di massi, l'identificazione e la perimetrazione delle aree di possibile distacco, l'analisi delle possibili traiettorie di caduta (in termini di percorso ed energia), la delimitazione delle aree a rischio di caduta (con zonazione secondo differenti gradi di rischio).

Analisi di stabilità: valutazione delle condizioni di stabilità di una singola porzione rocciosa o di un settore di versante, basata sulle caratteristiche geometriche e geomeccaniche delle discontinuità, espressa in termini di fattore di sicurezza o in termini probabilistici.

Caduta massi: termine generico che indica il movimento lungo un versante di blocchi provenienti da frana di crollo. Il fenomeno può consistere nella caduta di un unico blocco o di più blocchi con interazione tra i blocchi trascurabile.

Cinematismo: insieme di elementi geometrici e meccanici che possono portare all'instabilità di un volume roccioso.

Coefficiente di attrito al rotolamento: termine che esprime la perdita di energia subita da un blocco che si muove lungo un versante mediante movimento per rotolamento. Il coefficiente di attrito al rotolamento è funzione delle caratteristiche del versante (inclinazione, caratteristiche geologiche, geometriche e meccaniche del substrato o della copertura detritica), delle caratteristiche del blocco in movimento (resistenza, massa, forma, dimensioni) e degli elementi cinematici (velocità di rotazione, area e tipo del contatto).

Coefficiente di restituzione: termine che esprime la perdita di energia che un blocco subisce al momento di un impatto. Viene espresso come il rapporto tra la velocità o l'energia del blocco prima e dopo l'impatto con il versante. Il coefficiente di restituzione può essere espresso come termine unico o essere espresso come componenti normale e tangenziale della velocità; esso è funzione delle caratteristiche del versante (inclinazione, rigidità, caratteristiche geologiche e geometriche del substrato o della copertura), delle caratteristiche del blocco in caduta (resistenza, massa, forma, dimensioni), degli elementi cinematici (velocità, sia di traslazione sia di rotazione, angolo di impatto, configurazione spaziale al momento dell'impatto).

Crollo: fenomeno franoso che comporta il distacco di blocchi e/o frammenti rocciosi, di dimensioni variabili da alcuni decimetri a diverse centinaia di metri cubi, da pendii o fronti di scavo ed il loro successivo movimento (per caduta libera, rimbalzo, rotolamento, scivolamento) lungo il versante, fino all'arresto. Il crollo può avere luogo anche per mobilitazione di blocchi contenuti in terreni sciolti.

Cuneo in roccia: porzione rocciosa in forma di cuneo, delimitata da due discontinuità con inclinazione inferiore a quella del versante e direzione di immersione obliqua rispetto al versante stesso. Il cuneo è potenzialmente libero di scivolare lungo la linea di intersezione delle due discontinuità di cui sopra.

Danno potenziale (o valore potenziale delle perdite): entità potenziale delle perdite a seguito del verificarsi di un certo fenomeno ad una data intensità; espresso in termini di numero (quantità di unità esposte al rischio) oppure in termini monetari.

Elementi a rischio: popolazione, proprietà, attività economiche, servizi pubblici, beni ambientali e culturali in una data area esposta al rischio.

Esposizione al rischio: probabilità di impatto dell'elemento a rischio da parte di un masso in movimento, in funzione della probabilità di accadimento (pericolosità del distacco di massi da una parete) e della probabilità che il crollo raggiunga l'elemento a rischio.

Giacitura: orientazione nello spazio di una superficie o di un elemento lineare. La giacitura è definita da: inclinazione massima della superficie (o dell'elemento lineare) rispetto ad un piano orizzontale; direzione di immersione, ovvero l'angolo azimutale (misurato dal nord in senso orario) della linea di massima inclinazione.

Instabilità di versante: fenomeno di movimento o caduta di volumi rocciosi o materiale sciolto a causa dell'effetto della gravità e di altre forze (pressioni idrauliche, azioni sismiche, ecc.).

Pericolo: processo naturale o in evoluzione che può produrre effetti negativi per l'uomo o per l'ambiente. Il pericolo è rappresentato dall'intensità del processo e dall'area coinvolta. Per quanto riguarda i crolli, questa definizione implica una delimitazione e un'analisi delle zone di potenziale origine, transito e accumulo dei crolli, in quanto per definire l'intensità del fenomeno occorre valutare altezza di volo, massa, velocità ed energia dei massi.

Pericolosità: probabilità di accadimento, in un'area considerata e in un determinato intervallo di tempo, di un evento di data intensità.

Piani di discontinuità: termine generico che indica semplicemente un'interruzione nella continuità della roccia intatta, senza nessun accenno al meccanismo genetico della frattura, che può essere sia di natura primaria (stratificazione, piani di strutture sedimentarie, ecc.) sia secondaria (discontinuità tettoniche, di alterazione, di detensionamento, di raffreddamento, ecc.).

Probabilità di propagazione: probabilità che una porzione di ammasso roccioso, di caratteristiche fissate, proveniente da una data porzione di parete, una volta mobilizzatosi, transiti attraverso un'area considerata.

Probabilità di rottura in parete: probabilità che una porzione di ammasso roccioso, di un determinato volume, si mobilizzi, nell'unità di tempo considerata e nella porzione di parete considerata.

Proiezione stereografica: proiezione polare di una sfera su di un piano equatoriale che permette di rappresentare la posizione nello spazio di piani o elementi lineari. Il tipo maggiormente usato in geologia strutturale è la proiezione equiareale.

Ribaltamento: forma di instabilità che comporta la rotazione verso valle di una porzione rocciosa, colonnare o lastriforme, intorno ad un punto posto sulla (o in prossimità della) base di appoggio del blocco.

Rischio specifico: grado di perdita atteso per una data tipologia di elementi a rischio, a seguito di un dato fenomeno ad una data intensità; espresso in termini di probabilità annua.

Rischio totale: valore atteso delle perdite umane (morti, feriti), dei danni alle proprietà, delle perturbazioni alle attività economiche, dei danni ai pubblici servizi e ai beni ambientali e culturali, a seguito di un dato fenomeno ad una data intensità; espresso in termini di costo annuo, oppure in termini di numero o di quantità di unità perse per anno, per un dato elemento.

Roccia: aggregato naturale di grani minerali legati da forze coesive elevate e permanenti, anche dopo prolungata agitazione in acqua.

Rotolamento: movimento di un elemento lapideo lungo un versante, caratterizzato da moto rotazionale e contatto continuo lungo la superficie del terreno. Per elementi di forma irregolare si parla di "moto per rotolamento" anche per cinematismi complessi, comprendenti sia rotazioni sia rimbalzi ravvicinati, con altezze delle parabole di rimbalzo (riferite al baricentro dell'elemento) prossime alla dimensione massima dell'elemento stesso.

Vulnerabilità: grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi a rischio risultante dal verificarsi di un dato fenomeno ad una data intensità.

2.1.3 Caratteri specifici degli studi sulla caduta massi

Come noto, la caduta massi costituisce una tipologia particolare di frana, dove con il termine "frana" si intende qualunque movimento di una porzione di roccia o di terra che avviene lungo un versante sotto l'azione determinante della forza di gravità (Cruden e Varnes, 1996).

La caduta massi è un tipico problema derivante dalla degradazione fisico-meccanica (disgregazione) e, più limitatamente, chimica (decomposizione) delle porzioni più superficiali di ammassi rocciosi in affioramento; occasionalmente si assiste a fenomeni di caduta massi anche da depositi di terre su versanti soggetti ad erosione.

Le particolarità più evidenti del fenomeno sono due: la prima consiste nel fatto che il distacco e la caduta interessano una singola porzione di roccia oppure un insieme di elementi rocciosi che si staccano da una parete più o meno contemporaneamente, ma in cui il comportamento delle singole porzioni è sostanzialmente indipendente da quello delle altre; la seconda riguarda le dimensioni degli elementi di roccia in

movimento, che sono sempre contenute rispetto alle altre caratteristiche geometriche del problema, come il dislivello o la lunghezza del percorso di caduta.

Le condizioni perché avvenga il fenomeno sono le seguenti:

- devono esistere sul pendio blocchi separati dal resto dell'ammasso oppure devono essere presenti porzioni rocciose con legami di natura mineralogica limitati a superfici ridotte (ponti di roccia); il distacco avviene quando le forze agenti, innanzi tutto la forza peso, superano le forze resistenti;
- l'inclinazione del pendio deve essere tale da rendere instabili i blocchi;
- vi è una forza esterna che scatena il dissesto.

Nello studio del fenomeno, e quindi nella conseguente progettazione delle opere di difesa, occorre in ogni caso considerare le tre fasi principali del movimento, cioè il distacco, la successiva caduta e l'arresto.

Il distacco avviene per una combinazione critica di fattori predisponenti e di fattori scatenanti. I primi (detti anche fattori interni) dipendono dai parametri geomeccanici delle discontinuità e del materiale roccia e possono venire individuati e quantificati mediante un accurato rilievo geomeccanico dell'ammasso roccioso. I secondi sono costituiti principalmente dalla forza di gravità (sempre agente), dalla pressione dell'acqua nelle discontinuità, dall'azione ciclica di gelo e disgelo, da vibrazioni naturali (sismi) o indotti dall'attività umana (esplosioni), dalla pressione esercitata nelle discontinuità dalle radici degli alberi e degli arbusti, nel corso della loro crescita, e dall'azione di leva delle stesse radici quando la parte non sotterranea della pianta è soggetta all'azione del vento.

La fase di caduta è in realtà costituita da un insieme di fenomeni di caduta libera, impatti, proiezioni, rimbalzi, scorrimenti, rotolamenti, spesso tra loro interagenti e ripetuti in rapida sequenza. Nella prima fase del movimento la caduta avviene, normalmente, con una successione di tratti in caduta libera e di urti, anche se non è raro che il fenomeno inizi con il rotolamento.

Nella fase di urto possono avvenire: rimbalzi quasi-elastici, con inizio di nuove traiettorie in caduta libera; frammentazione del blocco in caduta con proiezione dei frammenti secondo traiettorie anche molto varie; deformazione della superficie di impatto; prosecuzione della caduta con un tipo di moto differente; arresto.

La fase di urto è regolata dai coefficienti di restituzione normale e tangenziale al pendio nel punto di impatto, che sono, a loro volta, funzione di:

- massa e forma del corpo;
- angolo di incidenza;
- proprietà meccaniche del corpo e del materiale presente sul pendio;
- velocità di traslazione e di rotazione del corpo.

Spesso il movimento prosegue con moto di rotolamento, il quale è regolato sostanzialmente dalla inclinazione del pendio e dall'angolo di attrito dinamico del blocco. Il rotolamento può essere puro oppure pseudo-rotolamento, cioè rotolamento del corpo con successivi e ravvicinati impatti e perdite di contatto col terreno.

Durante la caduta il corpo tende a modificare la propria geometria e ad assumere forme via via più arrotondate e ciò porta a due conseguenze: il moto tende a essere sempre più prossimo al rotolamento puro e il valore di angolo di attrito dinamico diminuisce col progredire della caduta.

Le traiettorie, che derivano dall'alternarsi di caduta libera, urti, rotolamento e scivolamento, possono essere molto varie e dipendono da diversi fattori, quali:

- velocità, caratteristiche meccaniche, forma e dimensioni (per quanto riguarda il blocco);
- inclinazione ed irregolarità (scabrezza), tipologia, densità e caratteristiche degli ostacoli presenti lungo il pendio, caratteristiche meccaniche dei materiali che costituiscono il pendio (per quanto riguarda il pendio).

Anche se i massi tendono sostanzialmente a seguire la linea di massima pendenza, lungo il loro movimento si verifica sempre una più o meno marcata deviazione laterale dovuta alla disposizione nello spazio (direzione e inclinazione) dei singoli punti del versante colpiti dal masso in caduta e da cui dipende la direzione del successivo tratto di percorso.

L'arresto può avvenire a seguito di una progressiva diminuzione della velocità del corpo, oppure bruscamen-

te, con dissipazione dell'energia cinetica del masso nella deformazione della superficie di impatto (terreno, altofusti), oppure con sviluppo di calore (nel senso di impatto con una superficie rigida, come la roccia, altri massi di dimensioni maggiori, muri in calcestruzzo).

Com'è noto questo fenomeno si pone con caratteristiche estremamente variabili in termini di ricorrenza ed intensità. Sebbene di norma coinvolgano volumi limitati rispetto ad altre tipologie di frana (Rochet, 1987; Evans e Hungr, 1993), i crolli sono caratterizzati da elevate frequenza, energia cinetica e mobilità. Inoltre, suscettibilità e ricorrenza temporale dei crolli sono difficili da valutare, in ragione della difficile caratterizzazione e dell'incertezza dei parametri in gioco (Cancelli e Crosta, 1993; Hungr *et al.*, 1999; Dussauge *et al.*, 2003; Crosta e Agliardi, 2003, 2004; Frattini *et al.*, 2007). I crolli in roccia sono tra le più importanti cause di morte per frana, anche nel caso di elementi a rischio a basso grado di esposizione (ed esempio lungo le autostrade, Bunce *et al.*, 1997).

Il problema è ancora più rilevante in valli alpine attraversate da arterie di comunicazione e caratterizzate da fondovalle densamente popolati e da presenza di infrastrutture turistiche. In tali contesti, l'esigenza di nuove aree di espansione determina una sempre maggiore interferenza tra attività umane e settori a rischio. Pertanto, l'analisi e la mitigazione dei rischi connessi a fenomeni di crollo in roccia sono questioni di grande importanza per tecnici, politici e responsabili di Protezione Civile (Cancelli e Crosta, 1993; Fell e Hartford, 1997; Crosta e Agliardi, 2003).

Negli ultimi anni si sono, quindi, moltiplicati gli studi relativi a questo argomento, spaziando dall'analisi della cinematica vera e propria, allo studio della pericolosità con zonazione del rischio, alla progettazione delle opere di difesa più idonee.

Si riporta di seguito un breve riepilogo degli studi sull'argomento riportati in bibliografia che, sebbene non possa considerarsi esaustivo, si propone di fornire spunti adeguati per l'analisi dei metodi di studio previsti per la caduta massi e per l'identificazione del rischio dovuto al fenomeno. L'analisi e la mitigazione dei rischi connessi a fenomeni di crollo in roccia vengono, solitamente, affrontate tramite due approcci differenti:

- zonazione della pericolosità e del rischio, a scala regionale o locale, e pianificazione del territorio finalizzata alla riduzione della vulnerabilità ed esposizione degli elementi a rischio (Pierson *et al.* 1990; Cancelli e Crosta, 1993; Mazzoccola e Sciesa, 2000; Crosta e Agliardi, 2003; Crosta *et al.*, 2005; Frattini *et al.*, 2007);
- progettazione e analisi costi/benefici di interventi strutturali di difesa passiva, quali: riprofilatura del versante, barriere paramassi elastiche o elasto-plastiche, valli, rilevati e gallerie paramassi (Ritchie, 1963; Crosta *et al.*, 2005).

Tali approcci di mitigazione richiedono una previsione quantitativa delle traiettorie di caduta dei blocchi rocciosi, della massima distanza di espansione (*run out*), delle caratteristiche cinematiche e dinamiche del moto e della probabilità che un "blocco di progetto" (blocco di dimensione massima o modale o blocco caratterizzato da una determinata probabilità di distacco) si arresti a una distanza specificata dal punto di distacco (sorgente). Tale previsione, richiesta a diversa scala spaziale in funzione dell'estensione delle aree in esame, è possibile solo attraverso una accurata modellazione matematica dei processi di innesco e propagazione delle frane di crollo.

Essenzialmente le procedure per la definizione di pericolosità e rischio sono oggetto di svariati approcci da parte degli autori, tuttavia, possono essere raggruppati in due categorie principali:

- metodi che consentono la valutazione di pericolosità e rischio sulla base di aspetti geologico-strutturali;
- metodi che si basano sulla teoria della probabilità o su simulazioni traiettografiche.

Metodi basati su aspetti geologico-strutturali

In generale, la forma più semplice di valutazione della pericolosità da crollo, data una zona sorgente con suscettibilità all'innesco nota, consiste nella perimetrazione dell'area di massima espansione delle potenziali traiettorie tramite metodi empirici.

Tali metodi si fondano sull'analisi statistica delle relazioni intercorrenti tra morfometria del versante e distanza di massima espansione dei blocchi e consentono di determinare l'estensione del "cono d'ombra" (Evans e

Hungr, 1993), ovvero dello spazio che sottende l'area di massima espansione dei blocchi. Vari autori (Lied, 1976; Onofri e Candian, 1979; Evans e Hungr, 1993; Jaboyedoff e Labiouse, 2003) hanno proposto diversi valori angolari di pendenza del cono d'ombra, anche in funzione della localizzazione dell'apice del cono (sommità della parete rocciosa o del *talus*). Alcuni autori hanno proposto angoli di pendenza del cono d'ombra differenziati in funzione della probabilità di espandimento (Onofri e Candian, 1979). L'apertura del cono d'ombra può essere definita anche in pianta (Crosta e Locatelli, 1999; Jaboyedoff, 2003).

In particolare, Jaboyedoff (2003) ha riproposto e sviluppato il metodo in forma distribuita in un apposito codice di calcolo (CONEFALL), che impiega le potenzialità dei Modelli Digitali del Terreno (DTM) oggi comunemente disponibili. Tale strumento richiede la disponibilità di un DTM a risoluzione adeguata e la conoscenza delle potenziali aree sorgenti di crollo e consente una prima valutazione delle aree di invasione, utile a scala regionale. Il metodo, estremamente semplificato, non è però adatto per applicazioni specifiche ed analisi di dettaglio, in quanto non consente di valutare in modo accurato la probabilità di propagazione e l'intensità dei fenomeni di caduta massi.

Vengono di seguito riassunti i principali metodi che permettono la definizione della pericolosità e del rischio tramite un'analisi che si basi su dati di terreno e analisi traiettografiche semplici.

Metodo HGP

Il metodo HGP (*Historique, Geomecanique et Probabiliste*), messo a punto dal LIRIGM di Grenoble (Regione Piemonte, 2001), associa la stima della frequenza dell'attività di frana sulla zona oggetto di studio alla gerarchizzazione delle masse rocciose potenzialmente instabili avvicinandosi così alla stima della probabilità di crollo delle instabilità individuate in funzione del tempo.

Metodo IRM

Il metodo IRM (*Integral Risk Management*), messo a punto da Prina, Bonnard e Vuillet (2004), si basa su di uno schema ad albero che prevede l'inventario delle situazioni di rischio, la redazione della carta di pericolosità, lo studio della vulnerabilità per le infrastrutture presenti e la definizione del rischio dalla combinazione di pericolosità e tipologia d'evento.

Metodo LCP

Il metodo LCP (*Laboratoire des Ponts et Chaussées*), messo a punto dal CETE di Lione (Regione Piemonte, 2001), permette la localizzazione e la caratterizzazione delle instabilità, il calcolo delle aree di invasione ed infine la definizione dei lavori per la prevenzione/protezione. La nozione di probabilità di rottura è espressa dalla coppia probabilità/termine di rottura.

Metodo MATTEROCK

Il metodo identifica le zone potenzialmente instabili tramite il confronto tra l'assetto strutturale e la topografia informatizzata in un DTM; il successivo sopralluogo permette di attribuire alla instabilità un indice di pericolosità che è una stima della probabilità di rottura. L'analisi delle traiettorie permette di stabilire perimetri di pericolo in funzione della pericolosità e dell'energia dei blocchi.

Metodo MCF

Il metodo MCF (*Magnitudo-Cumulative-Frequency*), definito da Hungr, Evans e Hazzard nel 1999, combina la frequenza annuale di un crollo, in un determinato tratto di strada, per ogni categoria di volume, con altri dati dipendenti dalle caratteristiche stradali e del traffico portando alla definizione della probabilità annuale che un incidente provochi la morte di almeno uno degli occupanti del veicolo.

Metodo QRA

Il metodo QRA (*Quantitative Risk Assessment*), definito da Oboni (2003), tiene in considerazione un sistema vulnerabile, identifica i pericoli, individua le possibilità di rottura isolate, compone tali rotture in eventi complessi, valuta la probabilità di questi ultimi sulla base dei dati storici e delle esperienze locali, stima le conseguenze degli eventi e restituisce i risultati sotto forma di grafici correlando le probabilità e i danni correlati.

Metodo RES

L'approccio RES (*Rock Engineering System*) definito da Hudson (1992) identifica i parametri che governano la caduta massi, quantifica l'influenza reciproca e l'importanza relativa di ciascuno di questi parametri e ottiene un indice di pericolosità, definito *Rockfall Instability Index* (RII) dato dalla somma dei valori dei parametri ponderata in funzione dell'importanza relativa degli stessi. Questo metodo può applicarsi sia alla quantificazione delle stabilità dei versanti (Mazzoccola e Hudson, 1996) sia alla stima della pericolosità e all'analisi del rischio (Cancelli e Crosta, 1999).

Metodo di Cancelli e Crosta (1999)

Il metodo si basa sull'approccio RES. Gli autori presentano una matrice semplificata con 7 parametri e 42 interazioni. Ciascuna riga passante attraverso un parametro posto lungo la diagonale principale descrive l'influenza del parametro sul sistema ("causa") mentre ciascuna colonna descrive l'influenza del sistema sul parametro ("effetto"). La quantificazione è ottenuta tramite un metodo di codifica semiquantitativa in cui l'importanza di un'interazione è espressa con un codice: 0) inesistente od ininfluente, 4) interazione critica.

Metodo RHAP

Il metodo RHAP (*Rockfall Hazard Assesment Procedure*), messo a punto dalla Regione Lombardia (2000), stabilisce, attraverso lo studio geomeccanico delle pareti e la delimitazione delle aree che possono essere raggiunte dal crollo, una zonazione del pendio in tre zone rispettivamente con arresto del 70%, del 95% e del 100% con attribuzione di una pericolosità preliminare a ciascuna di esse. Successivamente si valuta la probabilità di distacco dalla parete e si rivaluta la pericolosità preliminare in funzione della probabilità di distacco per ottenere la pericolosità finale. La valutazione del rischio è in funzione delle categorie di elementi a rischio interessate dal crollo.

Metodo RHRS

Il metodo RHRS (*Rock Hazard Rating System*), definito da Pierson *et al.* (1990) e ripreso da Hoek (1999), permette un confronto tra i punteggi attribuiti ai dati geomeccanici e a quelli relativi al sistema stradale per definire una scala di pericolosità nella quale a punteggio maggiore corrisponde la priorità maggiore in termini di interventi. Per una migliore caratterizzazione geologica, Scesi *et al.* (2002) hanno proposto un metodo meno qualitativo mentre gli stessi autori, per l'analisi di dettaglio, hanno sviluppato due diversi approcci, uno geometrico-geomeccanico e l'altro basato su un'applicazione del RES.

Metodo RHRON

Questo metodo (Franklin e Senior, 1997) rappresenta una modifica del RHRS e si applica a situazioni nelle quali prevalgono movimenti a bassa velocità.

Metodo SMR

Il metodo SMR (*Slope Mass Rating*), definito da Romana (1993), è un metodo che, analizzate l'orientazione delle discontinuità e la natura della parete rocciosa (naturale o da scavo artificiale), porta a determinare, partendo dal RMR di Bieniawski, un indice a valore numerico. Romana individua 5 diverse classi sulla base del valore di SMR per ognuna delle quali fornisce indicazioni sul grado di stabilità del pendio, sui possibili cinematismi di rottura e sulla necessità di opere di sostegno.

Teorema del Binomio

Questo metodo, messo a punto da Bunce, Cruden e Morgenstern (1997), prevede dapprima la suddivisione del tratto di strada in zone a punteggio RHRS simile, cui segue l'analisi temporale degli eventi di crollo. Per la valutazione del rischio si considera un traffico uniformemente distribuito nel tempo e nello spazio e veicoli di uguale lunghezza. Il metodo fornisce la probabilità annuale che uno o più veicoli siano coinvolti in un incidente a causa di crolli e la probabilità annuale di incidente per ogni veicolo.

Schema ad albero

Questo metodo, sviluppato da Oggeri e Tosco (2005), è incentrato su un albero di eventi che permette di analizzare tutte le possibili conseguenze di una caduta massi in modo da pervenire ad una quantificazione pratica di una grandezza di riferimento di immediata comprensione, senza sottintendere né gli aspetti di pericolosità (prima serie di parametri tipici del versante e del tracciato) né quelli di vulnerabilità (interventi di difesa) né infine quelli di esercizio della strada (comportamento).

Metodi basati sulla teoria della probabilità

Metodo meccanico probabilistico

Il metodo permette di valutare la probabilità di rottura di un pendio in roccia abbinando un modello meccanico all'equilibrio limite alla tecnica statistica di Monte Carlo. L'analisi, in 2D, inizia dalla generazione casuale di superfici di possibile scivolamento a gradini sulla base delle distribuzioni statistiche dei valori strutturali dell'ammasso per poi giungere al calcolo delle probabilità di rottura tra il numero di fattori di sicurezza minori di 1 e il numero totale di fattori di sicurezza calcolati.

Metodi basati su simulazioni traiettografiche

Quando gli elementi a rischio sono collocati a differente distanza dalla sorgente, in punti caratterizzati da diversa probabilità di raggiungimento e intensità, la probabilità di propagazione (*propagation probability*) e l'intensità devono essere definiti in ogni punto dello spazio considerato. Poiché tali parametri sono funzioni complesse delle caratteristiche geometriche e meccaniche dei blocchi e del versante (Agliardi e Crosta, 2003), la definizione della pericolosità richiede l'utilizzo di modelli matematici fisicamente basati per la descrizione dei processi di crollo. Inoltre, l'intensità dei fenomeni è funzione di massa, velocità e altezza delle traiettorie e può essere definita diversamente secondo la descrizione fisica adottata.

L'utilizzo di modelli numerici in 2D o 3D è particolarmente importante per affrontare diverse classi di problemi (Bunce *et al.*, 1997; Crosta e Locatelli, 1999), caratterizzati da difficoltà crescenti nella valutazione della pericolosità, ovvero: problemi puntiformi (es. elementi a rischio singoli o distribuiti su piccole aree), problemi lineari (es. distribuiti lungo "corridoi": strade, ferrovie, *lifelines*, ecc.), problemi areali (es. elementi a rischio distribuiti su aree estese).

La modellazione matematica della caduta massi deve tenere conto della scala del problema (regionale o locale), della sua distribuzione spaziale (localizzato o distribuito) e degli scopi dello studio (valutazione preliminare delle aree di invasione, zonazione della pericolosità, progettazione di opere di difesa, ecc.). I modelli matematici proposti in letteratura sono basati su algoritmi di tipo cinematico (*lumped mass*; Stevens, 1998), dinamico (blocco come corpo rigido; Bozzolo *et al.*, 1988; Azzoni *et al.*, 1995) e ibrido (Pfeiffer e Bowen, 1989) in 2D o 3D (Descoeudres e Zimmermann, 1987; Guzzetti *et al.*, 2002; Agliardi e Crosta, 2003; Crosta *et al.*, 2004). I modelli 2D sono efficienti e pratici a livello operativo. I modelli cinematici richiedono parametri di ingresso di semplice acquisizione e calibrazione, mentre i modelli dinamici forniscono una più accurata descrizione fisica dei fenomeni. I modelli 3D considerano l'effetto della geometria reale dei versanti, ma possono presentare difficoltà operative. Pochi modelli, infine, consentono un'analisi distribuita dei fenomeni.

Simulazioni in 2D

Nelle applicazioni pratiche, i fenomeni di caduta massi sono spesso simulati in 2D lungo profili topografici definiti a priori (Hoek, 1986; Azzoni *et al.*, 1995). Alcuni metodi semplificati per la zonazione della pericolosità da crollo (Mazzoccola e Sciesa, 2000; Raetzo *et al.*, 2002) si basano sulla valutazione della frequenza di traiettorie che raggiungono una distanza "obbiettivo" dalla sorgente in sezione 2D. Tale frequenza costituisce una stima della probabilità di propagazione delle traiettorie, il cui valore viene pesato rispetto alla suscettibilità di innesco al fine di valutare la probabilità totale. Altri approcci 2D di valutazione della pericolosità (es. Raetzo *et al.*, 2002; Jaboyedoff *et al.*, 2005) considerano sia la probabilità di occorrenza che l'intensità dei fenomeni.

In 2D, l'utilizzo di modelli numerici consente di delineare porzioni di versante caratterizzate da valori di probabilità ed intensità, ricadenti nelle diverse classi, e quindi di definire zone a diversa pericolosità secondo

un approccio di tipo matriciale. L'involuppo in pianta delle zone definite lungo diverse sezioni 2D consente di suddividere ("zonare") il territorio in fasce a diversa pericolosità.

Sebbene tale approccio di valutazione sia operativamente conveniente, gli effetti dovuti alla geometria 3D dei versanti naturali rendono l'interpretazione dei risultati e la loro estensione ad aree adiacenti ampiamente soggettive (Agliardi e Crosta, 2003). Jaboyedoff *et al.* (2005) hanno proposto un approccio metodologico per ottenere una zonazione "pseudo-3D" della pericolosità a partire da analisi 2D di caduta massi da sorgenti puntiformi. Tale approccio, sviluppato per alcuni casi ideali, si basa sulla valutazione della probabilità di propagazione lungo traiettorie rettilinee, tracciate radialmente dal punto di distacco. In questo caso, la probabilità che un "bersaglio" di dimensione finita, posto a una data distanza dalla sorgente, sia interessato dal transito di un blocco, varia lateralmente secondo una distribuzione assunta a priori e può essere calcolata in coordinate polari.

Simulazioni in 3D

Studi sperimentali e modellistici (Agliardi e Crosta, 2003) hanno dimostrato che i risultati della modellazione (traiettorie e parametri dinamici), e quindi la valutazione della pericolosità (Crosta e Locatelli, 1999) sono spesso più sensibili ad effetti topografici che alla descrizione fisica adottata. Inoltre, l'utilizzo di algoritmi complessi può aumentare l'incertezza dei risultati, in ragione del maggior numero di parametri considerati. Un approccio alternativo (Guzzetti *et al.*, 2002; Agliardi e Crosta, 2003) consiste nell'utilizzo di algoritmi risolutivi più semplici, combinati con una accurata descrizione della topografia 3D e con un approccio stocastico, che consentono di simulare un grande numero di traiettorie di blocchi e considerare la variabilità della geometria del pendio. I risultati di simulazioni di caduta massi effettuate tramite modelli matematici 3D, sviluppati in forma distribuita ed integrati in ambienti GIS, possono quindi essere opportunamente combinati al fine di ottenere una valutazione distribuita della pericolosità da crollo.

In particolare, Crosta e Agliardi (2003) hanno proposto una procedura per la valutazione della pericolosità basata sull'utilizzo dei codici STONE (Guzzetti *et al.*, 2002; Agliardi e Crosta, 2003) e HY-STONE (Crosta *et al.*, 2004). Tali modelli consentono una modellazione "multiscala" attraverso una descrizione 3D della topografia a risoluzione variabile e presentano le seguenti caratteristiche:

- algoritmi cinematici (Guzzetti *et al.*, 2002; Agliardi e Crosta, 2003) e ibridi (Pfeiffer e Bowen, 1989; Crosta *et al.*, 2004), consentono di simulare processi di caduta libera, impatto e rotolamento tramite diverse funzioni di contatto;
- la geometria 3D del versante è descritta da DTM raster senza vincoli di risoluzione spaziale, ricavati da carte topografiche, fotogrammetria, rilievi LIDAR, ecc. ed elaborati tramite strumenti GIS. Per la simulazione delle interazioni blocco-versante, i codici utilizzano un modello topografico vettoriale ricalcolato dai DTM;
- i dati di ingresso (ubicazione delle sorgenti di crollo, numero, forma e massa dei blocchi lanciati, condizioni iniziali, parametri di restituzione ed attrito, ecc.) sono codificati in forma distribuita come griglie raster, al fine di consentire l'integrazione del modello con ambienti GIS;
- un numero variabile di blocchi con diversa forma e massa può essere simulato a partire dalle singole celle sorgente. La componente stocastica dei fenomeni e la variabilità dei parametri di ingresso sono considerate implicitamente (risoluzione del DTM) e tramite approccio stocastico, simulando un numero rappresentativo di traiettorie per ogni sorgente e campionando casualmente i parametri da diverse distribuzioni di probabilità (es. uniforme, normale, lognormale, esponenziale);
- i risultati, in formato raster e vettoriale, includono: frequenza di transito/cella, traiettorie 3D, valori puntuali e distribuzione statistica di altezza, velocità ed energia cinetica lungo le traiettorie di caduta, punti di impatto, ecc.;
- i modelli possono considerare gli effetti di strutture protettive (es. barriere, rilevati) e della vegetazione e implementano modelli specifici per la modellazione dell'impatto su materiali soffici (Di Prisco e Vecchiotti, 2006).

I codici descritti, validati da diverse applicazioni a casi reali (Agliardi e Crosta, 2003; Acosta *et al.*, 2003; Crosta e Agliardi, 2004; Crosta *et al.*, 2005; Frattini *et al.*, 2007), consentono una modellazione 3D della caduta massi in forma distribuita, utile per la soluzione di vari problemi in funzione della scala e della

risoluzione dei dati disponibili. La procedura di valutazione della pericolosità proposta da Crosta e Agliardi (2003) si basa sulla valutazione di un "indice di pericolosità da crollo" (RHI) e di un "vettore di pericolosità da crollo", ottenuti combinando i valori, opportunamente riclassificati, di alcuni parametri descrittivi della suscettibilità da crollo. La metodologia descritta, implementabile in automatico tramite GIS, consente di ottenere mappe di pericolosità "fisicamente basate" tramite criteri oggettivi e ripetibili, sia a scala regionale che di dettaglio, in funzione dei dati disponibili e degli scopi di analisi.

Applicabilità e affidabilità

Sulla scorta di quanto disponibile in letteratura e dall'esame diretto di alcuni casi pratici si possono evidenziare alcuni punti essenziali:

- l'occorrenza dei diversi processi di propagazione (caduta libera, impatto/rimbalzo, rotolamento, scivolamento, frammentazione, ecc.) e la loro associazione nello spazio e nel tempo dipendono da diversi fattori di controllo, tra i quali: geometria del versante, forma e volume dei blocchi (massa e momento d'inerzia), caratteristiche geomeccaniche del blocco (resistenza, fratturazione, frammentazione) e del substrato (resistenza, compressibilità, granulometria, densità relativa/consistenza, contenuto d'acqua) e caratteristiche della copertura vegetale (tipo e densità della vegetazione);
- l'analisi geostrutturale è una base fondamentale ed irrinunciabile, sulla quale, tuttavia, si fondano in gran parte le limitazioni delle incertezze legate alle dimensioni dei blocchi e alle possibilità di innesco dei fenomeni;
- esiste una limitata conoscenza della fisica dei processi di crollo e/o delle equazioni che li governano. Ad esempio, l'impatto di un blocco su substrato deformabile implica un'associazione complessa di fenomeni di anelasticità, plasticizzazione e frammentazione, controllata da diversi fattori (microtopografia, caratteristiche geomeccaniche del blocco, deformabilità del substrato, ecc.). Data l'impossibilità di considerare tali effetti in modo esplicito, il fenomeno di impatto è globalmente descritto da "funzioni di contatto" (Pfeiffer e Bowen, 1989; Azzoni *et al.*, 1995), nel caso più semplice da coefficienti di restituzione e attrito costanti per ogni materiale;
- esiste una variabilità naturale di tutti i parametri di controllo della dinamica: nei versanti reali, la maggior parte dei parametri è difficile da quantificare, sia nello spazio che nel tempo, anche quando sono disponibili informazioni dettagliate riguardanti eventi pregressi. Infatti, dimensione, forma e proprietà meccaniche dei blocchi e la localizzazione delle sorgenti di crollo sono raramente noti con esattezza. Inoltre, le caratteristiche geometriche e meccaniche dei materiali costituenti il versante variano notevolmente nello spazio (Evans e Hungr, 1993; Agliardi e Crosta, 2003);
- il disordine topografico dovuto alla geometria 3D dei versanti naturali (Crosta e Agliardi, 2004), varia longitudinalmente e lateralmente a diversa scala (presenza di forre e canali, concavità, contropendenze e creste longitudinali e trasversali). La geometria del versante condiziona le traiettorie dei blocchi e la ripartizione dell'energia cinetica nelle componenti di traslazione e rotazione: la traiettoria di un blocco può essere deviata dalla direzione di massima pendenza per rotolamento su superfici concave o convesse e a seguito di impatti obliqui.

2.1.4 La franosità in Piemonte

Il territorio piemontese, dal punto di vista geomorfologico, è divisibile in tre vaste regioni disposte in forma semiconcentrica: all'esterno, la cerchia montuosa (Alpi Occidentali ed Appennino) bordata all'interno dall'area di pianura e, in posizione centrale, una vasta zona collinare (Monferrato e Langhe).

Il territorio montano è di gran lunga il più esteso ed occupa 11 280 km², cioè il 44% dell'intera superficie regionale; la zona collinare si estende per circa 5 650 km² (23%), occupando la parte sud-orientale del territorio piemontese, mentre la pianura piemontese si estende per circa 9 900 km² (33%). Ne consegue che gli ambiti in cui possono svilupparsi movimenti franosi di vario genere rappresentano, in Piemonte, ben il 67% del territorio, dando origine a problematiche di tipo amministrativo e di protezione civile di notevoli dimensioni.

Proprio per questo motivo, negli ultimi anni si è assistito ad un incremento, sempre maggiore e più approfondito, della raccolta dati relativi agli eventi franosi che hanno interessato la regione. Grande sviluppo a

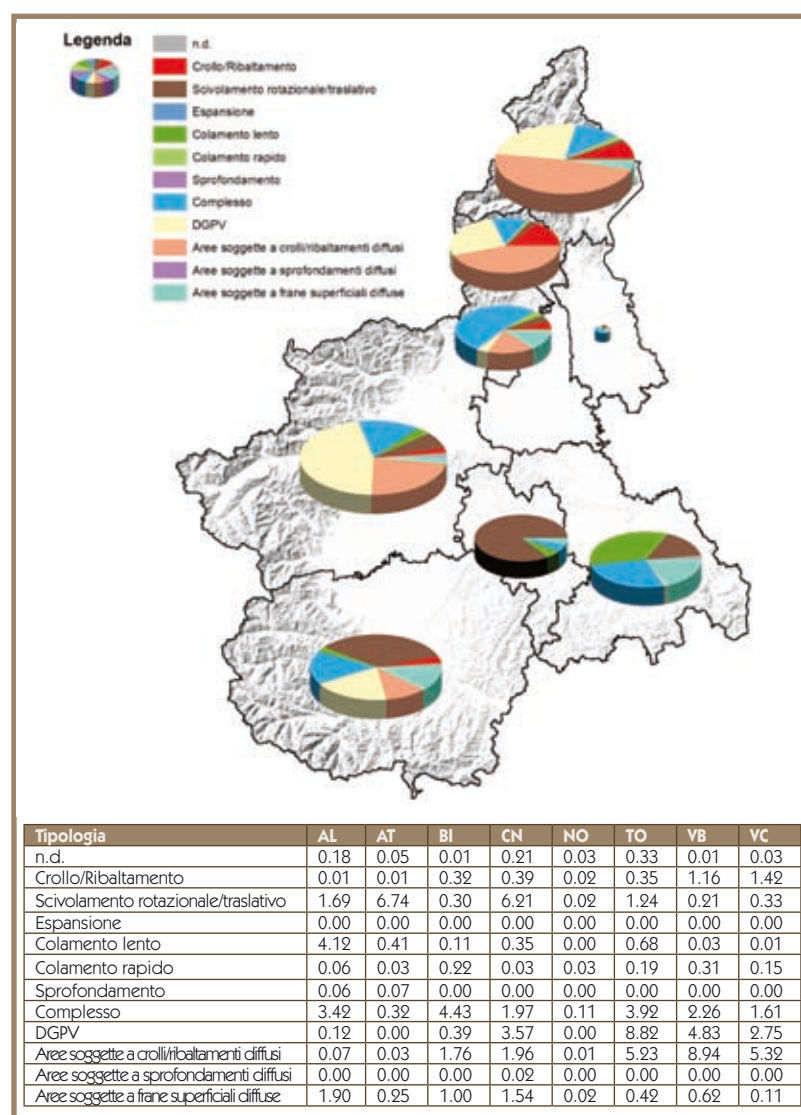
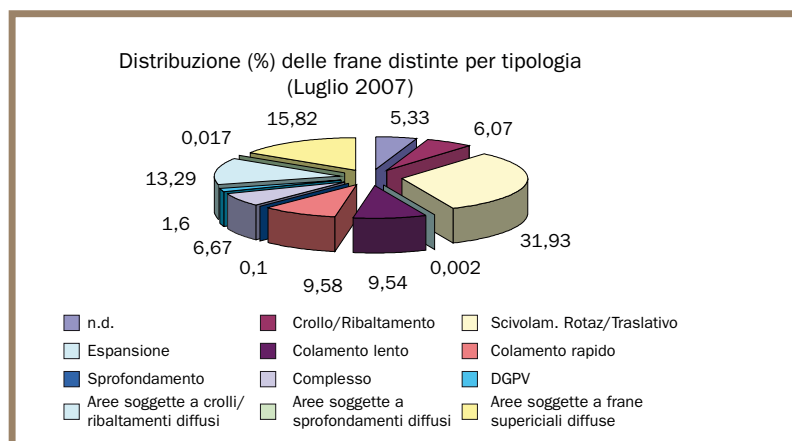


Figura 2.1.1 Percentuale di territorio collinare/montano in frana distinta per provincia e tipologia di movimento

montano (con acclività superiore al 4%) in quanto in aree con acclività inferiore non si riscontrano fenomeni franosi. La dimensione delle torte relative a ciascuna provincia era proporzionale alla percentuale di area in frana della provincia stessa. Si evidenziavano valori percentuali molto alti nelle province di Torino, Verbania e Cuneo; tali valori erano determinati dalla presenza di estesi movimenti franosi complessi, dalle DGPV (tipiche delle zone alpine) e dalle aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi. Ancora rilevante era l'area collinare/montana occupata da scivolamenti rotazionali/traslativi nelle province di Cuneo e Asti, in gran parte localizzate nelle aree collinari delle Langhe e del Monferrato.

Figura 2.1.2 Distribuzione delle frane presenti sul territorio piemontese distinte per tipologia



questo argomento è stato dato dal progetto nazionale IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) che, per quanto riguarda il Piemonte, all'inizio del 2004, aveva portato all'identificazione di 33 972 fenomeni franosi.

Successivamente al 2004, i dati sono stati continuamente affinati e integrati attraverso l'analisi incrociata degli elementi a disposizione sino a giungere alla realizzazione della nuova banca dati SIFRAP (Sistema Informativo Frane), sviluppata da Arpa Piemonte al fine di rendere sempre più dettagliata la conoscenza sui movimenti franosi della regione. Infatti, nonostante le forti limitazioni, per lo sviluppo e la taratura dei modelli di analisi della pericolosità da frana e più in generale della pericolosità legata ai processi naturali, è convinzione basilare della struttura disporre di un inventario il più possibile preciso, completo e omogeneo.

Il presente paragrafo propone una sintetica e generalizzata revisione dei dati attualmente disponibili sui fenomeni di crollo in Piemonte. Tali dati sono già stati, in parte, oggetto di analisi e divulgazione in precedenti pubblicazioni di Arpa Piemonte.

A dicembre 2005, l'aggiornamento dei dati sulla franosità aveva portato all'identificazione della percentuale di territorio montano/collinare in frana, distinta per provincia e per tipologia di movimento (figura 2.1.1). Il confronto delle aree in frana era stato effettuato sulla porzione di territorio collinare/

A Luglio 2007 è stato possibile aggiornare a 35 051 il numero complessivo di movimenti franosi presenti sul territorio regionale, compresi di fenomeni puntuali e areali. Tali dati, presenti nel SIFRAP, sono stati usati per l'elaborazione di una serie di grafici distinti per tipologia di movimento, distribuzione per province e stato di attività.

In particolare la figura 2.1.2 evidenzia che la principale tipologia di frana presente sul territorio piemontese continua ad essere rappresentata dagli scivolamenti rotazionali/traslativi, seguita dalle aree soggette a frane superficiali diffuse e da quelle soggette a crolli e ribaltamenti diffusi.

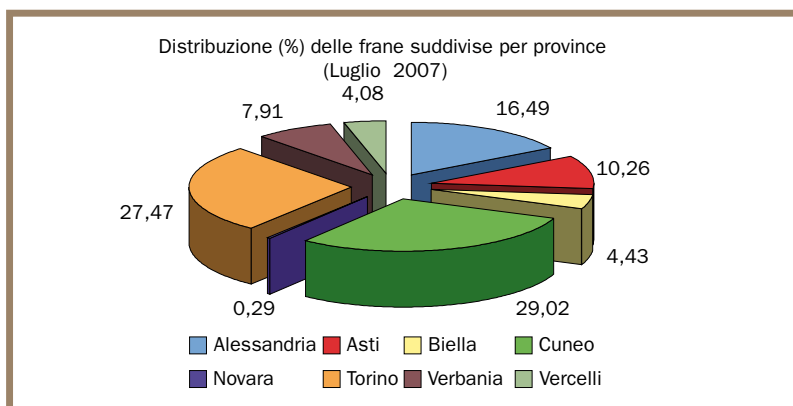


Figura 2.1.3 Distribuzione delle frane presenti sul territorio piemontese distinte per provincia

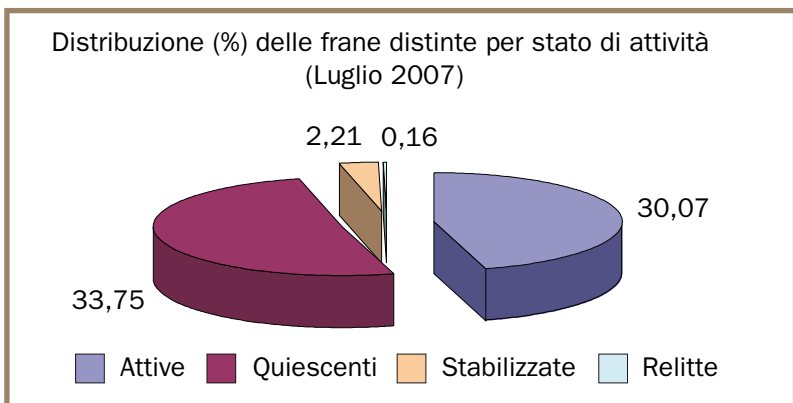


Figura 2.1.4 Distribuzione delle frane presenti sul territorio piemontese distinte per stato di attività

Risulta inferiore al 10% la distribuzione delle altre tipologie di frane. Da sottolineare come questi dati concordino perfettamente con quelli già presentati nella consegna del progetto IFFI, variando solo in qualche valore percentuale dovuto all'affinamento dei dati.

La **figura 2.1.3** evidenzia, invece, la distribuzione delle frane nelle varie province piemontesi. La provincia con la maggior franosità è Cuneo, seguita da Torino e, in misura minore, da Asti e Alessandria. Le restanti province mostrano una percentuale di numero di frane inferiore al 10%. I dati evidenziano una spiccata propensione al dissesto sviluppata in ambiente collinare piuttosto che montano. Per quanto riguarda, infine, lo stato di attività dei movimenti franosi (**figura 2.1.4**), essi risultano quasi perfettamente suddivisi tra attivi e quiescenti mentre una minima parte risulta stabilizzata, sia naturalmente che artificialmente, e ancora meno sono le frane relitte.

All'interno dei movimenti attivi si distinguono sia quelli attualmente in movimento sia quelli sospesi, cioè dislocatisi durante l'ultimo ciclo stagionale ma non attualmente attivi, sia quelli riattivati, cioè di nuovo attivi dopo essere stati inattivi.

2.1.5 Esperienze precedenti

Arpa Piemonte ha sviluppato, nel corso degli anni, una buona conoscenza degli aspetti legati alla caduta massi attraverso la partecipazione a numerosi progetti INTERREG inerenti l'argomento trattato. Inoltre, proprio nell'ottica di sviluppare una metodologia per la prevenzione di questi pericoli, nel 2003 Arpa Piemonte, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino, ha promosso lo sviluppo di un progetto volto a definire una metodologia per la determinazione della pericolosità dovuta a crolli in roccia interessanti aree vaste e fisiograficamente diversificate dal titolo "Messa a punto di una metodologia per la determinazione della pericolosità dovuta a crolli in roccia".

Tale progetto ha avuto vasta diffusione attraverso la pubblicazione sui volumi "Dalla valutazione alla previsione dei rischi naturali" (Arpa Piemonte, 2005) e "Mitigation of hydro-geological risk in alpine catchments", Programma INTERREG IIIB - Alpine Space (2005).

Tale studio rappresenta l'antefatto del progetto PROVIALP, ma era stato sviluppato solamente per gli scivolamenti planari e a cuneo.

La parte di analisi teorico-probabilistica e gli studi traiettografici sono stati ripresi nel progetto PROVIALP; se ne tralascia dunque la descrizione rimandando ai capitoli 2.4 e 2.5 per ogni eventuale approfondimento. Per quanto riguarda la metodologia di rilevamento dei dati di terreno, nel rapporto del 2003, il lavoro di terreno era stato limitato ad una sola zona omogenea, rappresentata da una serie di pareti rocciose ubicate a monte della frazione di Cels, nel comune di Exilles.

Si riporta di seguito la sequenza dei passaggi a cascata che hanno permesso di sviluppare il progetto. Tutte le azioni riportate sono state riprese e approfondite dal progetto PROVIALP che ha permesso un ampliamento

to a scala di valle della metodologia qui riportata:

- determinazione di una metodologia di rilevamento in campo e uno schema teorico per le simulazioni numeriche;
- individuazione del grado di instabilità del settore di parete rocciosa origine dei crolli sulla base di rilievi giaciturali speditivi (le principali famiglie di discontinuità e i cinematismi) e attraverso test di compatibilità cinematica per fenomeni di instabilità dovuti a scivolamento planare e scivolamento a cuneo;
- valutazione della probabilità di rottura dei cinematismi attraverso metodi probabilistici;
- valutazione dei principali parametri che influenzano il moto di caduta dei massi (rotolamenti e rimbalzi) attraverso la caratterizzazione del pendio tramite i coefficienti di rotolamento e restituzione e la volumetria caratteristica dei crolli pregressi;
- analisi delle traiettorie di caduta dei massi attraverso un programma di simulazione 3D in grado di valutare i principali parametri per il calcolo della pericolosità, espressa come "indice di pericolosità".

Tutte le informazioni sono state raccolte all'interno di tematismi di ESRI® ArcView in modo tale da poter essere utilizzati per la successiva fase di simulazione numerica di caduta massi.

2.2 METODOLOGIA PER LA SCELTA DELLE AREE DI INDAGINE

Claudia Borgarello, Luca Mallen, Michele Morelli - Arpa Piemonte

La metodologia mira a stabilire quali siano i principali parametri che governano il fenomeno della caduta massi e che, di conseguenza, vanno primariamente individuati e/o rilevati sul terreno al fine di poter permettere un'applicazione dettagliata della metodica sia su vasti areali che in dettaglio su singole pareti.

Al fine di stabilire un quadro globale del fenomeno, prima di procedere con lo sviluppo dell'analisi vera e propria, volta ad acquisire i parametri utili per la ricerca, sono state sviluppate una serie di proposte complementari per individuare quelle aree che maggiormente risentono del fenomeno in esame e che quindi costituiscono una discriminante nell'analisi delle pareti rocciose che affiorano lungo le vie di comunicazione.

Sono stati presi in considerazione tre aspetti principali che si ritengono validi ai fini dell'individuazione di quei settori maggiormente predisposti al dissesto per caduta massi.

2.2.1 Analisi storica

L'approccio storico consente di delineare un quadro conoscitivo sul fenomeno e stabilirne una ricorrenza temporale e spaziale, fornendo inoltre utili elementi di definizione tipologica (zone sorgente, dimensioni dei massi, ecc.). L'analisi storica permette di stabilire da quanto tempo il fenomeno è conosciuto e di ottenere informazioni sui danni provocati, sulla frequenza delle fasi di riattivazione e sull'evoluzione generale dell'instabilità.

All'interno del progetto PROVIALP è stata avviata una ricerca bibliografica di archivio sul fenomeno della caduta massi; in particolare si è fatto riferimento al progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), recentemente concluso, nel quale sono riportati anche tutti i fenomeni di crollo e ribaltamento che interferiscono con le vie di comunicazione presenti sul territorio regionale.

Questa prima consultazione è stata successivamente integrata con ulteriori informazioni disponibili negli archivi di Arpa Piemonte e/o degli enti pubblici locali al fine di evidenziare tutte le possibili situazioni di pericolosità proprie di ogni valle esaminata.

2.2.2 Il programma Skyline

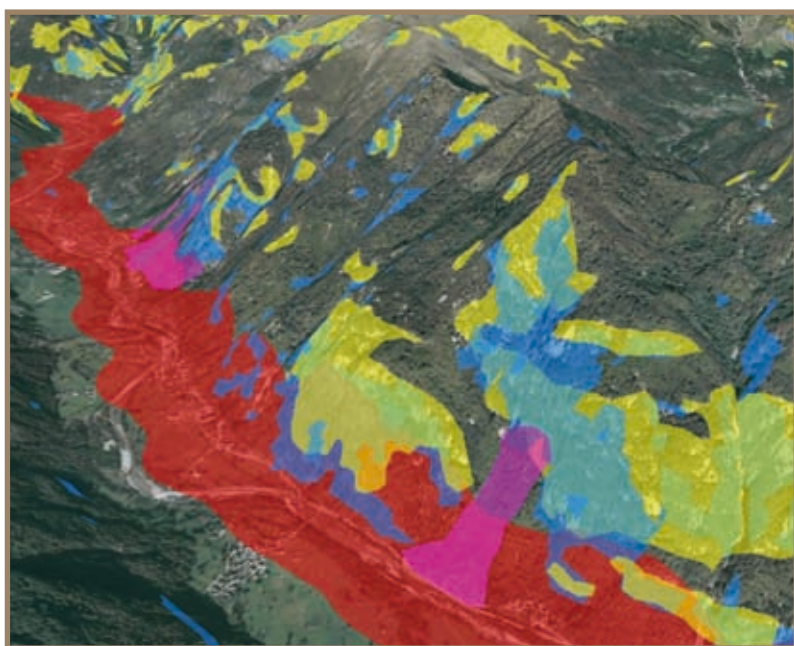


Figura 2.2.1 Esempio di realizzazione del programma Skyline attraverso la sovrapposizione dei tematismi definiti nel testo. In rosso il buffer delle strade, in rosa i crolli relativi all'IFFI, in giallo le zone rocciose della CTRN e in azzurro le aree di versante con inclinazione > di 45°

Nella definizione preliminare dei settori da monitorare, si è deciso di sperimentare le potenzialità della piattaforma Skyline, un software recentemente acquisito da Arpa Piemonte che consente di generare modelli 3D del territorio a partire da un modello digitale del terreno (DTM) ed un set di immagini quali ortofoto o immagini satellitari.

Una volta creato, è possibile poi personalizzare il modello inserendo dati vettoriali opportunamente tematizzati (*shape file, dxf, ecc.*) e corredati dalle relative tabelle degli attributi. Il progetto realizzato infine viene distribuito mediante una logica *client-server* a una serie di utenti abilitati che possono navigare al suo interno, visualizzare i *dataset* presenti, interrogare le tabelle associate e compiere analisi spaziali.

Nello specifico, si è deciso di realizzare una serie di progetti 3D contenenti ciascuno un'area di indagine, i dati relativi ai crolli IFFI, le zone rocciose identificate dalla carta tecnica regionale numerica (CTRN), le aree di versante con inclinazione maggiore di 45° e un poligono rappresentante la viabilità principale con un *buffer* di 250 m (**figura 2.2.1**).

L'ipotesi sulla quale si è deciso di lavorare è che ogni intersezione del poligono "viabilità" con almeno uno dei precedenti tematismi dovrebbe rappresentare una potenziale area a rischio di crolli da monitorare sul terreno. In questo modo è possibile svolgere un lavoro di scrematura delle zone oggetto di indagine di terreno navigando all'interno del modello 3D e di visualizzazione dell'effettiva disposizione al suolo delle basi dati di interesse.

Il primo modello sperimentale realizzato è stato testato sulla valle Orco ed ha prodotto risultati eccellenti: tutti i principali siti a rischio di crollo individuati durante i sopralluoghi di terreno coincidevano con quelli individuati sul modello, applicando la metodologia sopra esposta.

Sebbene vada tenuto presente che questo strumento fornisce soltanto un'ipotesi di lavoro e che i risultati devono essere valutati in maniera critica, il suo utilizzo può diminuire notevolmente i tempi di lavoro sul terreno, oltre a rappresentare un'applicazione innovativa e che potrà essere ulteriormente affinata con l'utilizzo di basi dati territoriali più dettagliate.

L'utilizzo del programma si è rivelato anche molto utile dal punto di vista del primo approccio alla tipologia di valle da esaminare, soprattutto nel caso di valli poco conosciute, in quanto la visione del modello 3D ha permesso di conoscere in anticipo e con un buon grado di dettaglio le future zone da monitorare nonché la logistica della valle (strade percorribili, zone panoramiche, ecc.).

2.2.3 Analisi strutturale a piccola scala

L'applicazione del telerilevamento in geologia è stata vista, già dall'inizio del suo sviluppo, come uno strumento capace di integrare le conoscenze e di migliorare la comprensione dei fenomeni geologico-ambientali. In tale ambito il telerilevamento è stato applicato, tra l'altro, allo studio dei fenomeni franosi (Wieczorek 1984; Gupta e Joshi, 1990; Van Western 1993; Wagner 1994; Shikada *et al.*, 1995; Pandiscia e Pirredda, 1997) principalmente come sistema di controllo preventivo e per la stesura di carte tematiche dei fenomeni franosi o per il monitoraggio della loro evoluzione nel tempo.

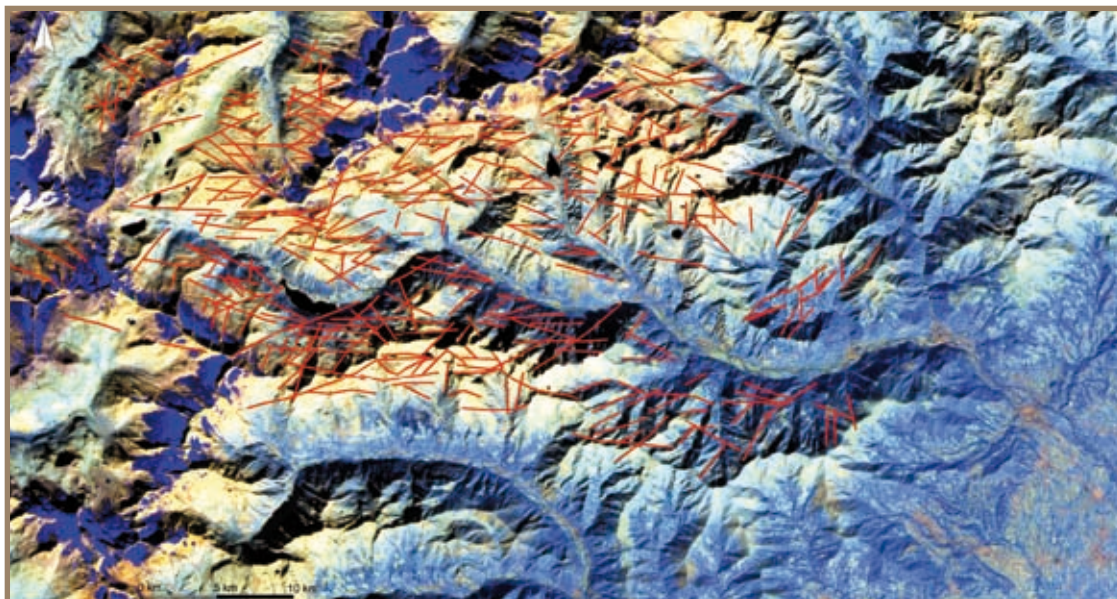
Tuttavia, i fenomeni franosi in special modo le frane di crollo, sono strettamente connessi, oltre che all'assetto geologico-strutturale dell'area in questione, anche al grado di fratturazione dell'ammasso roccioso, il quale è una risposta all'evoluzione naturale dello stato di sforzo.

In questo lavoro l'applicazione del telerilevamento è stata quindi rivolta all'analisi a scala regionale dei lineamenti telerilevati da satellite e alla loro caratterizzazione geologica al fine di valutare il ruolo dei principali sistemi di discontinuità tettonici nell'insorgere dei movimenti franosi. Il riconoscimento di strutture tettoniche e della loro distribuzione sul territorio è di fondamentale importanza in quanto esse possono rappresentare elementi chiave per comprendere la distribuzione dei settori maggiormente predisposti all'insorgere dei fenomeni franosi.

Quest'ultima possibilità si basa sul presupposto che ammassi rocciosi caratterizzati da un elevato stato di deformazione tettonica e quindi da un'elevata intensità di fratturazione, siano soggetti, a parità di altre condizioni, a maggiore predisposizione all'instabilità. Si rimarca tuttavia che la possibilità di utilizzare i lineamenti individuati come rappresentativi del quadro strutturale reale può essere effettuata solo dopo aver stabilito, per ciascun caso in esame, criteri e regole che consentano di fornire chiavi interpretative per caratterizzare i sistemi lineamentari sulla base di vincoli geometrico-strutturali osservati sul terreno (Morelli e Piana, 2006). È un metodo che richiede tempi medio-brevi rispetto a quelli necessari per una caratterizzazione geomeccanica classica specie per ampi areali e soprattutto può essere l'unico approccio possibile nel caso in cui si voglia delineare un modello geologico-strutturale in aree caratterizzate da difficoltà logistiche (es. aree montuose di alta quota, aree con substrato poco affiorante, ecc.).

Fra tutte le valli scelte in questo progetto il telerilevamento è stato applicato in parte solo per la valle Orco in quanto oggetto di rilevamenti geologico-strutturali recenti di dettaglio (Perello *et al.*, 2004).

Figura 2.2.2 Lineamenti individuati su immagini satellitari Landsat ETM in falsi colori (7-5-4 RGB)



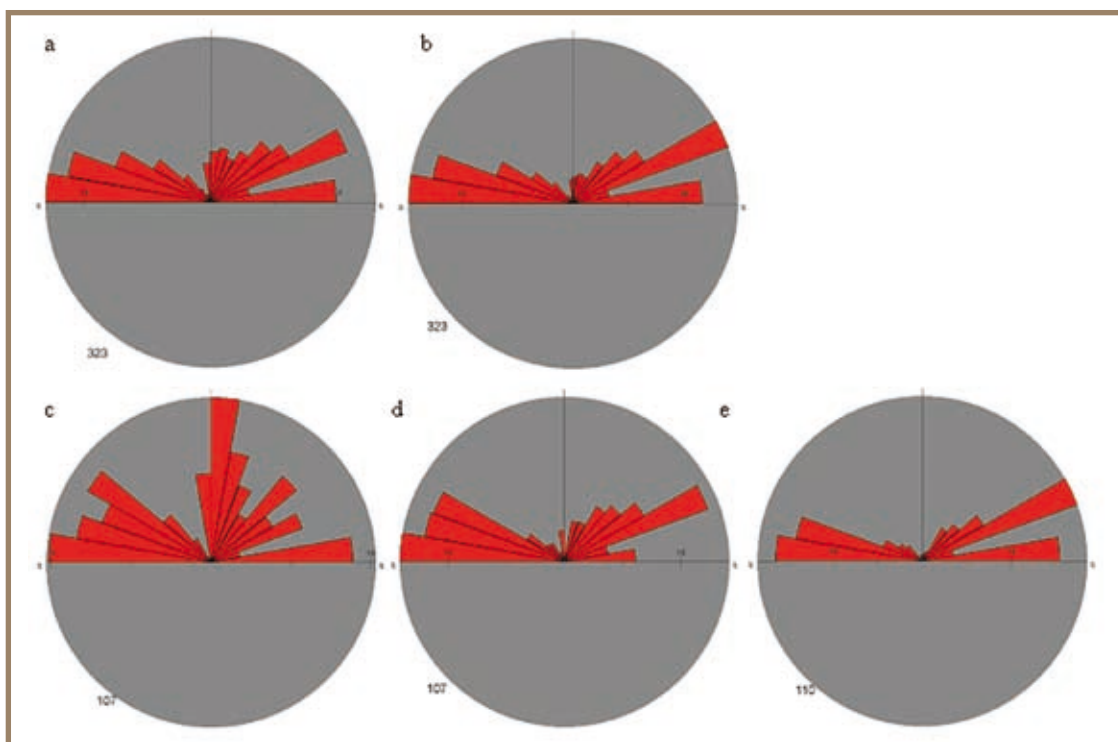
L'interpretazione del dato telerilevato è stata effettuata su immagini satellitari Landsat 7 ETM opportunamente elaborate per l'individuazione di elementi morfologico-spetttrali a significato strutturale (**figura 2.2.2**).

La metodologia utilizzata per l'individuazione dei lineamenti ha comportato inizialmente l'analisi dei lineamenti maggiori e successivamente il riconoscimento e l'analisi di quelli minori ad essi associabili sulla base di parametri geometrici quali orientazione, lunghezza, spaziatura e tipo di terminazione. Tale metodologia permette di individuare ed interpretare gli elementi lineari come facenti parte di famiglie lineamentari senza che ad essi venga associata, fin dalla fase identificativa, alcuna implicazione strutturale (Morelli e Piana, 2006). Questa operazione, apparentemente arbitraria, si basa sulla nota corrispondenza tra l'orientazione delle fasce in cui gli elementi lineamentari tendono a raggrupparsi e l'orientazione degli elementi geologici reali. I lineamenti individuati sono stati successivamente raggruppati in sistemi lineamentari in termini di distribuzioni azimutali e lunghezze (per classi di lunghezza e per lunghezze cumulative) sulla base di analisi statistiche (**figura 2.2.3**).

Questa elaborazione viene fatta con lo scopo di associare in modo cumulativo le caratteristiche geologico-strutturali all'intero sistema lineamentare, superando i limiti spaziali di raccolta di dati puntuali

Figura 2.2.3

a) Diagrammi delle frequenze azimutali e (b) delle lunghezze cumulative dei lineamenti. Diagrammi di frequenza azimutale divisi in classi di lunghezze dei lineamenti, (c): minori di 1 500 m; (d): tra 1 500 m e 2 200 m; (e): maggiori di 2 200 m



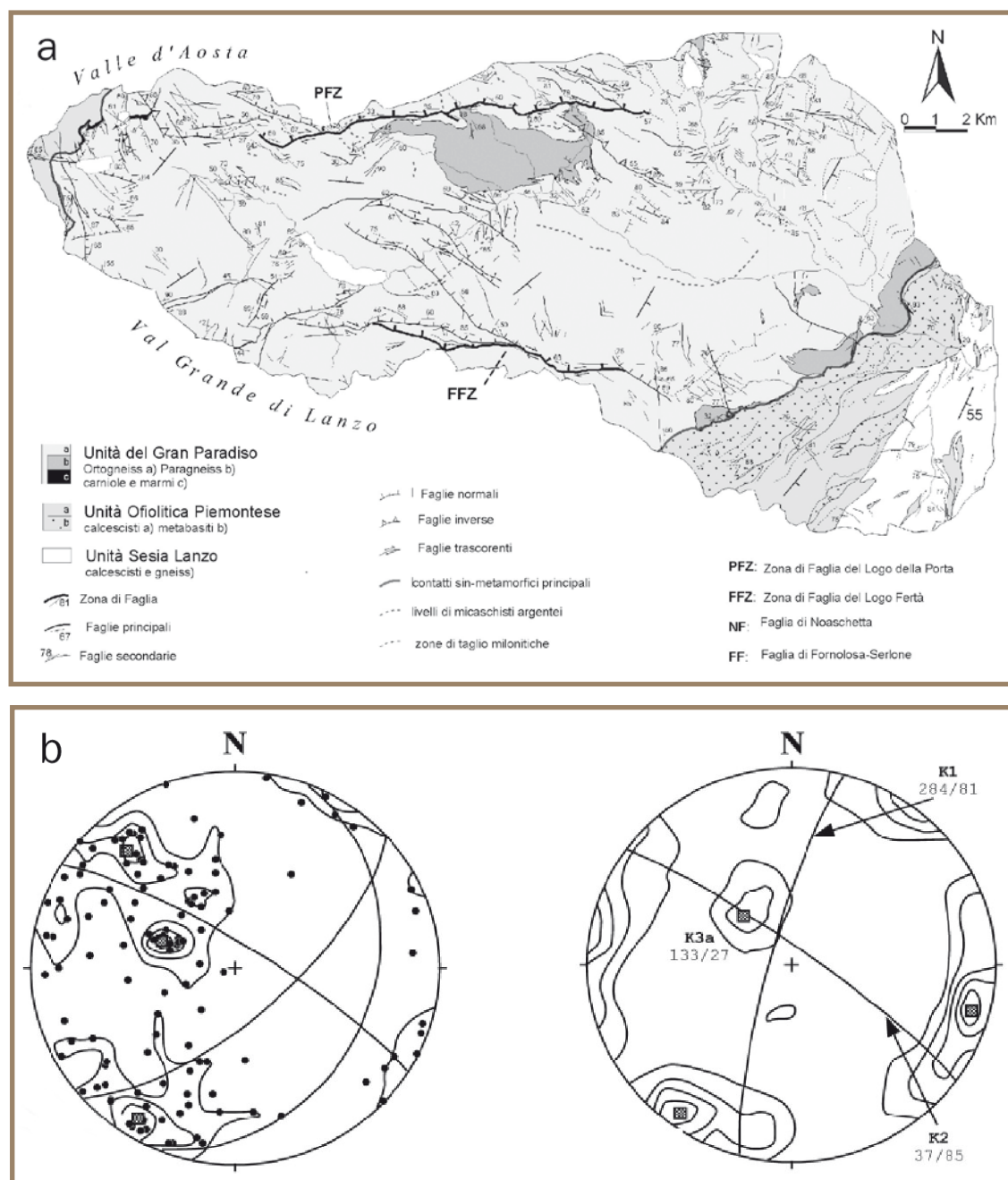
(in prossimità della traccia del singolo lineamento) e riferendosi all'intera area di indagine con analisi di tipo distributivo.

Al fine di validare il dato lineamentare sono stati presi in considerazione studi effettuati nel dominio Gran Paradiso che hanno utilizzato il telerilevamento come strumento rivolto all'individuazione di lineamenti e alla loro caratterizzazione geologica a scala regionale (Bonnard *et al.*, 2004; Perello *et al.*, 2004).

Sulla base delle corrispondenze riconosciute, sia in termini geometrico-gerarchici sia statistico distributivi, tra lineamenti e strutture geologiche, il dato lineamentare è stato ritenuto rappresentativo dello stato di fratturazione reale ed estrapolato alle diverse scale (da scala locale a scala regionale e viceversa) (confronta le **figure 2.2.3 e 2.2.4**).

Partendo quindi da questa validazione si è addotta l'ipotesi che in corrispondenza delle zone a maggiore densità di lineamenti ci sia una maggiore destrutturazione dell'ammasso roccioso, si è cercato, sfruttando la proprietà di invarianza della scala delle strutture geologiche, di mettere in relazione le evidenze satellitari con quelle a scala locale.

Figura 2.2.4 (a) Schema geologico strutturale della valle Orco; (b) diagrammi di Schmidt equal-area; i dati corrispondono a faglie e giunti osservati a scala mesoscopica (da Bonnard *et al.*, 2004)



2.3 SVILUPPO DELLA METODOLOGIA PER LA RACCOLTA DATI

Claudia Borgarello, Daniele Bormioli, Luca Mallen, Luca Lanteri - Arpa Piemonte

Il presente paragrafo illustra la metodologia di terreno operativa utilizzata per il rilievo geomeccanico-strutturale delle pareti rocciose, dei cinematismi e dei pendii delle valli alpine ed intende fornire alcuni consigli pratici sulle modalità di analisi dei crolli in roccia.

A livello generale la prima discriminante da considerare ha riguardato la variabile morfologia delle vallate alpine piemontesi: infatti, se da un lato si hanno valli relativamente ampie con pareti rocciose molto inclinate difficili da raggiungere, ma facilmente analizzabili a piccola scala grazie a ampie visuali dei versanti (es. valle Orco), dall'altro è facile trovare valli più anguste, dalle pareti verticali a strapiombo sulle vie di comunicazione che permettono una visione delle caratteristiche strutturali a scala dell'affioramento, ma non a scala di versante (es. valli di Lanzo e valle Tanaro).

In seconda analisi, per quanto riguarda il rilievo dei singoli cinematismi, occorre sottolineare che in uno studio a piccola scala, quale quello previsto dal progetto, la definizione degli stessi tende a essere sovrastimata rispetto alla realtà, in quanto il rilevatore tende a individuare i cinematismi caratterizzati da dimensioni maggiori e quindi ben visibili, anche se difficilmente mobilizzabili proprio in virtù dei loro volumi. Viceversa, lo studio a scala dell'affioramento tende a sottostimare i cinematismi presenti in parete a causa delle ridotte dimensioni dello stesso.

Si sottolinea nuovamente che tutte le valutazioni sono state effettuate ignorando la presenza di opere di difesa da caduta massi sia di tipo attivo che passivo, installati dagli enti responsabili della sicurezza del tratto di rete viaria considerato. Tale aspetto, infatti, esula dagli scopi del progetto PROVIALP e richiede una valutazione critica delle opere, non realizzabile in base al tempo e agli elementi a disposizione dei rilevatori del progetto.

Il confronto tra le risultanze delle valutazioni effettuate mediante la metodologia speditiva proposta nel progetto PROVIALP e gli effetti delle opere esistenti è quindi demandato agli enti che volessero applicare la metodologia stessa.

2.3.1 Aspetti geometrici dei crolli

Lo studio della caduta massi risulta normalmente complesso in quanto il fenomeno è spesso difficile da prevedere nello spazio e nel tempo, alcuni dei fattori che devono essere considerati sono di difficile quantificazione diretta (come i coefficienti di restituzione, l'angolo d'attrito dinamico, ecc.) ed altri possono variare nel tempo (come la stabilità dei blocchi, le condizioni del pendio, ecc.).

Le indagini relative alla parete di distacco hanno lo scopo primario di definire i modelli geologico, geologico-tecnico e di circolazione delle acque dell'ammasso roccioso costituente il versante nella zona di distacco, eventualmente distinguendo sul versante stesso aree omogenee dal punto di vista progettuale. Data la speditività del metodo messo a punto, nel progetto in esame si è concentrata l'attenzione sul modello geologico-tecnico delle pareti esaminate, tralasciando gli aspetti idraulici che avrebbero richiesto rilievi di dettaglio non adeguati a scala di valle.

Le indagini devono essere estese a un volume significativo di versante, intendendo per volume significativo l'ambito entro il quale potranno verificarsi variazioni significative dello stato tensionale naturale o delle condizioni idrauliche o di quelle idrogeologiche a seguito della realizzazione delle opere in progetto.

Il rilievo della parete di distacco deve comprendere i seguenti gruppi di caratteristiche:

- geometriche;
- di dinamica geomorfologica;
- geologico-tecnico;
- relative alla eventuale presenza di copertura vegetale.

Il rilievo geometrico/topografico della parete consente un rilievo plano-altimetrico in scala adeguata ed esteso almeno al volume significativo della parete. Il rilievo delle condizioni relative alla dinamica geomorfologica contiene l'ubicazione delle zone di distacco di eventi già manifestatisi, l'ubicazione di ogni segno

premonitore di eventi franosi di qualunque tipologia, tutti gli indizi di instabilità, movimenti relativi, rotture, deformazioni, modificazioni sulla parete in esame. L'acquisizione delle caratteristiche geologico-tecniche della parete rocciosa rientra nelle attività diagnostiche diffusamente note come "rilievi geomeccanici" e alla cui letteratura si rimanda per una descrizione più dettagliata.

Il rilievo relativo alla eventuale presenza di copertura vegetale comprende la distribuzione della copertura arborea ed arbustiva, la classificazione delle tipologie di essenze vegetali presenti, indicazioni circa l'eventuale ruolo negativo dell'azione degli apparati radicali di altofusti ed arbusti, indicazioni circa l'eventuale ruolo positivo dell'azione di contenimento della vegetazione.

I contenuti minimi del rilievo geologico-tecnico da svolgere lungo il versante a valle della parete di distacco devono comprendere i seguenti gruppi di caratteristiche:

- *Geologiche*. Il rilievo geologico mette in luce la litologia e la distribuzione degli affioramenti rocciosi, la natura e distribuzione dei terreni di copertura e indicazioni sullo spessore degli stessi, la presenza e distribuzione del suolo vegetale, la morfologia del pendio e i fenomeni attivi di dinamica geomorfologica.
- *Topografiche*. Il rilievo topografico del versante roccioso e del pendio deve essere svolto a una scala ed a un dettaglio tali da consentire la ricostruzione sufficientemente accurata del sito, anche in vista della realizzazione di un modello di calcolo.
- *Geomeccaniche*. L'analisi delle caratteristiche geomeccaniche riguarda il rilievo della parete di distacco ed è finalizzata alla definizione della giacitura delle famiglie di discontinuità principali ed alle loro caratteristiche di cui le più importanti sono: spaziatura, apertura, presenza di materiale di riempimento, resistenza, persistenza, rugosità. Inoltre tale studio è volto all'individuazione delle caratteristiche di suddivisione dell'ammasso roccioso considerato nel suo insieme, rappresentate dal volume roccioso unitario, dall'intercetta delle discontinuità, dal volume mobilizzabile possibile.
- *Relative all'uso del suolo*. Il rilievo dell'uso del suolo deve mettere in evidenza la presenza e distribuzione della vegetazione e di qualunque elemento che possa influire sul distacco e sul moto dei blocchi.
- *Legate alla circolazione delle acque superficiali e sub-superficiali*. Il rilievo delle condizioni di circolazione delle acque superficiali e sub-superficiali deve contenere il tracciamento dei percorsi delle vie d'acqua superficiali, con indicazioni circa le portate e il regime delle stesse, l'ubicazione di eventuali zone di alimentazione sulla parete o a monte di questa, l'ubicazione di eventuali venute d'acqua, con indicazioni circa le portate ed il regime e la presenza di eventuali falde libere o in pressione.

Tutte le indagini di cui sopra dovranno portare, tra l'altro, alla stima della tipologia di movimento più probabile per i blocchi in caduta lungo i diversi tratti del versante, tenendo conto anche di quanto emerso dal rilievo geomeccanico, e alla definizione dei coefficienti di restituzione normale e tangenziale al pendio e dell'angolo d'attrito dinamico.

I crolli in roccia si verificano in corrispondenza di pareti rocciose sub-verticali o molto inclinate determinando distacchi di parti rocciose di forma variabile, ma sempre sostanzialmente individuate dall'andamento delle discontinuità naturali preesistenti (giunti). Essi si verificano, in genere, su scarpate rocciose formate da rocce compatte, con buone caratteristiche geomeccaniche, dove si manifestano come distacchi sub-verticali delimitati da superfici piane, semplici o composite.

In **figura 2.3.1** è rappresentato schematicamente un versante roccioso con inclinazione media di 80° e altezza di 50 m, sul quale sono indicati alcuni tipici fenomeni di distacco di volumi rocciosi instabili (Paronuzzi e Serafini, 2003).

In questo schema sono rappresentati i fenomeni di caduta di piccoli volumi rocciosi (A), i crolli di roccia parietali (B,F), il distacco di blocchi con geometria a cuneo (D,E), il crollo di lastre rocciose aggettanti (C), il collasso di grandi pareti rocciose sub-verticali, comprendendo rotture di versante con volumi variabili da pochi decimetri cubi (A) a centinaia di migliaia di metri cubi (G). Gli scivolamenti possono avvenire su una superficie piana principale (rottura piana: casi B ed F) o su superfici basali di distacco formate da due piani inclinati convergenti (rottura a cuneo: casi D ed E).

La probabilità di rottura è valutata ipotizzando che le discontinuità presenti nelle pareti rocciose abbiano una

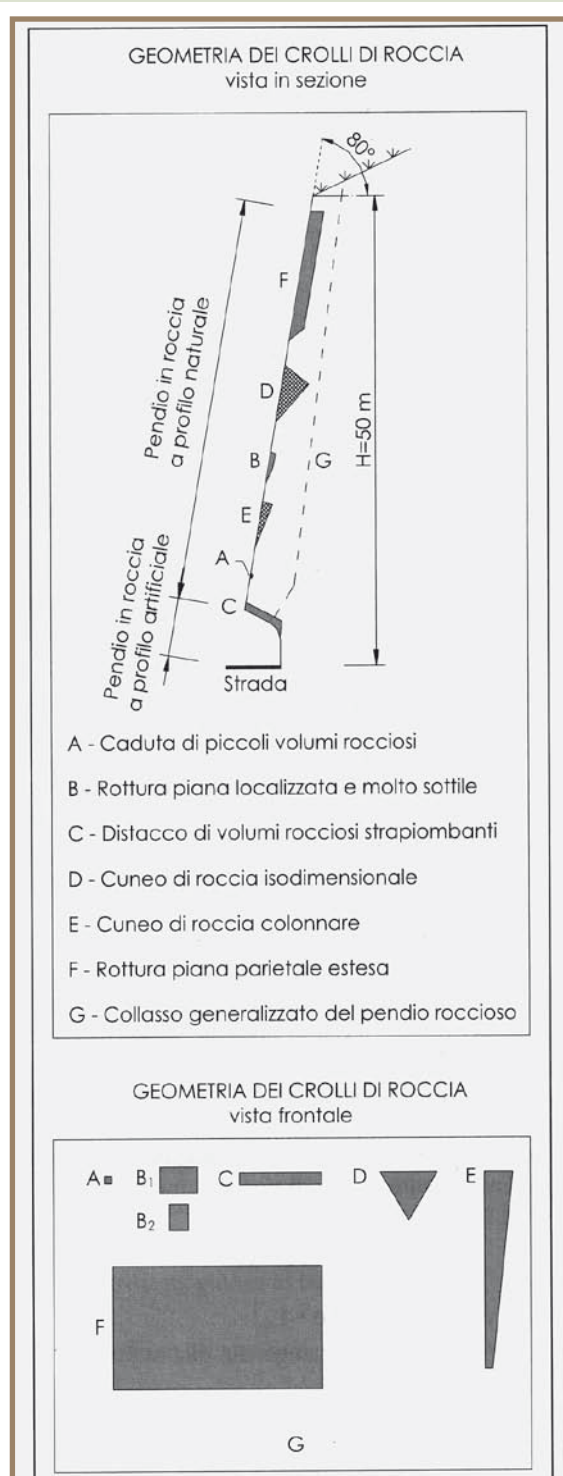


Figura 2.3.1 Caratteristiche geometriche dei crolli e condizioni di distacco più frequenti di blocchi che cadono da una parete rocciosa subverticale (Paronuzzi e Serafini, 2003)

Viene, infine, prevista la delimitazione di un'ulteriore area omogenea (*Area Omogenea di tipo 0*) che rappresenta la porzione di versante in cui i blocchi vanno prima a impattare e nell'ambito della quale si sviluppa il movimento dei blocchi stessi. Tale area prevede una descrizione caratteristica specifica a cui verrà dato ampio spazio nei capitoli seguenti.

lunghezza infinita. L'intersezione reciproca tra le varie famiglie con i fronti locali individua diverse tipologie di cinematismi. La valutazione della probabilità di rottura è determinata variando in modo statistico i giunti di ogni cinematismo ipotizzando coesione zero e angolo di attrito costante (30°). Il rilevamento di terreno è quindi volto alla determinazione della giacitura delle famiglie principali di giunti attraverso la misura della direzione dell'immersione rispetto al nord magnetico, della inclinazione e della spaziatura. Per ogni area omogenea sono individuati i principali cinematismi; tali cinematismi sono caratterizzati attraverso la misura dei giunti che li delimitano, del fronte locale, la tipologia di movimento (scivolamenti planari e a cuneo, ribaltamento), il volume e la forma.

2.3.2 La metodologia

Come primo passo si è adottata la scelta di frammentare i versanti da esaminare sulla base del grado di approfondimento con cui era possibile effettuare lo studio, tenendo conto della speditività del metodo e della lontananza fisica dell'operatore dalla parete.

Sono state quindi individuate una serie di aree definite di seguito **Area Omogenee** caratterizzate dall'avere un assetto strutturale omogeneo e una costante orientazione del fronte rispetto alla valle principale.

I tipi di aree omogenee individuati sono i seguenti:

- *Area Omogenee di tipo 1*: corrispondono a pareti ben visibili dal fondo valle, senza presenza di vegetazione a alto fusto, la cui base può essere facilmente raggiunta per l'effettuazione delle misure; in tal caso l'analisi può essere realizzata alla scala dell'affioramento e successivamente estrapolata criticamente all'intera parete, a cui è sempre, comunque, seguita un'analisi a grande scala delle principali famiglie di discontinuità presenti sul versante. Si effettua, quindi, un rilievo geostrutturale classico e si rilevano i singoli cinematismi definendone geometria e dimensioni.
- *Area Omogenee di tipo 2*: corrispondono a porzioni di versante con pareti di roccia prevalenti rispetto alla vegetazione ma la cui base non è agevolmente raggiungibile; in questo caso lo studio viene svolto "a distanza" e permette una visione complessiva del versante a scala di valle. Su queste pareti è possibile individuare le principali famiglie di discontinuità e i cinematismi più evidenti.
- *Area Omogenee di tipo 3*: corrispondono a zone che non si prestano a uno studio speditivo perché non risulta possibile effettuare misurazioni attendibili a causa di eccessiva distanza dall'operatore, abbondanza di vegetazione, sistemi di discontinuità di difficile misurazione, ecc.

Si propone di seguito una metodologia da applicare alle aree di tipo 1 e 2 precedentemente definite. Al fine di rendere più agevole la raccolta dati per il progetto, è stata predisposta una scheda di terreno che comprende i parametri generali dell'area omogenea, gli elementi strutturali e i singoli cinematismi. Tale scheda è stata definita sulla base del database alfanumerico realizzato per il progetto e di cui verrà data descrizione nel capitolo 2.3.4.

Il progetto ha comportato il rilievo geomeccanico-strutturale delle pareti rocciose e dei singoli cinematismi a cui si è giunti attraverso i seguenti passaggi:

- attraverso l'analisi storica e l'utilizzo del programma Skyline sono stati individuati i settori delle valli maggiormente soggetti, in passato, a caduta massi e per i quali era nota una certa attività del fenomeno; tali settori sono stati individuati a tavolino tracciando sulla CTR (Carta Tecnica Regionale) a scala 1:10 000 un contorno fittizio sulla base dell'andamento delle curve di livello e della morfologia a piccola scala;
- sono state definite preliminarmente alcune stazioni fotografiche in corrispondenza dei settori individuati. La scelta delle stazioni è stata effettuata considerando facilità e comodità di accesso e ubicazione più frontale possibile rispetto al settore; a una stazione fotografica possono corrispondere più settori mentre nel caso di settori estesi potranno essere previste più stazioni di ripresa;
- direttamente sul terreno è stato accertato che i settori e le stazioni fotografiche fossero adeguati alla tipologia della valle, apportando le eventuali correzioni, di dimensioni (per i settori) e quantità (numero di stazioni), richieste dalla morfologia della stessa. Durante questo primo sopralluogo è stato definito il contesto morfologico della valle andando a considerare tutti i settori la cui evoluzione può interferire con le vie di comunicazione. Infatti, in alcuni casi, i dati preliminari sono stati integrati con quelli di terreno fin da questa prima uscita poichè in alcuni casi piccole pareti rocciose, seppure di rilievo per la loro ubicazione rispetto alla strada, non sono state evidenziate dal semplice incrocio dei temi poligonali e dei dati storici precedentemente descritti;
- direttamente sul terreno sono state riconosciute, all'interno dei settori precedentemente definiti, le aree omogenee a diverso grado di approfondimento che sono state riportate su un estratto CTR in scala 1:10 000. All'interno di ogni settore le aree omogenee possono essere rappresentate da una singola area o da più aree, contraddistinte da uguale o differente grado di approfondimento;
- per ciascun settore sono state realizzate una serie di fotografie panoramiche per mettere in evidenza le relazioni morfologiche tra il versante nel suo complesso e le aree individuate. Successivamente, per ogni Area Omogenea sono state realizzate fotografie panoramiche e di dettaglio (a discrezione dell'operatore) per evidenziare i principali aspetti inerenti l'argomento trattato, ad esempio sistemi di discontinuità, faglie, cinematismi, ecc. La ripresa delle fotografie è stata realizzata, per quanto possibile, in modo ortogonale rispetto alla parete, in modo da evidenziare la dinamica dei cinematismi in rapporto alla strada sottostante. Nei casi in cui ciò non è stato possibile, si è cercato di individuare punti di ripresa che permettessero di evidenziare il ruolo delle famiglie di discontinuità in rapporto alla stabilità della parete.

Generalità dell'Area Omogenea

Nella prima fase del rilevamento si è cercato di raccogliere tutte le informazioni utili a identificare le aree omogenee all'interno della valle in esame anche sulla base dell'azione di operatori diversi.

Sono state quindi riportate sulla scheda di rilevamento, per ogni area individuata le indicazioni riguardanti:

- data, ora e località del sopralluogo utilizzando i toponimi riportati sulla CTR a scala 1:10 000;
- il punto di osservazione da cui sono state scattate le fotografie;
- la tipologia di area omogenea (Area di tipo 1 – 2 – 3).

Inoltre sono state riportate le indicazioni relative alla geometria e alle condizioni della parete, necessarie per la valutazione della stabilità:

- L'orientazione media della parete associata al grado di variabilità.
- La presenza di blocchi di varia forma (prismatica, tabulare, irregolare) in parete, associata a un volume medio e massimo espresso in metri cubi; in questo caso sono stati considerati i blocchi effettivamente delimitati da discontinuità e dalla forma ben evidente. Il volume medio è stato tarato attraverso l'analisi comparata dei blocchi presenti alla base della parete e nell'intorno in esame.
- La tipologia di ammasso.
- Il grado di fratturazione che esprime, in termini quantitativi, l'assetto geomeccanico e strutturale dell'affioramento considerato. Il grado di fratturazione è un parametro di difficile valutazione, legato

soprattutto alla sensibilità personale del rilevatore nell'analizzare visivamente e speditamente l'affioramento (Baggio *et al.*, 1997).

- Il grado di alterazione descritto facendo riferimento alla terminologia proposta dall'ISRM (1978) tramite i seguenti termini:
 - fresco. Non sono presenti segni di alterazione; lievi decolorazioni sulle superfici delle discontinuità principali;
 - leggermente alterato. La decolorazione indica alterazione del materiale roccioso e delle superfici di discontinuità. Tutto il materiale roccioso può essere decolorato per alterazione ed essere esternamente più debole rispetto alle condizioni non alterate;
 - moderatamente alterato. Meno della metà della roccia è decomposta e/o disintegrata. È presente roccia decolorata o non alterata sia arealmente sia localmente;
 - fortemente alterato. Più della metà della roccia è decomposta e/o disintegrata. È presente roccia decolorata o non alterata sia arealmente sia localmente;
 - completamente alterato. Tutto il materiale roccioso è decomposto e/o disintegrato. L'originaria struttura è ancora in buona misura intatta;
 - suolo residuale. Tutto il materiale roccioso si è trasformato in suolo. La struttura generale e la tessitura del materiale è distrutta. Notevoli variazioni di volume, ma il terreno non ha praticamente subito trasporto.
- La resistenza; valutazione, del tutto indicativa, della resistenza a compressione uniassiale della roccia. Si fa riferimento alla classe litotecnica determinabile dal *Manual Index Test* proposto dall'ISRM (1978):
 - estremamente debole. Scalfito dall'unghia del pollice;
 - molto debole. Si sbriciola sotto colpi decisi con la punta del martello. Si graffia con il coltello;
 - debole. Graffiata con difficoltà dal coltello. Piccole scalfitture provocate da colpi decisi con la punta del martello;
 - mediamente resistente. Non può essere scalfita né graffiata dal coltello. Un campione può fratturarsi con un singolo colpo del martello;
 - resistente. Un campione richiede più di un colpo di martello per fratturarsi;
 - molto resistente. Un campione richiede molti colpi di martello per fratturarsi;
 - estremamente resistente. Un campione può solo essere scheggiato col martello.

Il campo note ha permesso di riportare considerazioni significative sull'area in esame quali la presenza di opere di difesa, la modifica del tracciato stradale, la presenza di anomalie nell'intorno considerato.

Si sottolinea come il rilievo dei parametri relativi alle condizioni della parete sia stato eseguito da ogni operatore sulla base della propria esperienza e in funzione della distanza dalla parete. Non in tutte le aree di tipo 2 tale analisi è stata eseguita (almeno non per tutti i campi) proprio a causa dell'impossibilità di accedere alle pareti.

Rilievo geomeccanico-strutturale e dei cinematismi

La caratterizzazione geomeccanica delle pareti rocciose ha comportato come primo punto l'individuazione dei piani di discontinuità in numero sufficientemente ampio da permettere una loro idonea classificazione. Questo lavoro è stato svolto per ogni area omogenea precedentemente individuata. Successivamente le discontinuità individuate sono state raggruppate in famiglie (es. K1, K2, K3, ecc.) per quanto possibile coerenti a scala di valle, in modo tale che ogni famiglia avesse sempre gli stessi valori di giacitura.

Per evitare una dispersione dei valori di giacitura troppo elevata e una conseguente frammentazione delle famiglie in sottofamiglie, si è optato per un divario tra i valori minimi e massimi di immersione e inclinazione di 30°. Infatti, sebbene nei rilievi geologico-strutturali di parete, il divario tra questi valori non superi i 20°, tale incremento è stato preferito in virtù del fatto che, per le aree di tipo 2, non sempre il rilevatore è stato in grado di effettuare misure adeguate sui giunti, soprattutto per quel che riguarda l'inclinazione. Nei casi più significativi, i vari piani sono stati riportati su una serie di fotografie rappresentative della parete. Successivamente si è passati all'individuazione dei principali cinematismi presenti in parete distinguendo

tra cinematismi a cuneo, planare, ribaltamento e distacco puro. Per ognuno dei cinematismi individuati si sono definiti i piani di origine e la loro funzione, specificando i piani di scivolamento e i giunti di trazione. Si sottolinea come, nei rilievi non adiacenti alla parete, spesso questo parametro sia stato uno dei più difficili da quantificare in quanto non direttamente visibile al rilevatore. Inoltre, per ogni cinematismo sono state rilevate le caratteristiche geometriche (altezza, larghezza e profondità) e di orientazione locale del fronte rispetto al quale il cinematismo si origina.

Poiché non sempre sono rilevabili tutti i cinematismi presenti sulla parete (o almeno i principali), i dati così ricavati sono stati confrontati con quelli ottenuti a posteriori dal plottaggio delle famiglie individuate attraverso un software *freeware* predisposto. L'utilizzo delle proiezioni stereografiche ha confermato in larga parte i rilievi di terreno mentre le situazioni discordanti e/o dubbie sono state ulteriormente verificate per una completa caratterizzazione della parete.

2.3.3 Caratterizzazione del pendio

Ai fini dell'analisi cinematica effettuata con il programma ROTOMAP® (Geo&Soft International, 2003), la caratterizzazione del pendio, relativa alle aree di tipo 0, è indispensabile per il calcolo dell'interazione tra massi e versante e necessita di una descrizione dettagliata per la definizione dei coefficienti di restituzione richiesti dal programma.

Le aree di tipo 0 sono state caratterizzate dal punto di vista di:

- tipo di pendio;
- tipo di vegetazione;
- densità di vegetazione;
- sistemazioni agrarie.

Ognuno di questi argomenti è stato ulteriormente suddiviso in varie tipologie a cui sono associati i coefficienti di restituzione necessari al programma. Lo scopo ultimo è suddividere le aree di tipo 0 in poligoni a cui vanno attribuiti i valori dei coefficienti di restituzione propri di ogni tipologia di superficie. Questi coefficienti verranno successivamente sommati tra loro per dare origine a un unico coefficiente di restituzione proprio del poligono. Per la valutazione dei coefficienti, il punto di partenza concettuale è stata l'analisi condotta da Arpa Piemonte nel 2003 all'interno del progetto dal titolo "Messa a punto di una metodologia per la determinazione della pericolosità dovuta a crolli in roccia", in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino e la SEA Consulting s.r.l.

Valutazione dei coefficienti

I coefficienti necessari per l'analisi cinematica della caduta massi sono i coefficienti di restituzione e di rotolamento.

La metodologia di valutazione dei coefficienti di restituzione e di rotolamento è stata concepita per:

- basarsi su informazioni generali riguardo la tipologia (reologia) dei pendii in cui si verificano i processi di rotolamento e di rimbalzo, che derivano da cartografie già a disposizione integrate con nuovi rilievi;
- essere facilmente usufruibile e maneggiabile con strumenti GIS durante le fasi di taratura dei coefficienti;
- fornire risultati compatibili con i dati di letteratura e con i dati disponibili.

Il soddisfacimento contemporaneo dei punti precedenti ha implicato un'analisi dettagliata dei parametri che influenzano maggiormente i processi di rimbalzo e di rotolamento. Per ognuno dei fattori sopra riportati, sono stati distinti i seguenti campi:

- tipo di pendio: aree urbanizzate/strade asfaltate, suolo, detrito fine, detrito medio, detrito a grossi blocchi, roccia;
- tipo di vegetazione: assente/strade, alberi a alto fusto (bosco), arbusteti, arati e sistemi particellari complessi (campi, orti, giardini, ecc.);
- densità di vegetazione: assente, molto densa, mediamente densa, poco densa;
- sistemazioni agrarie: assenti, terrazzamenti.

Coefficienti di restituzione

Il coefficiente di restituzione K è legato principalmente alla litologia e alla morfologia del versante e viene definito come il rapporto fra la velocità di un blocco prima e dopo l'urto (V_i/V_0 dove V_i è la velocità dopo l'urto e V_0 quella prima dell'urto).

Il coefficiente K è uguale a 0 nel caso di un urto completamente anelastico (tutta l'energia cinetica del blocco impattante viene dissipata sotto forma di calore o in energia di frantumazione e la velocità del masso dopo l'urto è uguale a 0), è uguale a 1 nel caso di urto completamente elastico (tutta l'energia cinetica viene conservata ed il masso avrà una velocità dopo l'impatto uguale a quella precedente l'urto, cioè $V_i = V_0$) ed è compreso fra 0 e 1 nel caso di urto parzialmente elastico (parte dell'energia cinetica viene conservata e parte dissipata sotto forma di calore; la velocità del masso sarà data da $V_i = K \cdot V_0$).

Volendo distinguere le componenti normale e tangenziale della velocità del blocco in caduta, si possono definire i parametri K_n e K_t (coefficienti di restituzione normale e tangenziale) come segue:

$$K_n = \frac{V_{1n}}{V_{0n}} \quad K_t = \frac{V_{1t}}{V_{0t}} \quad (2.3.1) \text{ e } (2.3.2)$$

dove:

V_{1n} velocità normale (perpendicolare alla superficie topografica) del masso dopo l'urto

V_{0n} velocità normale (perpendicolare alla superficie topografica) del masso prima dell'urto

V_{1t} velocità tangenziale (parallela alla superficie topografica) del masso dopo l'urto

V_{0t} velocità tangenziale (parallela alla superficie topografica) del masso prima dell'urto

Angolo di attrito masso-versante

Nei tratti di pendio in cui il masso si muove rotolando o scivolando, l'energia cinetica viene dissipata attraverso l'attrito che si sviluppa fra blocco e versante. Tale attrito viene introdotto nel calcolo attraverso il parametro "angolo d'attrito masso-versante". Nel caso di un blocco che rotola generalmente l'angolo d'attrito possiede valori compresi fra 20° e 35°, con valori inferiori corrispondenti ai tratti di rotolamento lungo pendii in roccia e privi di scabrezza. Nel caso di un blocco che scivola (per es. nel caso di un masso lastriforme che si muove tenendo a contatto con il terreno la faccia arealmente più estesa), il valore dell'angolo di attrito è superiore.

Peso del tipo di pendio sui coefficienti di restituzione e rotolamento

La tipologia del pendio è un parametro utilizzato necessariamente nella totalità dei lavori dedicati alla caduta massi.

L'idea generale consiste nell'assumere che superfici poco dure e/o soffici assorbano meglio l'energia del rimbalzo; in tal caso l'energia/velocità in uscita è molto più bassa di quella in entrata e quindi, a parità di massa, il blocco tende a ridurre in modo consistente la velocità fino ad arrestarsi.

Le superfici dure, viceversa, assorbono meno energia, la velocità del blocco si riduce di meno e ne deriva che il blocco tende ad arrestarsi meno facilmente.

Il valore dei coefficienti dipende, inoltre, dal dettaglio con cui si conoscono l'andamento topografico del pendio, la forma e il volume del blocco e la relazione tra la scabrezza del pendio e la dimensione del blocco. Dal momento che risulta quasi impossibile conoscere l'esatta forma e l'esatto volume di tutti i massi che si possono staccare ed è, oltretutto, impossibile prevedere l'energia d'impatto necessaria per fratturare il blocco (molto spesso i massi si arrestano per eccessiva frantumazione), ne consegue che il dettaglio di conoscenza del pendio è un parametro molto importante, facilmente acquisibile rispetto alla determinazione della forma e del volume del blocco, nonostante non si possa andare oltre un certo dettaglio per descrivere numericamente il pendio.

Nelle simulazioni numeriche, in generale, più la topografia del pendio è dettagliata più i massi risentono delle piccole ondulazioni e più tendono a percorrere la distanza effettiva. Purtroppo, il carattere speditivo

del metodo e l'utilizzo del DTM attualmente a disposizione consentono di conoscere il pendio con un dettaglio di circa 10 m e non è, quindi, possibile scendere al di sotto di tale valore, se non considerando in modo indiretto la presenza di terrazzamenti e ciglionamenti, spesso indicati dalle carte topografiche solo attraverso simboli.

Il tipo e il grado di densità della copertura vegetale e il grado di scabrezza del pendio rispetto alla dimensione del blocco influenzano soprattutto il coefficiente di rotolamento; in effetti un blocco di piccole dimensioni (diametro di circa 10-20 cm) fa molta fatica a rotolare in un campo di detrito di pezzatura maggiore (diametro di 1-2 m).

Purtroppo non conoscendo la forma e il volume dei massi solitamente si usa solo la scabrezza del pendio, che dipende dalla geologia (detrito fine, grossolano, suolo, roccia, ecc.), dalla tipologia e dal grado di densità della copertura vegetale. In particolare, la tipologia di vegetazione influenza molto il rotolamento, basti pensare alla differenza di attrito tra un pendio a prato (poco attrito) ed uno boscato (attrito maggiore); inoltre a parità di tipologia il rotolamento dipende anche dal grado di densità della vegetazione (un bosco fitto contrasta maggiormente il rotolamento rispetto a un bosco molto rado).

Appare evidente che il tipo di pendio *TP*, la presenza o l'assenza di sistemazioni agrarie *SA*, il tipo *TV* e densità *DV* della copertura vegetale rappresentano i parametri principali per la determinazione dei coefficienti di restituzione e di rotolamento. Tali parametri sono legati da relazioni causa-effetto, evidenziate nel grafico di **figura 2.3.2**.

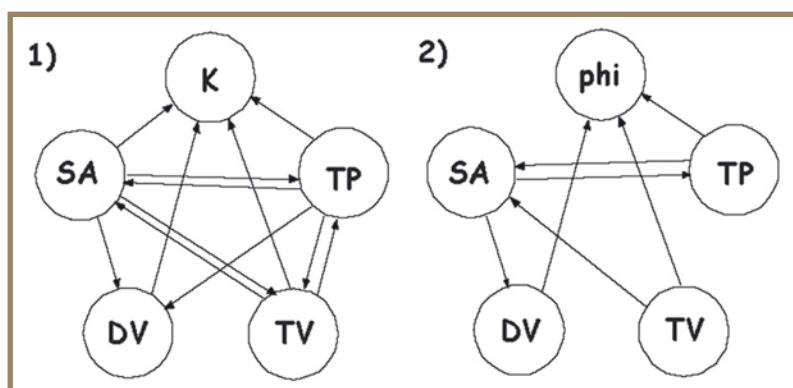


Figura 2.3.2 Grafici indicanti le relazioni causa effetto nel processo di rimbalzo (1) e rotolamento (2) (*K* = coefficiente di restituzione; *phi* = coefficiente di rotolamento; *SA* = sistemazioni agrarie; *DV* = densità della copertura vegetale; *TV* = tipo di copertura vegetale; *TP* = tipo pendio)

Valore	Influenza
0.00	Nulla
0.25	Bassa
0.50	Media
0.75	Elevata
1.00	Critica

Tabella 2.3.1 Valori assegnati alle relazioni binarie (metodo semi-quantitativo)

La Teoria dei Sistemi permette di quantificare l'effetto che ciascun parametro determina sul sistema stesso. Tale approccio parte dalla definizione delle relazioni binarie di "causa" ed "effetto" che coinvolgono i parametri del sistema (Hudson, 1992). L'evoluzione naturale di un tale tipo di approccio è costituito dal *Fully Coupled Model* (FCM) elaborato da Jiao e Hudson (1995) che, a partire dalle relazioni dirette, coinvolgenti ciascuna coppia di parametri, risale ai meccanismi globali che governano il sistema in esame. Il FCM si adatta alla complessità e all'interazione dei vari meccanismi caratterizzanti i processi di rimbalzo e di rotolamento che non potrebbero essere completamente e semplicemente rappresentati da metodi deterministici.

Una notevole semplificazione deriva dalla peculiarità della teoria dei sistemi, in cui l'importante è conoscere l'interazione globale dei vari processi e non è necessario conoscere le leggi deterministiche che regolano i singoli processi tra coppie di variabili. Nel presente lavoro, le influenze tra coppie di parametri sono state esplicitate attraverso un approccio di tipo semi-quantitativo e le **tabelle 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3** illustrano le relazioni binarie considerate e il valore loro assegnato.

Il valore assegnato alle relazioni binarie tra i parametri principali varia tra 0 e 1. Valori nulli indicano nessuna influenza, valori pari a 1 indicano massima influenza. Si è arbitrariamente scelto di dividere linearmente il campo di variazione in 5 valori (**tabelle 2.3.2 e 2.3.3**):

Relazione binaria	Descrizione	Valore
SA influenza K	Influenza indiretta. Si assume che la pendenza del tratto considerato sia più bassa per effetto dei terrazzamenti/cigionamenti	0.50
SA influenza TP	In genere le superfici terrazzate sono prive di blocchi	0.25
SA influenza TV	In genere la vegetazione cresce meglio in aree meno pendenti perché c'è più suolo e l'infiltrazione è maggiore	0.75
SA influenza DV	In genere la densità della vegetazione è maggiore nelle aree pianeggianti (terrazzate)	0.25
DV influenza K	Eventuali rimbalzi in un bosco fitto possono essere inibiti dai fusti	0.25
TV influenza K	Eventuali rimbalzi in un bosco fitto possono essere inibiti dai fusti	0.25
TV influenza TP	La presenza di fogliame ed erba in decomposizione rende più soffice il pendio	0.25
TP influenza K	La tipologia di pendio influenza fortemente K	1.00
TP influenza SA	Le SA vengono eseguite solo su certe pezzature e dove il detrito ha suolo mentre mancano in roccia e su detrito a grossi blocchi	0.75
TP influenza DV	In genere un detrito a grossi blocchi avrà vegetazione più rada	0.75
TP influenza TV	In genere la granulometria del pendio influenza la copertura vegetale (più è fine più la crescita della vegetazione è favorita). Pendii in roccia sono scarsamente vegetati	0.75

Tabella 2.3.2 Relazioni binarie causa/effetto tra i parametri principali che influenzano i coefficienti di restituzione (SA = sistemazioni agrarie; DV = densità copertura vegetale; TV = tipo di copertura vegetale; TP = tipo pendio)

Relazione binaria	Descrizione	Valore
SA influenza TP	In genere la scabrezza delle superfici terrazzate è minore rispetto a quella delle aree circostanti	0.25
SA influenza TV	In genere la vegetazione cresce meglio in aree meno pendenti perché l'infiltrazione è maggiore	0.25
SA influenza DV	In genere la densità della vegetazione è maggiore nelle aree pianeggianti	0.50
DV influenza Phi	Il rotolamento in un bosco fitto è impedito dai fusti	0.75
TV influenza Phi	Eventuali rimbalzi in un bosco possono essere inibiti dai fusti	
TP influenza Phi	La tipologia di pendio influenza fortemente Phi	1.00
TP influenza SA	Le SA vengono eseguite solo su certe pezzature e dove il detrito ha suolo mentre mancano in roccia e su detrito a grossi blocchi	0.25

Tabella 2.3.3 Relazioni binarie causa/effetto tra i parametri principali che influenzano il coefficiente di rotolamento (SA = sistemazioni agrarie; DV = densità copertura vegetale; TV = tipo di copertura vegetale; TP = tipo pendio)

Definiti i parametri principali x del sistema esaminato, il *Fully Coupled Model* procede alla determinazione di tutte le relazioni dirette intercorrenti fra essi. Trattandosi di relazioni dirette, il meccanismo attraverso il quale x_i influenza x_j ha la forma:

$$x_j = f_{i,j}(x_i) \text{ se } i \neq j \quad (2.3.3)$$

$$x_i = x_j \text{ se } i = j \quad (2.3.4)$$

Viceversa, l'influenza di x_i su x_j è determinata dalla derivata parziale di $x_j = f_{i,j}(x_i)$ rispetto a x_i . Riportando tutte le relazioni dirette su una matrice si ottiene una matrice di interazione binaria (BIM - *Binary Interaction Matrix*), all'interno della quale il termine $f_{i,j}$ rappresenta l'influenza diretta che il parametro x_i ha rispetto al parametro x_j .

È importante evidenziare che in questa prima fase del metodo si assume che ciascun parametro non influenzi se stesso (i termini sulla diagonale della BIM sono sempre nulli) in quanto si stanno considerando solo relazioni binarie; la BIM descrive infatti la struttura matematica fondamentale del sistema e contiene solo le relazioni dirette fra i parametri principali (**tabella 2.3.4**).

Mediante un procedimento matematico (formula canonica di Jordan) si ottiene la matrice di interazione globale (Global Interaction Matrix - GIM - non riportata) in cui l'ultima colonna definisce il peso che ciascun parametro ha sui coefficienti di rotolamento e di restituzione. Nella **tabella 2.3.5** sono riportati i risultati.

	0.25	0.25	0.75	0.50	Sistemazioni agrarie
				0.25	Densità di vegetazione
0.75	0.75		0.75	1.00	Tipo di materiale pendio
		0.25		0.25	Tipo di vegetazione
					K - Coeff. Restituzione

				0.75	Densità di vegetazione
		0.25		0.75	Tipo di vegetazione
0.50	0.25				Sistemazioni agrarie
	0.50	0.25		1.00	Tipo di materiale pendio
					Phi - Coeff. Rotolamento

Tabella 2.3.4 BIM di partenza. In alto: matrice BIM per il coefficiente di restituzione K; in basso: matrice BIM per il coefficiente di rotolamento Phi. Le scritte laterali si riferiscono alle rispettive caselle grigie in diagonale (linea per linea)

K		PHI	
SA	31.7 %	SA	15.6 %
DV	5.1 %	DV	19.5 %
TP	54.6 %	TP	41.6 %
TV	8.6 %	TV	23.4 %

Tabella 2.3.5 Risultati delle matrici (K = coefficiente di restituzione, Phi = coefficiente di rotolamento; SA = sistemazioni agrarie; DV = densità della copertura vegetale; TV = tipo di copertura vegetale; TP = tipo pendio)

Tabella 2.3.6 Variabili da utilizzare per il calcolo di K_n , K_t e Phi (K = coefficiente di restituzione, Phi = coefficiente di rotolamento)

Nome shape file	Nome campi e valori attribuiti (Coefficienti K_t , K_n e Phi)	K_t	K_n	Phi
	Tipo			
Tipo_pendio	Aree urbanizzate /strada asfaltate	0.1	0.05	0.5
	Suolo	0.05	0.01	0.55
	Detrito fine	0.05	0.25	0.65
	Detrito medio	0.1	0.05	0.75
	Detrito a grossi blocchi	0.15	0.07	1.00
	Roccia	0.2	0.1	0.55
Tipo_vegetazione	Assente / strade	0.00	0.00	0.00
	Alberi ad alto fusto (bosco)	0.25	0.1	1.00
	Arbusteti	0.2	0.1	0.85
	Prati e sistemi particellari (campi, orti, giardini, ecc.)	0.05	0.05	0.65
Densità_vegetazione	Molto denso	0.1	0.05	1.00
	Mediamente denso	0.15	0.07	0.7
	Poco denso	0.2	0.1	0.55
Sist_agrarie	Assenti	0.15	0.1	0.6
	Terrazzamenti	0.1	0.05	1.00

A questo punto i coefficienti K_n , K_t e Phi possono essere agevolmente calcolati attraverso la sommatoria dei prodotti tra i pesi percentuali dei parametri e i rispettivi valori caratteristici mediante le seguenti equazioni:

$$K_n = \% \text{peso parametro SA} \times \text{Valore variabile SA} + \% \text{peso parametro DV} \times \text{Valore variabile DV} + \% \text{peso parametro TP} \times \text{Valore variabile TP} + \% \text{peso parametro TV} \times \text{Valore variabile TV} \quad (2.3.5)$$

$$K_t = \% \text{peso parametro SA} \times \text{Valore variabile SA} + \% \text{peso parametro DV} \times \text{Valore variabile DV} + \% \text{peso parametro TP} \times \text{Valore variabile TP} + \% \text{peso parametro TV} \times \text{Valore variabile TV} \quad (2.3.6)$$

$$\text{Phi} = \% \text{peso parametro DV} \times \text{Valore variabile DV} + \% \text{peso parametro SA} \times \text{Valore variabile SA} + \% \text{peso parametro TP} \times \text{Valore variabile TP} \quad (2.3.7)$$

I valori delle variabili SA, TP, TV e DV sono determinati in modo semiquantitativo. Tali valori hanno un campo di variabilità compreso tra 0 e 1 dove:

- nel caso del coefficiente di rotolamento il valore 0 materializza un pendio privo di ostacoli (non favorisce il rallentamento) e 1 materializza un pendio che favorisce il rallentamento (superficie molto scabra);
- nel caso del coefficiente di restituzione il valore 0 materializza un pendio costituito da materiale molto molle (annulla il rimbalzo) e 1 materializza un pendio che favorisce il rimbalzo.

La **tabella 2.3.6** riporta i valori associati alle varie tipologie di pendio e i nomi assegnati ai vari *shapefile* con i relativi attributi. Tali valori sono stati determinati sulla base dell'esperienza che Arpa

Piemonte ha sviluppato nel corso degli anni sull'argomento in esame e risultano perfettamente concordi con i tipici valori dei coefficienti K_n , K_t e Phi riportati in letteratura.

Figura 2.3.4 Pannello di controllo del database. Dal pannello principale è possibile accedere alle diverse funzioni dell'applicativo



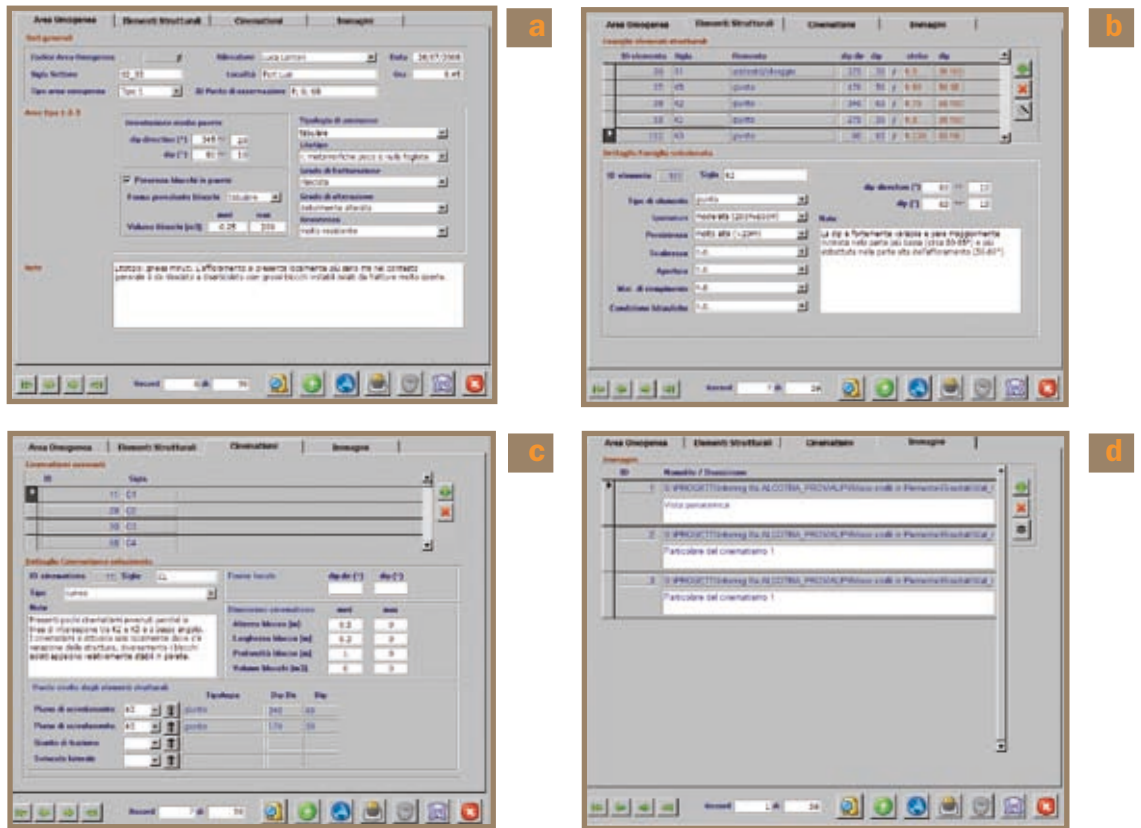
della maschera: (figura 2.3.5).

- Area omogenea: (figura 2.3.5-a) contiene i dati relativi all'inquadramento anagrafico dell'area analizzata. In questa sezione sono raccolte le informazioni di carattere generale relative all'area descritta: il tipo di area, il nome del rilevatore, la data di compilazione della scheda, l'orientazione media del fronte roccioso, la descrizione di eventuali blocchi presenti in parete ed infine una prima sommaria classificazione dell'ammasso roccioso. Queste indicazioni, sebbene di carattere qualitativo e relative all'intera area omogenea, permettono un inquadramento del contesto descritto. Nel campo note possono essere indicate ulteriori informazioni caratteristiche dell'area omogenea.
- Elementi strutturali: (figura 2.3.5-b) raccoglie le caratteristiche geomeccaniche della famiglia di discontinuità descritte. Nella parte superiore vengono riportate, in forma raccolta, le principali informazioni relative alle discontinuità. Selezionando una delle righe è possibile inserire o consultare tutte le informazioni di dettaglio. È importante ricordare che, come indicato nella metodologia di rilevamento, le informazioni riportate sono relative a famiglie di discontinuità e non ai singoli giunti. L'aggregazione per famiglie viene fatta già durante il rilevamento su terreno; proprio per questo è possibile trovare in questa sezione informazioni quali spaziatura e persistenza delle discontinuità. Le informazioni sulla geometria delle strutture devono essere inserite seguendo lo standard *dip direction/dip* (immersione/inclinazione). Per maggior comodità di lettura, dopo aver inserito i dati in tale formato, questi vengono visualizzati anche nel formato *strike/dip* (direzione/inclinazione).
- Cinematismi: (figura 2.3.5-c) contiene i dati che descrivono i cinematismi (potenziali o avvenuti) individuati in parete. La sezione è strutturata in modo simile alla precedente: la parte superiore riporta l'elenco di tutti i cinematismi individuati, visualizzando le principali informazioni in forma tabellare, mentre nella parte inferiore è possibile consultare tutte le informazioni di dettaglio per il singolo cinematismo selezionato. Anche in questo caso le informazioni inserite non sono relative a singoli crolli visibili in parete ma a "famiglie" che si sviluppano con modalità cinematiche simili. Oltre alla tipologia di cinematismo individuato (planare, cuneo, ribaltamento o crollo puro o distacco da ammasso roccioso disarticolato), alle dimensioni stimate ed all'eventuale orientamento locale del fronte su cui si sviluppa, è possibile inserire il ruolo svolto dai diversi elementi strutturali precedentemente descritti. Per evitare errori di inserimento i campi non significativi per un determinato fenomeno vengono disattivati, ad esempio, nel caso si descriva uno scivolamento di tipo planare sarà possibile inserire un solo piano di scivolamento. È inoltre possibile indicare il ruolo svolto da altre discontinuità (giunto di trazione o svincolo laterale).
- Documentazione fotografica: (figura 2.3.5-d) In questa sezione è possibile inserire e consultare l'eventuale documentazione fotografica con una breve descrizione.

Ogni area omogenea è identificata mediante una chiave univoca denominata "Codice Area Omogenea", che ne permette anche il collegamento con la componente geografica. La chiave viene assegnata dal sistema al momento della creazione della scheda e non può più essere modificata in seguito. Nel caso la scheda venga creata aggiungendo un record dal database la chiave deve essere riportata manualmente anche nella componente geografica, per mantenerne il collegamento. Al contrario, se la creazione avviene da ESRI® ArcView (utilizzando l'apposito pulsante descritto nella sezione successiva) è il sistema stesso che genera il nuovo codice e lo assegna sia alla componente alfanumerica sia a quella geografica, valorizzando il codice nel campo "ID" della tabella dati dello shape corrispondente.

Per permettere una valutazione preliminare dei rapporti tra le discontinuità rilevate e la giacitura del fronte,

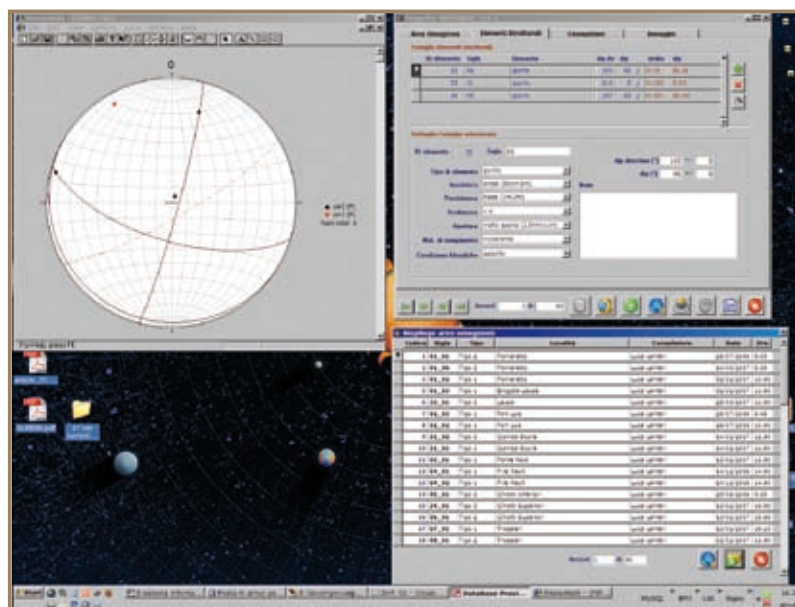
Figura 2.3.5 Maschere di inserimento dati del database (a - Area Omogenea, b - Elementi Strutturali, c - Cinematismi, d - Documentazione Fotografica)



il database è stato interfacciato con un semplice applicativo per il plottaggio della geometria delle discontinuità su stereogramma. È stato utilizzato il programma Stereonett 2.46, realizzato dall'Istituto di Geologia di Ruhr-Bochum e distribuito gratuitamente con licenza *freeware* (figura 2.3.6). I dati strutturali vengono forniti al programma generando un file di testo in formato ASCII, contenente i dati giacitureali e le specifiche grafiche nel formato richiesto da Stereonett. È comunque possibile utilizzare un qualsiasi altro programma di plottaggio su stereogramma che utilizzi un formato di tipo testo per l'ingresso dei dati; infatti il file generato può essere facilmente adattato a diversi standard mediante modifiche minime.

Figura 2.3.6 Il database permette di plottare direttamente in un programma esterno (in questo caso è stato utilizzato Stereonett 2.46)

È possibile utilizzare due diverse modalità di plottaggio dei dati: accedendo a Stereonett dalla sezione "Famiglie elementi strutturali" vengono visualizzate sullo stereogramma solo le famiglie di discontinuità relative all'area omogenea selezionata. Dalla sezione "esporta dati" invece è possibile plottare su stereogramma tutte le famiglie inserite oppure dei sottogruppi scelti dall'utente, mediante la definizione di una *query* di selezione. Le *query* vengono generate in modo guidato grazie al *query builder* integrato in Microsoft® Access.



Si possono inoltre stampare resoconti cartacei delle schede compilate. Analogamente a quanto descritto in precedenza, se si accede dalla sezione di consultazione viene stampata la singola scheda, mentre dalla sezione "esporta dati" si possono stampare gruppi di schede mediante la definizione di una *query* di selezione con una modalità simile a quella descritta in precedenza.

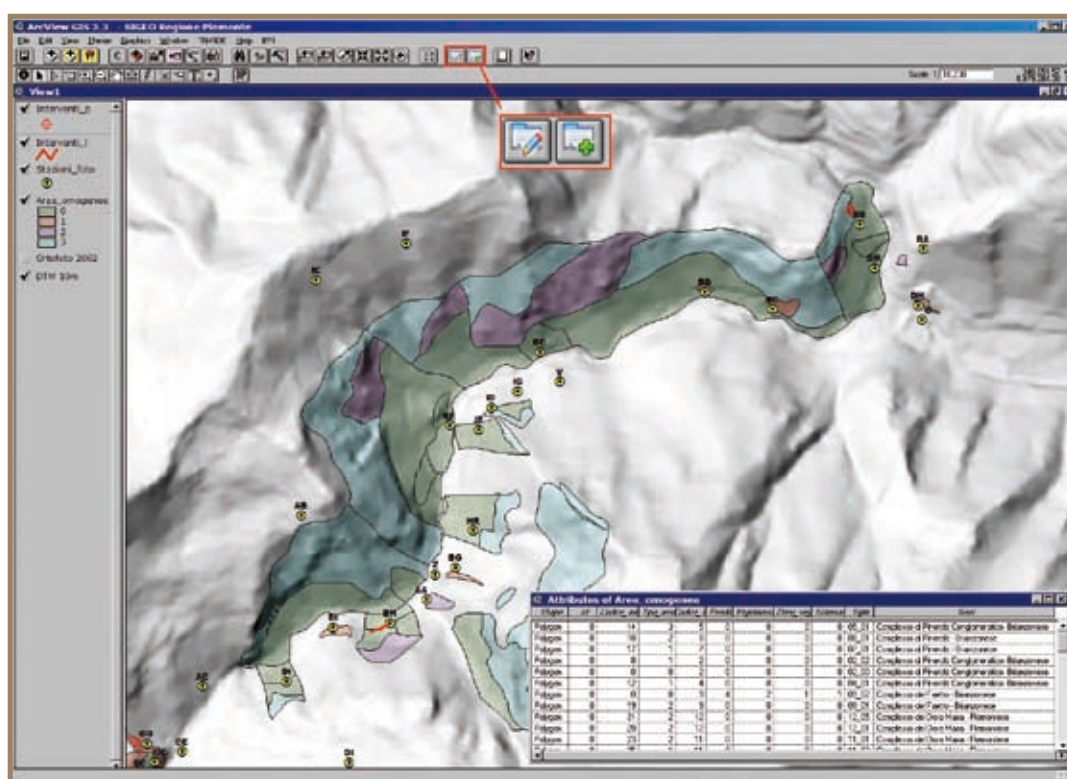
Dalla sezione "configurazione" è possibile infine configurare alcuni parametri indispensabili per il funzionamento degli strumenti descritti, quali: il punto

del filesystem in cui è presente il programma utilizzato per il plottaggio delle discontinuità e la collocazione in cui viene generato il file per l'esportazione delle geometrie delle discontinuità. Dalla sezione "esporta" invece è possibile esportare in forma tabellare i principali dati raccolti nel database, ed in modo particolare quelli utili per l'analisi cinematica. Sono supportati i formati XLS, HTML, MS-DOS TEXT e RTF.

La componente geografica

I dati geografici sono stati gestiti in ambiente GIS, utilizzando l'applicativo ESRI® ArcView 3.3. Le informazioni sono organizzate in due diversi temi: il primo (di tipo poligonale) contiene la perimetrazione delle aree omogenee e gli attributi relativi alla caratterizzazione delle aree omogenee di tipo 0, il secondo (di tipo puntuale) contiene l'ubicazione delle stazioni fotografiche. Le informazioni associate alle aree di tipo 1, 2 e 3 sono tutte contenute all'interno del database alfanumerico (figura 2.3.7). Il collegamento tra la componente geografica e quella alfanumerica è gestita mediante il campo "ID", corrispondente al codice area omogenea del database. Al fine di rendere quanto più integrata possibile l'attività di consultazione e compilazione delle schede, sono stati realizzati alcuni strumenti utilizzando Avenue, il linguaggio di scripting di ESRI® ArcView. Caricando l'estensione "PROVIALP" vengono aggiunti due pulsanti alla barra degli strumenti di ESRI® ArcView che permettono rispettivamente di aprire la scheda relativa alla geometria selezionata o di creare una nuova scheda associata alla geometria selezionata.

Figura 2.3.7 Componente geografica del sistema informativo. Il box rosso evidenzia i tasti che gestiscono il collegamento con il database Microsoft® Access



L'assegnazione del codice area omogenea viene fatta dal sistema in modo assolutamente trasparente all'operatore. Dopo aver creato una nuova scheda viene assegnato lo stesso codice area omogenea sia al database sia alla geometria selezionata, in modo da ridurre al massimo l'intervento del compilatore. Infine è anche possibile effettuare la ricerca in senso inverso: selezionando una scheda dal database viene eseguito uno zoom-extent sull'area contenente la geometria cercata.

L'utilizzo di questi semplici strumenti permette di lavorare in un ambiente geografico/alfanumerico integrato, riducendo notevolmente i tempi di ricerca e inserimento dei dati.

Il rilevamento di terreno

Come già accennato in precedenza, per ottimizzare al massimo i tempi di rilevamento sul terreno, è stato sperimentato da parte di un gruppo di rilevatori l'utilizzo di strumenti informatici anche per il rilevamento di campagna. Il sistema utilizzato combina strumenti hardware (tablet PC, GPS e fotocamera digitale) con un software GIS appositamente realizzato per il rilevamento (mobile GIS). Nel nostro caso è stato utilizzato il software Map-IT; l'applicativo, progettato e sviluppato specificamente per tablet PC dal Laboratorio di Informatica applicata alle Scienze della Terra e Ambientali (LINEE) dell'Università degli Studi di Urbino in collaborazione con Terranova offre la possibilità di creare schede personalizzate per un veloce e guidato inserimento di dati sul terreno, di registrare qualsiasi tipo di documento (fotografie, video, note scritte o registrate a viva voce, disegni,

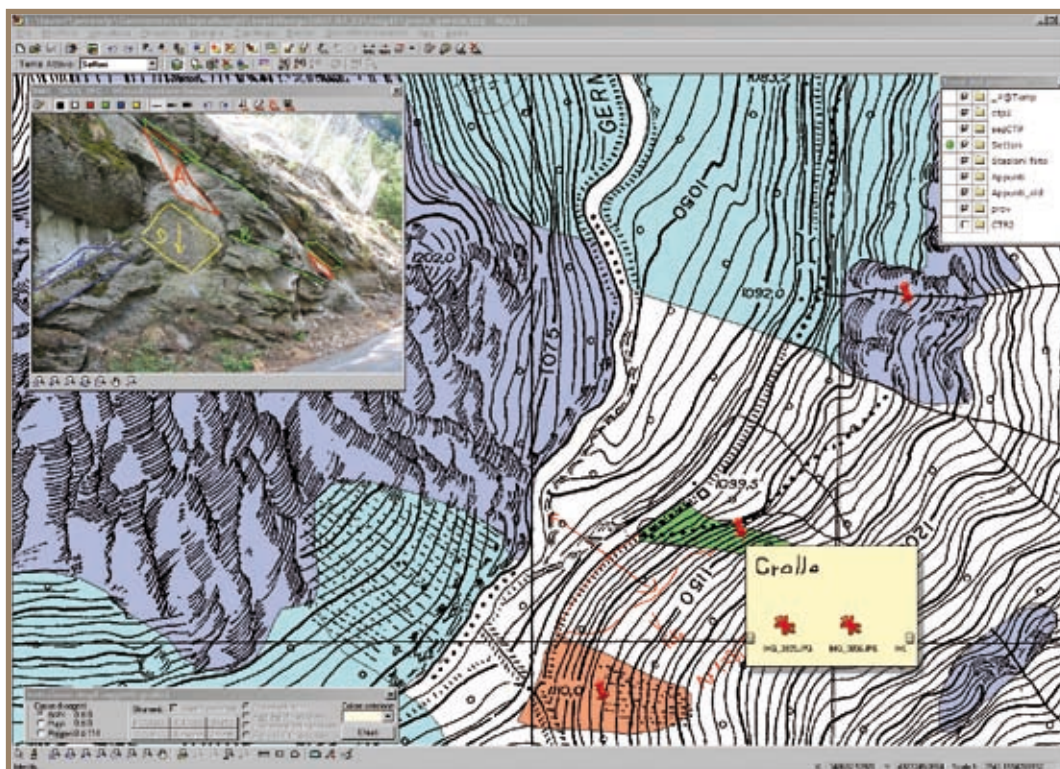


Figura 2.3.8 Esempio degli strumenti implementati dal software Map-IT. Grazie alle funzionalità di editing implementate ed all'utilizzo integrato con GPS e tablet PC è possibile ridurre i tempi di acquisizione e di informatizzazione dei dati rilevati

Anche il database è stato pensato per agevolare al massimo l'inserimento dei dati durante il rilevamento di campagna. Infatti, la funzionalità che permette di plottare su stereogramma le famiglie di discontinuità inserite ha permesso da una parte di verificare immediatamente la misura immessa e dall'altra di valutare in modo semplice, già in fase di rilevamento, i rapporti tra le diverse discontinuità ed il fronte medio della parete. Nella prima fase di attività, dedicata alla taratura della metodologia, l'analisi cinematica veniva fatta unicamente in ufficio. Organizzando l'attività in questo modo sono stati riscontrati due tipi di problemi:

- il test evidenziava dei cinematismi potenziali che non venivano identificati dal rilevamento di terreno;
- alcuni cinematismi descritti ed identificati in parete non soddisfacevano le condizioni di instabilità del test cinematico.

Nel primo caso è plausibile che alcuni cinematismi evidenziati dal test cinematico non si sviluppino nella realtà e quindi tale situazione non è da considerarsi a priori un errore. Si è rilevato però che in alcuni casi, eseguendo il test cinematico speditivo direttamente su terreno, è stato possibile identificare in parete cinematismi sfuggiti a una prima analisi. A differenza di prima, il secondo caso evidenzia ovviamente un'incongruenza non giustificabile, che in genere può essere corretta unicamente con un'ulteriore indagine di terreno; anche in questo secondo caso la possibilità di eseguire il test cinematico speditivo contestualmente al rilievo in campagna ha permesso di ridurre in modo sensibile eventuali errori e di evitare quindi successive verifiche. L'esperienza fatta nell'ambito del progetto ha messo in evidenza che l'utilizzo di strumenti di cartografia digitale per il rilevamento di campagna, abbinato a un'adeguata progettazione preliminare del sistema, permette di ottimizzare al meglio i tempi di rilevamento di terreno, di evitare la successiva fase di digitalizzazione dei dati raccolti e di minimizzare la possibilità di errori.

Note

Tutti i dati raccolti sono stati inseriti nel DVD allegato. Al fine di permetterne l'accesso con il maggior numero di sistemi sono stati utilizzati i seguenti formati:

- i dati geografici sono in formato *shapefile*; tale formato è ormai supportato da tutti i principali software GIS;
- i dati alfanumerici sono sia in formato Microsoft® Access 2000, sia in formato dbf IV.

Il database e l'estensione per ESRI® ArcView possono essere utilizzati, modificati e distribuiti liberamente.

schizzi, etc.) e collegarlo facilmente a una posizione geografica o a un oggetto (De Donatis e Bruciatelli, 2006) (figura 2.3.8).

Il sistema permette di importare ed esportare i dati nel formato *shapefile*. Le principali funzionalità utilizzate nel rilevamento di terreno sono state: l'ubicazione dei punti di ripresa mediante GPS; l'utilizzo di ortofoto su terreno per la perimetrazione delle aree omogenee e la possibilità di appuntare direttamente sulle foto scattate con fotocamera digitale le strutture identificate sull'affioramento.

2.4 LA METODOLOGIA MECCANICO-PROBABILISTICA

Marta Castelli, Cristina Occhiena, Andrea Allodi, Claudio Scavia - Politecnico Torino

2.4.1 Introduzione

L'analisi della stabilità di un pendio in roccia da un punto di vista meccanico richiede la conoscenza:

- della geometria delle discontinuità: orientamento, posizione nel pendio, dimensioni e forma, persistenza e spaziatura;
- della morfologia delle superfici (rugosità e ondulosità) e, eventualmente, della natura del materiale di riempimento in esse contenuto;
- delle azioni presenti nel momento dell'analisi e di come queste azioni possono variare nel tempo. Tra le più importanti si possono includere le pressioni idrauliche nelle discontinuità, quelle dovute al ghiaccio, le erosioni, le azioni sismiche e dinamiche in generale;
- dei parametri meccanici su scala reale al momento dell'analisi e della loro degradazione nel tempo.

A partire da tali conoscenze viene costruito un modello geomeccanico del pendio, sul quale condurre le analisi. Tale operazione, però, risulta particolarmente complessa nel caso di ammassi di grandi dimensioni, per i quali:

- il valore dei parametri geometrici e meccanici non può essere determinato in ogni punto del pendio. Si dovrà quindi far riferimento ad un campionamento, con conseguente variabilità dei dati ed i parametri saranno noti solo in senso statistico;
- i parametri geometrici determinabili su superfici esposte o da sondaggi devono essere estrapolati all'interno dell'ammasso roccioso, facendo ipotesi semplificative sulle modalità di trasposizione. È in particolare difficile la determinazione della posizione dei ponti di roccia tra le discontinuità che, anche se di piccole dimensioni, contribuiscono in modo preponderante alla stabilità;
- le caratteristiche del materiale e delle discontinuità possono essere determinate in laboratorio su provini di piccole dimensioni prelevati nell'ammasso roccioso. La scarsa rappresentatività di tali provini pone importanti problemi in relazione alla valutazione delle proprietà meccaniche su scala reale;
- la valutazione delle pressioni dell'acqua è resa estremamente difficile dalla conoscenza approssimata della geometria delle discontinuità, della morfologia delle superfici e del materiale in esse contenuto. Ciò rende impossibile una stima su base meccanica del rapporto tra precipitazioni e pressioni dell'acqua;
- la previsione degli effetti dei sismi riveste un carattere statistico ed assume tutte le problematiche tipiche del campo delle costruzioni civili.

L'occorrenza dei fenomeni di crollo in roccia, in particolare può avvenire per una combinazione complessa di piccole variazioni dei parametri geomeccanici (pressioni idrauliche, giaciture delle discontinuità, resistenza al taglio o a trazione, ecc.), la cui determinazione è affetta da una serie di incertezze di difficile valutazione. Un modo per tenere conto di tali incertezze in un'analisi di stabilità consiste nell'introdurre metodologie di tipo meccanico all'interno di uno schema probabilistico (Barla *et al.*, 1988), al fine di valutare come esse si riflettano sulle incertezze nei risultati (per esempio il fattore di sicurezza) attraverso la determinazione di una probabilità di rottura. Nell'ambito del presente lavoro si è scelto di utilizzare il metodo dell'equilibrio limite per il calcolo del fattore di sicurezza, in associazione alla tecnica di Monte Carlo per il calcolo della probabilità di rottura. Grazie alla sua grande semplicità, il metodo dell'equilibrio limite è infatti molto adatto ad essere implementato in senso probabilistico evitando tempi di calcolo eccessivamente lunghi.

2.4.2 Il metodo dell'equilibrio limite

L'applicazione del metodo dell'equilibrio limite all'analisi di stabilità di un pendio in roccia presuppone la ricerca per tentativi o la scelta a priori, in base a considerazioni geometriche derivanti dal rilievo geologico strutturale, della superficie potenziale di rottura (Barla e Castelli, 2006). In corrispondenza di tale superficie si calcola un fattore di sicurezza (F_s) definito come rapporto tra la resistenza al taglio mobilabile e la

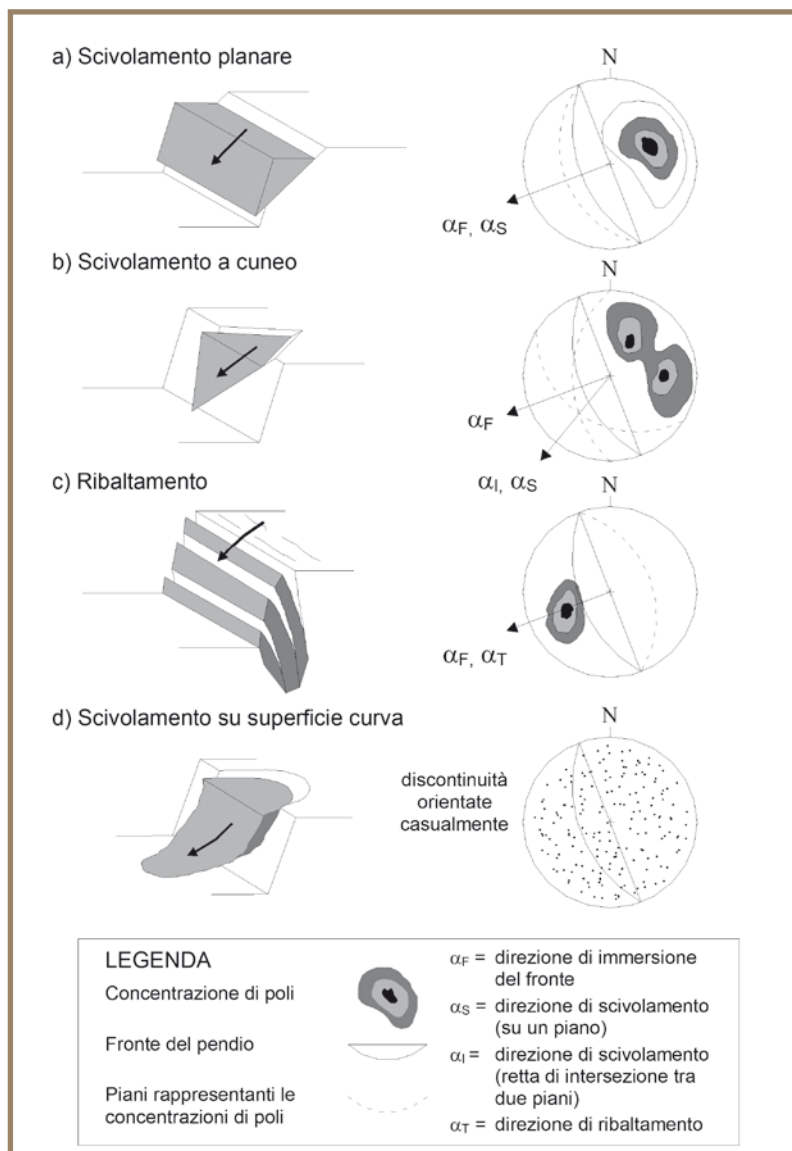
minima resistenza necessaria a impedire lo scivolamento (Bishop, 1955) o anche più semplicemente come rapporto tra le forze resistenti e quelle instabilizzanti:

$$F_s = \frac{\int \tau_R (\sigma_n) dl}{\int \tau_n dl} = \frac{\Sigma F_{RESISTENTI}}{\Sigma F_{INSTABILIZZANTI}} \quad (2.4.1)$$

Considerando il volume potenzialmente instabile come un corpo rigido, il termine al denominatore è valutabile con semplici considerazioni statiche. Il termine al numeratore dipende, invece, dalla distribuzione degli sforzi normali e dalle caratteristiche di resistenza mobilitabili sulla superficie di scivolamento ed è quindi valutabile meno facilmente.

A causa dell'ipotesi di corpo rigido, il metodo non è in grado di simulare deformazioni interne della massa potenzialmente instabile e non può perciò essere utilizzato per prevedere il comportamento deformativo di grandi frane, caratterizzate da meccanismi complessi e combinati (*creep*, rottura progressiva, ecc.). Esso però risulta particolarmente adatto allo studio di fenomeni di rottura fragile, quali il distacco di blocchi da ammassi rocciosi resistenti e fratturati per cui l'instabilità avviene su superfici preesistenti. Rotture di questo tipo sono condizionate principalmente dall'orientazione e dalla distribuzione delle discontinuità rispetto al pendio stesso, oltre che dalla resistenza di matrice e dal grado di fratturazione dell'ammasso roccioso. I più frequenti cinematismi di rottura sono in questi casi (figura 2.4.1; Hoek e Bray, 1981):

Figura 2.4.1 Principali tipi di cinematismi (Hoek e Bray, 1981, mod.)



- *Scivolamento planare (bidimensionale)*. La superficie di rottura può essere costituita da una vera e propria superficie piana o da una fascia relativamente sottile di intensa deformazione a taglio. Dal punto di vista cinematico, il fenomeno si manifesta in pendii naturali o fronti di scavo artificiali in ammassi interessati da discontinuità aventi una direzione di immersione prossima a quella del fronte con un'approssimazione di 20°. La seconda condizione fondamentale affinché si manifesti la possibilità cinematica di scivolamento planare è che l'angolo di inclinazione del piano della discontinuità sia inferiore all'angolo di inclinazione del fronte del pendio in roccia. Discontinuità addizionali sub-verticali possono definire l'estensione laterale del volume potenzialmente instabile, ma essendo considerate semplicemente come superfici di rilascio, il loro contributo ai fini della stabilità del pendio è nullo; nel caso non siano presenti superfici laterali, l'estensione laterale della massa potenzialmente scivolante può essere definita solamente quando la superficie planare sia localizzata su uno sperone di roccia. Il volume instabile può essere ulteriormente delimitato da una superficie sub-verticale posta a monte con il ruolo di giunto di trazione.
- *Scivolamento a cuneo (tridimensionale)*. Avviene su due piani di discontinuità che si intersecano in una linea con angoli di immersione e di inclinazione compatibili con il fronte del pendio. Affinché sia verificata la possibilità cinematica di scivolamento a cuneo occorre infatti che la linea di intersezione rispetti due condizioni fondamentali: il suo angolo

di inclinazione deve essere inferiore all'angolo di inclinazione del fronte del pendio ed il suo angolo di immersione deve essere compreso in un campo di variabilità di $\pm 90^\circ$ intorno al valore dell'angolo di immersione del fronte del pendio (la retta di intersezione deve cioè intersecare il fronte). Anche in questo caso il volume potenzialmente instabile può essere delimitato da superfici sub-verticali laterali o poste a monte (giunti di trazione), con il ruolo di superfici di rilascio.

- *Ribaltamento*. Comporta la formazione di colonne alte e sottili che, per particolari condizioni geometriche, si distaccano dall'ammasso roccioso secondo un movimento rotatorio che ha il fulcro alla base della colonna. Goodman e Bray (1976) hanno individuato una serie di differenti tipi di crolli per ribaltamento, i quali possono essere classificati in due grandi categorie: il ribaltamento a blocchi ed il ribaltamento flessionale.

In particolare, il ribaltamento a blocchi, di cui ci si occupa in questo lavoro, avviene in seguito alla formazione di blocchi prismatici generati dall'intersezione di due sistemi di discontinuità sub-ortogonali; il primo presenta una forte inclinazione, una ridotta spaziatura ed un'elevata persistenza, mentre il secondo è caratterizzato essenzialmente da una debole inclinazione e costituisce la base del blocco. Essendo il meccanismo di instabilità strettamente legato alla forma dei blocchi, le condizioni cinematiche sono in questo caso più incerte rispetto alle instabilità per scivolamento. Generalmente si considera unicamente la condizione che l'immersione dei piani che compongono il blocco sia simile (con un'orientazione di $\pm 180^\circ$ nel caso di piano sub-verticale a reggipoggio).

Nel caso invece del ribaltamento flessionale, solo la famiglia di discontinuità a forte inclinazione è preesistente mentre la base del blocco è costituita da una superficie di rottura dovuta agli sforzi di trazione indotti nelle colonne inflesse. Questo tipo di cinematismo non può essere analizzato tramite il metodo dell'equilibrio limite, che richiede la conoscenza a priori delle superfici di rottura e non verrà perciò preso in conto nel presente lavoro.

- *Distacco puro*. Avviene prevalentemente su versanti in condizioni di accentuata pendenza, sub-verticali o strapiombanti, privi di copertura e vegetazione. Il distacco è in genere dovuto alla rottura per trazione di ponti di roccia. Anche questo tipo di cinematismo non può essere analizzato tramite il metodo dell'equilibrio limite e non verrà considerato nel presente lavoro.
- *Scivolamento lungo una superficie circolare*. Si genera in ammassi rocciosi intensamente fratturati, tali da poter essere assimilati ad un terreno sciolto. In questo caso la superficie di scivolamento spesso non è preesistente ma si evolve all'interno dell'ammasso assumendo una conformazione curvilinea. Per lo studio della stabilità di ammassi di questo tipo tramite il metodo dell'equilibrio limite è necessario in primo luogo assumere una superficie di potenziale rottura; si suddivide poi il volume potenzialmente instabile in conci verticali e si risolvono per ogni concio le equazioni di equilibrio delle forze. Esistono diversi metodi per condurre tale analisi, che tra di loro si differenziano unicamente per le condizioni imposte. Tra i più importanti si ricordano il metodo di Taylor (1937), di Terzaghi (1943), di Janbu (1954), di Bishop (1955), di Morgenstern e Price (1965) e di Lambe e Whitman (1969).

Il metodo di calcolo adottato nel progetto consente un'analisi di stabilità con il metodo dell'equilibrio limite di un pendio in roccia contenente cinematismi per scivolamento planare, scivolamento a cuneo e ribaltamento a blocchi. La **tabella 2.4.1** riporta in sintesi le condizioni cinematiche per avere instabilità in ciascuno di questi casi (si veda anche la **figura 2.4.1** per i simboli). Non viene invece condotta alcuna analisi per quanto riguarda i cinematismi per ribaltamento flessionale, per distacco puro e per scivolamento su superficie curva di pendii molto fratturati, a causa delle limitazioni del metodo di rilievo, che non è in grado di fornire alcuna indicazione sulla presenza e distribuzione dei ponti di roccia nell'ammasso. A questi cinematismi, se osservati sul versante, si attribuisce (a favore di sicurezza) una probabilità di rottura del 100%.

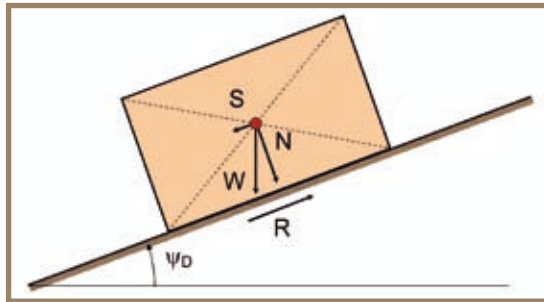
Tabella 2.4.1 Sintesi delle condizioni cinematiche per le potenziali instabilità analizzate (si veda la figura 2.4.1 per i simboli)

Tipo di cinematismo	Condizioni cinematiche	
	Immersione (α)	Inclinazione (ψ)
Scivolamento planare	$\alpha_S = \alpha_F \pm 20^\circ$	$\psi_S < \psi_F$
Scivolamento a cuneo	$\alpha_I = \alpha_F \pm 90^\circ$	$\psi_I < \psi_F$
Ribaltamento	$\alpha_T \cong \alpha_F (\pm 180^\circ)$	$\psi_T \cong 90^\circ$

Calcolo del fattore di sicurezza per scivolamento planare

L'analisi di stabilità per scivolamento planare su un pendio in roccia può ricondursi all'analisi bidimensionale di un blocco rigido in equilibrio su un piano inclinato (**figura 2.4.2**). Il fattore di sicurezza, corrispondente al rapporto tra le forze resistenti R e quelle scivolanti S , è dato in questo caso da:

Figura 2.4.2 Schema grafico di un concio su un piano inclinato



$$R = N \cdot \tan \varphi_D = W \cdot \cos \psi_D \cdot \tan \varphi_D \quad (2.4.2)$$

$$S = W \cdot \sin \psi_D \quad (2.4.3)$$

$$F_S = \frac{R}{S} = \frac{\tan \varphi_D}{\tan \psi_D} \quad (2.4.4)$$

dove:

W peso del blocco instabile, calcolato in funzione del peso di volume del materiale γ

ψ_D inclinazione della superficie di potenziale scivolamento

φ_D angolo di attrito della superficie di potenziale scivolamento, nell'ipotesi che la sua resistenza al taglio sia espressa dal criterio di Coulomb

L'analisi all'equilibrio limite può essere estesa anche ai casi in cui il problema geometrico sia più complesso e le condizioni comprendano la presenza di coesione sulla superficie di scivolamento (dovuta per esempio alla presenza di ponti di roccia), l'azione di spinte idrauliche agenti sulla superficie di scivolamento e sull'eventuale giunto di trazione, una generica forza esterna, come per esempio l'azione di ancoraggi di sussidio alla stabilità del pendio e l'azione statica equivalente di fenomeni sismici sulla base del metodo pseudo-statico.

Il metodo pseudo-statico consiste nella simulazione degli effetti delle scosse sismiche mediante l'utilizzo di una forza orizzontale statico-equivalente applicata al baricentro del volume di roccia instabile ed orientata verso valle. Il modulo di questa forza deriva dal prodotto tra il peso del volume di roccia scivolante ed un coefficiente sismico adimensionale, denominato k_H e definito dalla normativa (O.P.C.M. 3274). Tale coefficiente può essere assunto pari ad una frazione dell'accelerazione di gravità ed il suo contributo viene sempre considerato sfavorevole.

Come rappresentato in **figura 2.4.3**, la distribuzione della pressione dell'acqua nel giunto di trazione e sulla superficie di discontinuità può essere in via esemplificativa rappresentata con un diagramma triangolare, il cui massimo viene raggiunto in prossimità del punto più profondo del giunto di trazione e quindi all'apice del piano di scivolamento; tale valore massimo della pressione equivale a:

$$u = \gamma_w \cdot h_w \quad (2.4.5)$$

dove:

γ_w peso dell'unità di volume dell'acqua

h_w quota piezometrica nel giunto di trazione

Conseguentemente si definiscono le spinte idrostatiche U e V , che rappresentano l'azione dell'acqua sul piano di scivolamento nel giunto di trazione, rispettivamente:

$$U = \frac{(\gamma_w \cdot h_w \cdot A)}{2} \quad (2.4.6)$$

$$V = \frac{(\gamma_w \cdot h_w^2)}{2} \quad (2.4.7)$$

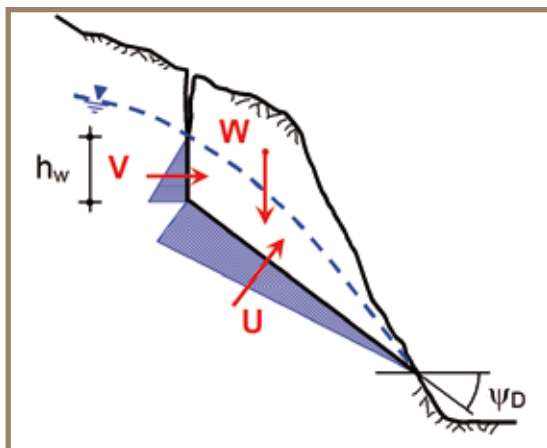


Figura 2.4.3 Scivolamento planare in presenza di acqua

dove:

A area del piano di scivolamento

Nello stesso modo si possono calcolare le risultanti di distribuzioni di altra forma, basate su diverse ipotesi sul regime di circolazione idraulica nella rete di discontinuità.

Nel caso più generale il fattore di sicurezza viene calcolato sulla base dell'equazione:

$$F_S = \frac{\{c \cdot A + [W \cdot (\cos \psi_D - k_H \cdot \sin \psi_D) - U - V \cdot \sin \psi_D + T \cdot \sin(\psi_D + \psi_T)] \cdot \tan \varphi_D\}}{[W \cdot (\sin \psi_D + k_H \cdot \cos \psi_D) + V \cdot \cos \psi_D + T \cdot \cos(\psi_D + \psi_T)]} \quad (2.4.8)$$

dove:

c coesione sul piano di scivolamento

φ_D angolo di attrito sul piano di scivolamento

ψ_D inclinazione del piano di scivolamento

W peso del blocco

U, V spinte idrostatiche sul piano di scivolamento e sul giunto di trazione

k_H coefficiente sismico

T modulo della forza di ancoraggio applicata al pendio

ψ_T inclinazione della forza di ancoraggio

Calcolo del fattore di sicurezza per scivolamento a cuneo

Nel caso di scivolamento a cuneo e con riferimento alla geometria indicata in **figura 2.4.4**, costituita dai due piani di scivolamento, il fronte, un piano sommitale ed un eventuale giunto di trazione, l'analisi di stabilità tridimensionale è basata sul calcolo delle forze agenti sui piani di scivolamento A e B .

Sulla base dei dati geometrici e meccanici del problema, vengono inizialmente calcolate le aree dei piani potenzialmente instabili e del giunto di trazione. Inoltre, vengono calcolati i coefficienti per determinare le reazioni normali dovute ai carichi esterni applicati e i coefficienti per determinare le componenti di queste forze agenti lungo la linea di intersezione dei giunti. Quindi, vengono calcolate le forze dovute alla pressione dell'acqua. Infine, vengono calcolate le forze che resistono allo scivolamento, che comprendono la coesione su ogni piano moltiplicata per l'area del piano e tutte le reazioni normali effettive su ogni piano moltiplicate per il coefficiente di attrito del piano. La somma delle forze resistenti viene, quindi, divisa per la somma delle forze che inducono lo scivolamento che comprendono le componenti del peso, le forze esterne e le forze dovute alla pressione dell'acqua nel giunto di trazione, agenti lungo la linea di intersezione dei due piani di discontinuità.

La direzione di immersione della linea di intersezione tra due piani generici A e B (**figura 2.4.4**) viene calcolata secondo la seguente formula:

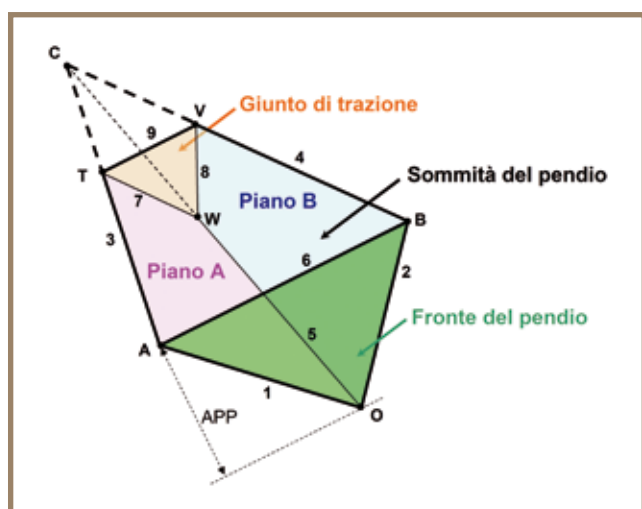


Figura 2.4.4 Schema dei piani e delle linee di intersezione del cuneo usate nell'analisi di stabilità

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{\tan \psi_A \cdot \cos \alpha_A - \tan \psi_B \cdot \cos \alpha_B}{\tan \psi_B \cdot \sin \alpha_B - \tan \psi_A \cdot \sin \alpha_A}\right) \quad (2.4.9)$$

dove:

ψ_A, ψ_B inclinazioni dei piani A e B rispettivamente

α_A, α_B direzioni di immersione dei piani A e B rispettivamente

L'inclinazione della generica linea di intersezione è data dalla seguente espressione:

$$\psi_i = \arctan(\tan \psi_B \cdot \cos(\alpha_B - \alpha_i)) \quad (2.4.10)$$

L'angolo tra due linee di intersezione i e j è calcolato usando l'espressione:

$$\theta_{ij} = \arccos(\cos \psi_i \cdot \cos(\alpha_i - \alpha_j) + \sin \psi_i \cdot \sin \psi_j) \quad (2.4.11)$$

La lunghezza AC (figura 2.4.4) è calcolata secondo l'espressione:

$$AC = AO \frac{\sin \theta_{15}}{\sin \theta_{35}} \quad (2.4.12)$$

dalla quale si ricava TC come differenza tra AC e AT .

Le aree dei piani A e B e del giunto di trazione T (figura 2.4.4) sono calcolate secondo le espressioni:

$$A_A = \frac{1}{2} \left(\overline{AC}^2 \frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{15}} - \overline{TC}^2 \frac{\sin \theta_{37}}{\sin \theta_{57}} \right) \sin \theta_{35} \quad (2.4.13)$$

$$A_B = \frac{1}{2} \left(\overline{AC}^2 \frac{\sin^2 \theta_{13} \sin \theta_{25}}{\sin^2 \theta_{15} \sin \theta_{24}} - \overline{TC}^2 \frac{\sin^2 \theta_{37} \sin \theta_{58}}{\sin^2 \theta_{57} \sin \theta_{48}} \right) \sin \theta_{45} \quad (2.4.14)$$

$$A_T = \frac{1}{2} \left(\overline{TC}^2 \frac{\sin \theta_{34} \sin \theta_{35}}{\sin \theta_{49} \sin \theta_{57}} \right) \sin \theta_{79} \quad (2.4.15)$$

Il controllo cinematico avviene verificando se la linea di intersezione del cuneo interseca il fronte del pendio. Ciò viene eseguito confrontando l'inclinazione della linea di intersezione con l'inclinazione apparente del fronte del pendio nell'immersione della linea di intersezione. Se l'inclinazione della linea di intersezione è maggiore dell'inclinazione apparente, lo scivolamento è cinematicamente impossibile. L'inclinazione apparente è determinata utilizzando la seguente formula:

$$\Psi_{app} = \arctan \left[\tan \Psi_F \cos(\alpha_i - \alpha_f) \right] \quad (2.4.16)$$

dove:

Ψ_F inclinazione del fronte

α_i, α_f direzioni di immersione della linea di intersezione e del fronte rispettivamente

Il peso del cuneo è calcolato secondo la formula (figura 2.4.4):

$$\frac{1}{6} \gamma \cdot K \left(\overline{AC}^3 \frac{\sin^2 \theta_{13} \sin \theta_{25}}{\sin^2 \theta_{15} \sin \theta_{24}} - \overline{TC}^3 \frac{\sin^2 \theta_{37} \sin \theta_{58}}{\sin^2 \theta_{57} \sin \theta_{48}} \right) \quad (2.4.17)$$

dove:

γ peso di volume della roccia e:

$$K = \sqrt{(1 - \cos^2 \theta_{34} - \cos^2 \theta_{35} - \cos^2 \theta_{45} + 2 \cos \theta_{34} \cos \theta_{35} \cos \theta_{45})} \quad (2.4.18)$$

Nel caso in cui sia necessario tenere conto di una distribuzione delle pressioni idrauliche nei giunti vengono calcolate la forza V agente sul giunto di trazione e le forze U_A e U_B agenti sui piani A e B rispettivamente. Il fattore di sicurezza viene infine calcolato secondo l'espressione:

$$F_s = \frac{[c_A \cdot A_A + c_B \cdot A_B + (q \cdot W + r \cdot V + s \cdot T - U_A) \tan \varphi_A + (x \cdot W + y \cdot V + z \cdot T - U_B) \tan \varphi_B]}{m_{W,5} \cdot W + m_{V,5} \cdot V + m_{T,5} \cdot T} \quad (2.4.19)$$

dove:

c_A, c_B coesione dei piani A e B rispettivamente

A_A, A_B aree dei piani A e B rispettivamente

q, r, s, x, y, z e m coefficienti di proiezione delle forze agenti sui piani A e B

W peso del cuneo

V, U forze dovute alla pressione dell'acqua

T forza esterna stabilizzante

φ_A, φ_B angolo di attrito dei piani A e B rispettivamente

Calcolo del fattore di sicurezza per ribaltamento a blocchi

Il ribaltamento a blocchi comporta la rotazione di un blocco roccioso verso l'esterno del pendio attorno ad un punto o un asse situato al di sotto del centro di gravità del blocco. Il fattore di sicurezza viene calcolato in questo caso sulla base di un'equazione di equilibrio di momenti. Per esempio, nel caso più semplice in cui il blocco sia soggetto unicamente al proprio peso W , come indicato in **figura 2.4.5**:

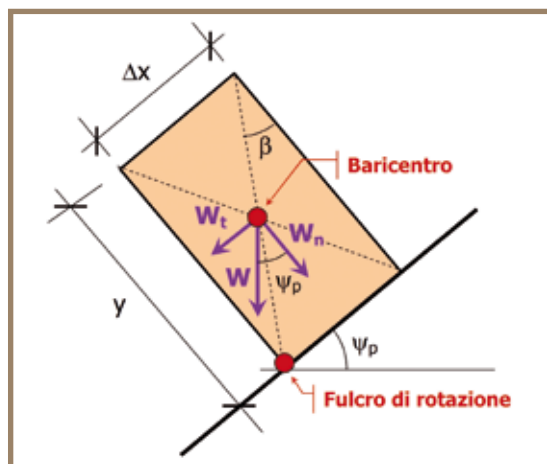


Figura 2.4.5 Blocco soggetto al solo peso proprio

$$M_{stab} = \frac{\Delta x}{2} \cdot W_n = \frac{\Delta x}{2} \cdot W \cdot \cos \psi_p \quad (2.4.20)$$

$$M_{rib} = \frac{y}{2} \cdot W_t = \frac{y}{2} \cdot W \cdot \sin \psi_p \quad (2.4.21)$$

da cui:

$$F_s = \frac{M_{stab}}{M_{rib}} = \frac{\Delta x}{y} \cdot \frac{1}{\tan \psi_p} = \frac{\tan \beta}{\tan \psi_p} \quad (2.4.22)$$

dove:

ψ_p inclinazione del piano di base

β rapporto di snellezza tra la larghezza Δx e l'altezza y del blocco

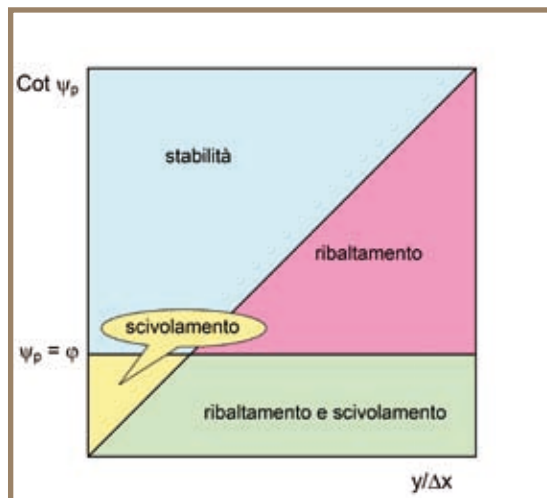


Figura 2.4.6 Condizioni per lo scivolamento o il ribaltamento di un blocco su una superficie inclinata

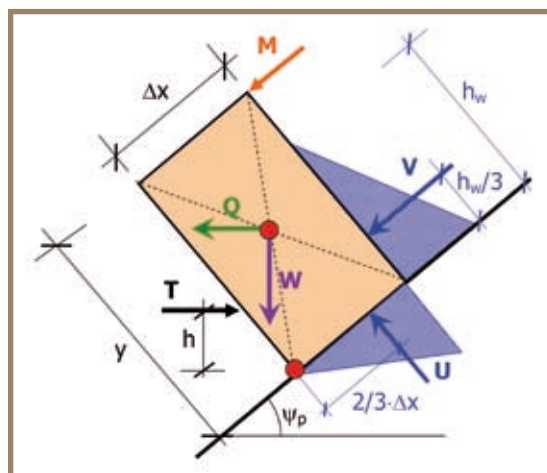


Figura 2.4.7 Forze agenti su un singolo blocco

È da notare che sul piano di base può avvenire anche scivolamento planare. Nel caso semplice di **figura 2.4.5** questo avviene quando la sua inclinazione è maggiore dell'angolo di attrito della superficie, ipotizzando nulla la coesione sui due piani che delimitano il blocco.

La snellezza del blocco $\Delta x/y$, l'inclinazione del pendio ψ_p e l'angolo di attrito sul piano di base ϕ definiscono la possibilità di ribaltamento o scivolamento, come indicato in **figura 2.4.6** (Barla e Castelli, 2006).

Nel caso in cui il ribaltamento non interessi un singolo blocco, ma un insieme di blocchi che si appoggiano l'uno sull'altro, è necessario risolvere un sistema di equazioni di equilibrio alla rotazione dei blocchi, aventi come incognite le azioni che i blocchi si scambiano mutuamente. Tali equazioni di equilibrio non sono però di fatto risolvibili poiché dipendenti dalle forze di attrito, delle quali non si ha modo di conoscere l'esatta mobilitazione. Esistono alcuni metodi che consentono di risolvere il sistema, quale per esempio il metodo di Goodman e Bray (1976), ma essi sono basati su semplificazioni poco realistiche che li rendono scarsamente applicabili.

Sulla base di queste considerazioni e in relazione alla speditività del rilievo di terreno, che non consente di avere sufficienti informazioni sulla geometria del pendio, il metodo di calcolo, sviluppato nell'ambito del progetto, considera la stabilità di un singolo blocco al quale può essere applicata una forza esterna M che simuli l'azione di un secondo blocco posto a monte nel caso in cui se ne conosca l'entità.

Il codice di calcolo consente inoltre di considerare nell'analisi un'azione sismica Q , l'azione stabilizzante di un tirante T e le risultanti U, V della distribuzione dell'acqua in pressione, considerando una distribuzione triangolare alla base e a monte del blocco, come indicato in **figura 2.4.7**.

2.4.3 Il metodo di Monte Carlo

I metodi di tipo probabilistico comunemente utilizzati in ingegneria delle rocce si distinguono in metodi di livello II e metodi di livello III. I primi necessitano la conoscenza della sola media e dello scarto quadratico medio delle variabili di ingresso e permettono di calcolare il valore medio e lo scarto quadratico medio di una funzione di rottura (per esempio il fattore di sicurezza). I metodi completi, o di livello III, prevedono invece la valutazione di una probabilità di rottura attraverso l'integrazione, in genere di tipo numerico, della funzione di rottura $g(z)$ sulla base della distribuzione statistica delle variabili di base z_i . Tali metodi consentono di determinare, anche se in modo approssimato, l'intera distribuzione statistica della funzione di rottura. Tra i metodi completi disponibili si fa riferimento, nel seguito, alla tecnica di simulazione di Monte Carlo, facilmente implementabile in codici di calcolo automatico. Sulla base di tale tecnica il processo di generazione della densità di probabilità del fattore di sicurezza si articola (Harr, 1987), a partire dalle distribuzioni cumulative di frequenza $F(x_i)$ delle variabili di base z_i , in:

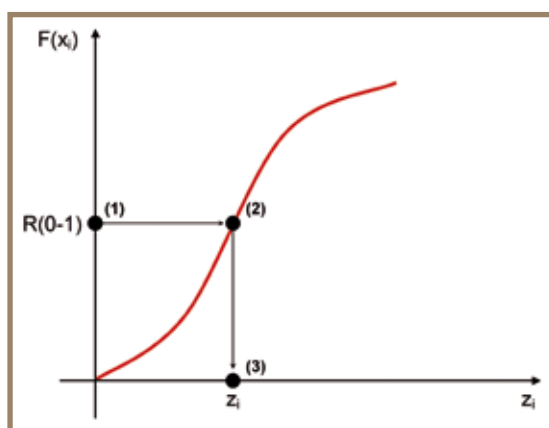


Figura 2.4.8 Simulazione di Monte Carlo: estrazione del valore della variabile z_i , avente distribuzione cumulativa $F(x_i)$ assegnata

1. estrazione di un numero casuale $R(0,1)$, compreso tra 0 e 1, mediante generatori automatici;
2. assunzione di un valore $F(x_i)$ pari a $R(0,1)$;
3. calcolo del valore di z_i corrispondente a $F(x_i)$, in accordo con la particolare distribuzione cumulativa (**figura 2.4.8**);
4. calcolo deterministico del fattore di sicurezza F_S ;
5. ripetizione n volte dei punti 1 – 4 fino alla costruzione per punti della distribuzione statistica di F_S ;
6. valutazione della probabilità di rottura:
 - assumendo una legge di densità per F_S e ricavando la probabilità che $F_S < 1$,
 - calcolando direttamente il rapporto:

$$P_f = \frac{n^*}{n} \tag{2.4.23}$$

dove:

n^* numero di $F_S < 1$

n numero totale di campionamenti

La valutazione di P_f prevede la conoscenza delle distribuzioni statistiche delle variabili di base o dei loro istogrammi e può comportare un notevole impegno di tipo computazionale. Per questo motivo, nel progetto il fattore di sicurezza viene calcolato con un metodo meccanico semplificato quale quello dell'equilibrio limite che, implementato con l'analisi probabilistica, rappresenta una soluzione rapida per lo studio della stabilità dei pendii.

2.4.4 Descrizione dei codici di calcolo

La componente meccanico-probabilistica del progetto si basa sull'utilizzo dell'applicativo WINTAM (Major et al., 1974) per l'analisi di scivolamenti a cuneo, dell'applicativo PlaSMon (Pisani, 2005) per l'analisi degli scivolamenti planari ed infine dell'applicativo Toppling Stones (Allodi e Castelli, 2007) per l'analisi di ribaltamenti a blocchi.

Le analisi vengono condotte sulla base del metodo dell'equilibrio limite, secondo quanto descritto precedentemente, a partire dalle distribuzioni statistiche delle variabili geometriche e meccaniche del pendio, e grazie all'impiego del metodo di Monte Carlo che consente l'estrazione casuale di diversi set di parametri. In questo modo i tre codici di calcolo sono in grado di determinare una distribuzione della frequenza del fattore di sicurezza e la probabilità di rottura del pendio.

Per utilizzare i codici di calcolo è necessario allestire per ogni cinematismo un file di *input*, contenente sia le

caratteristiche meccaniche e geometriche indispensabili per condurre la verifica di stabilità, sia i parametri statistici e di controllo per l'analisi probabilistica.

I parametri su cui si basa l'analisi di stabilità sono essenzialmente quelli geometrici del pendio (orientazione del fronte, del piano sommitale, del giunto di trazione e dei piani di scivolamento, altezza del pendio, posizione del giunto di trazione ed eventuale larghezza della zona instabile) e le proprietà fisiche e meccaniche (peso di volume, coesione ed angolo di attrito dei piani di scivolamento, posizione della falda e tipo di distribuzione delle pressioni idrauliche nei giunti, modulo ed orientazione delle forze esterne).

Tutti i programmi consentono di considerare diverse resistenze al taglio sui piani di scivolamento, inserire un giunto di trazione ed un piano sommitale di inclinazione variabile; è inoltre possibile includere nell'analisi gli effetti derivanti dall'azione di pressioni idrauliche all'interno dei giunti e di forze esterne stabilizzanti (che simulino per esempio la presenza di tiranti) o instabilizzanti (per simulare l'azione pseudo-statica di un carico sismico).

A tutti i parametri geometrici e meccanici coinvolti nell'analisi è possibile assegnare distribuzioni statistiche di frequenza di diverso tipo. Il tipo di distribuzione è definito come dato di ingresso per l'analisi e le caratteristiche della distribuzione vengono dettagliate tramite i parametri $ST1$, $ST2$, $ST3$ ed $ST4$, i quali assumono diverso significato in funzione del tipo di distribuzione come specificato nelle **figure 2.4.9 e 2.4.10**.

Figura 2.4.9 Definizione dei dati di ingresso delle variabili stocastiche

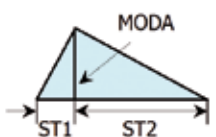
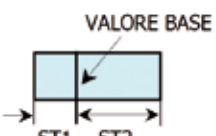
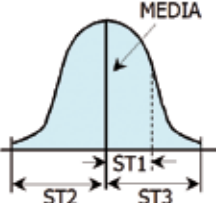
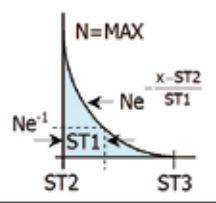
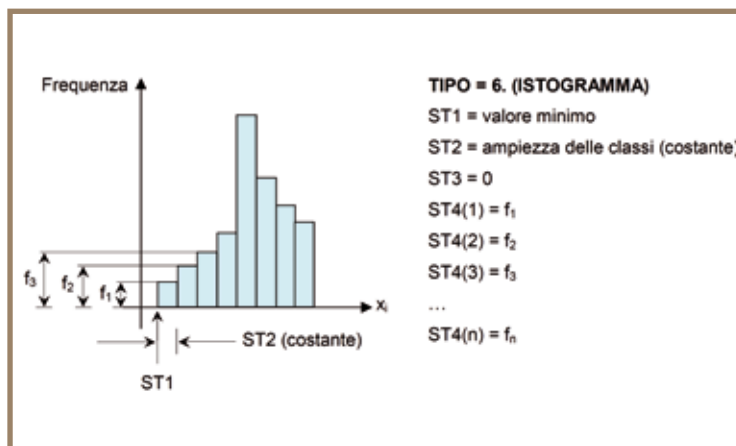
TIPO	ST1	ST2	ST3
1. GAUSSIANA	DEVIAZIONE STANDARD	0.	0.
2. TRIANGOLARE 	MASSIMA DISTANZA DALLA MODA VERSO SINISTRA (positiva)	MASSIMA DISTANZA DALLA MODA VERSO DESTRA (positiva)	0.
3. UNIFORME 	MASSIMA DISTANZA DAL VALORE BASE VERSO SINISTRA (positiva)	MASSIMA DISTANZA DAL VALORE BASE VERSO DESTRA (positiva)	0.
4. GAUSSIANA TRONCATA 	DEVIAZIONE STANDARD	MASSIMA DISTANZA DALLA MEDIA VERSO SINISTRA (positiva)	MASSIMA DISTANZA DALLA MEDIA VERSO DESTRA (positiva)
5. ESPONENZIALE 	DECREMENTO COSTANTE	VALORE MINIMO MISURATO DALL'ORIGINE	VALORE MASSIMO MISURATO DALL'ORIGINE

Figura 2.4.10 Definizione dei dati di ingresso per la distribuzione ad istogramma



Nel caso specifico del progetto PROVIALP, in relazione allo scarso livello di dettaglio con cui vengono ricavati i dati nel corso del rilievo speditivo di terreno (forniti in termini di intervallo di variazione intorno ad un valore medio), vengono prese in considerazione unicamente distribuzioni uniformi. Ciò significa che qualunque valore compreso tra il minimo ed il massimo dell'intervallo di variazione della variabile ha la stessa proba-

bilità di essere estratto nel corso del campionamento di Monte Carlo.

I codici di calcolo sono inoltre predisposti per eseguire analisi parametriche al fine per esempio di valutare l'influenza di una variabile sulla probabilità di rottura. Tali analisi non vengono eseguite nell'ambito del progetto.

Prima di effettuare l'analisi di stabilità, tutti i programmi eseguono un controllo cinematico sugli angoli di immersione e di inclinazione dei piani, verificando l'effettiva compatibilità di tali valori con le condizioni definite al capitolo 2.4.2 (**tabella 2.4.1**). Tale controllo risulta necessario al fine di escludere dall'analisi di stabilità tutti i casi generati dalle estrazioni di Monte Carlo che non diano luogo a volumi potenzialmente instabili. Per ogni set di parametri estratti possono perciò verificarsi quattro diverse situazioni:

- caso cinematicamente impossibile (il cinematismo non ha la possibilità geometrica di formarsi);
- caso staticamente impossibile¹ ($F_S \leq 0$);
- caso stabile ($F_S \geq 1$);
- caso instabile ($F_S < 1$).

Sulla base di questi risultati e con riferimento all'**equazione 2.4.23**, la probabilità di rottura P_f viene calcolata in due modi:

1. come rapporto tra il numero di casi in cui $F_S < 1$ (n^*) e il numero totale di cinematismi possibili;
2. come rapporto tra il numero di casi in cui $F_S < 1$ (n^*) e il numero totale di campionamenti n .

Nel caso particolare del progetto PROVIALP la probabilità di rottura viene calcolata con riferimento al totale dei campionamenti di Monte Carlo, cioè considerando anche i cinematismi impossibili. In tal modo è possibile tenere conto della possibilità che in alcuni punti, all'interno di un'area omogenea del versante, la variabilità delle caratteristiche di giacitura delle discontinuità non crei le condizioni per l'instabilità. Questi casi sono di fatto assimilati a situazioni di stabilità, cioè con $F_S > 1$.

Descrizione dei file di input

I file di *input* sono molto simili per i tre codici di calcolo utilizzati, in particolare i parametri necessari per le analisi sono essenzialmente gli stessi, con alcune differenze dovute alla peculiarità geometrica di ciascun caso. I file sono divisi in 9 sezioni:

1. descrizione del lavoro (utente, data, titoli);
2. dati di controllo (tipo di analisi, numero di variabili, opzioni del file di *output*);
3. dati geometrici (piani medi, fronte, altezza);
4. proprietà fisiche e di falda (coesione, attrito, altezza falda);
5. forze esterne (sisma, ancoraggio, ecc);
6. parametri di controllo per il Monte Carlo (seme iniziale per le estrazioni casuali, numero di variabili statistiche, ecc.);
7. descrizione delle distribuzioni statistiche (tipo e caratteristiche delle distribuzioni);
8. parametri di controllo *chi-quadro*;
9. lettura dati parametrici.

¹ Per il codice WINTAM vengono considerati staticamente impossibili anche i casi in cui $F_S \geq 50$

Una descrizione dettagliata di ogni variabile è riportata nei manuali di ciascun programma contenuti nel DVD allegato al presente volume.

Descrizione dei file di output

I codici di calcolo forniscono automaticamente tre file di *output* con identiche estensioni, ciascuno dei quali comprende informazioni specifiche, alcune delle quali volte ad essere rappresentate mediante l'impiego di software di restituzione grafica.

Il file *fname.out* contiene inizialmente la descrizione dettagliata di tutte le grandezze che intervengono durante l'analisi di stabilità e che vengono automaticamente calcolate, a cui segue un resoconto dettagliato del calcolo del fattore di sicurezza a partire dai valori medi delle variabili inserite.

Per quanto riguarda le analisi probabilistiche, dopo un riassunto delle caratteristiche di distribuzione di ognuna delle variabili previste dal codice di calcolo, nel file di *output* vengono esplicitati il numero di estrazioni di Monte Carlo ed il seme iniziale su cui si basa la generazione dei numeri casuali. Il file prosegue con la stampa dei risultati di tutte le analisi di stabilità staticamente e cinematicamente ammissibili, evidenziando le criticità e registrando i valori del volume e del fattore di sicurezza ottenuti per ogni estrazione del set di parametri; queste quantità vengono schematicamente riassunte in due tabelle che hanno il compito di semplificare la lettura dei risultati e di individuare i valori massimi e minimi sia per i volumi potenzialmente instabili che per i fattori di sicurezza calcolati.

A partire dai valori di cui sopra viene creato un istogramma di frequenza realizzato mediante un numero *BIN* di intervalli in cui l'insieme dei fattori di sicurezza campionati viene suddiviso (da specificare nel file di *input*); in assenza di analisi parametriche, le ultime informazioni che il file *fname.out* presenta sono le caratteristiche statistiche (*MEDIA*, *D.S.*, *SKEWNESS* e *CURTOSI*) di una distribuzione dei fattori di sicurezza assunta normale e la probabilità di rottura P_r calcolata come:

- area sottesa alla curva per valori di F_S minori di 1, calcolati solamente per i casi cinematicamente e staticamente possibili, assumendo una distribuzione normale dei fattori di sicurezza normale sulla base dei valori di media e di deviazione standard precedentemente individuati;
- rapporto tra il numero di casi in cui il F_S è risultato inferiore all'unità ed il numero di casi cinematicamente e staticamente possibili;
- rapporto tra il numero di casi in cui F_S è risultato inferiore all'unità ed il numero totale dei casi, corrispondente al numero *SAMPL* di estrazioni Monte Carlo.

Oltre al file principale precedentemente descritto, al termine dell'elaborazione ogni codice di calcolo fornisce altri due file di *output* che presentano la medesima estensione; il file *fname_FS.out* contiene un elenco dei fattori di sicurezza campionati, mentre il file *fname_VOL.out* riporta i volumi potenzialmente instabili ricavati dall'analisi. Entrambi presentano i risultati riassunti in tabelle al fine di rendere più agevoli le operazioni di trattazione dei dati e di rappresentazione grafica (entrambi da eseguirsi in modalità *off-line*).

Struttura dei codici di calcolo

I programmi, scritti in linguaggio Fortran, presentano una semplice struttura principale dalla quale vengono richiamate le *subroutine* per il calcolo del fattore di sicurezza e per l'analisi probabilistica.

La struttura principale di ogni codice consente di creare tre file di *output* all'interno dei quali sono registrati i risultati delle analisi; il nome *fname* del file di *input* viene richiesto all'utente al momento dell'avvio del programma, per poi cambiare estensione in seguito alla creazione dei diversi file di *output*.

La prima *subroutine* del programma, denominata **Descrp**, ha la funzione di riportare nel file di *output* principale una descrizione sintetica delle variabili di *input* utilizzate nel codice. Quindi ciascun programma prevede il richiamo di una *subroutine* di nome **Inputr** che ha la funzione di assumere dal file di *input* tutti i dati di ingresso, verificandone la correttezza dimensionale.

A partire dai valori medi dei dati di *input* viene calcolato un primo fattore di sicurezza mediante l'approccio deterministico; tale risultato viene registrato nel file di *output* principale tramite la *subroutine* **Printr**. In particolare il corpo principale, mediante il richiamo della *subroutine* **Calc_TOT** opportunamente suddivisa nelle *subroutine* **Areacalc** e **Calc_FS**, calcola inizialmente l'area del blocco scivolante o ribaltante valutata

su una sezione trasversale; definita la geometria del problema, vengono calcolate le possibili spinte dovute alla presenza dell'acqua, alla forza derivante dall'analisi pseudo-statica dei fenomeni sismici ed infine all'eventuale contributo alla stabilità garantito dall'installazione di un sistema di ancoraggio.

Nel caso sia richiesta un'analisi probabilistica, dalla struttura principale del programma viene richiamata la *subroutine Montec*; dal file di *input* vengono dedotte le informazioni relative alle grandezze (geometriche o meccaniche) definite come variabili stocastiche sulle quali condurre l'analisi. Per ciascuna di esse viene estratto un valore in accordo con la distribuzione statistica prevista nel file di *input*, come specificato nella *subroutine Sample*, e viene quindi calcolato il fattore di sicurezza. Questo procedimento viene svolto tante volte quante previste dal numero di estrazioni di Monte Carlo previsto ed al termine del campionamento i risultati delle estrazioni vengono stampati nel file di *output* principale.

Infine, mediante il richiamo della *subroutine Statan*, viene svolta un'analisi statistica sui fattori di sicurezza calcolati; in particolare vengono calcolati la media, la deviazione standard, l'indice *skewness* e la curtosi. Vengono inoltre forniti il diagramma di frequenza del fattore di sicurezza ed i valori della probabilità di rottura.

2.5 ANALISI DI RUN OUT

Marta Castelli¹, Luca Mallen², Claudio Scavia¹
¹Politecnico Torino, ²Arpa Piemonte

2.5.1 Metodologia

La fase del progetto relativa al *run out* è basata sull'utilizzo del codice di calcolo tridimensionale ROTOMAP®, sviluppato dall'Ing. Giorgio Scioldo (Geo&Soft S.r.l.) per l'analisi dell'evoluzione di fenomeni di caduta di singoli blocchi, non interagenti tra di loro, lungo la superficie topografica di un pendio.

Il metodo è di tipo *lumped mass*, cioè considera la massa del blocco concentrata in un punto e ne analizza il moto lungo il pendio con riferimento alle fasi di volo libero, rimbalzo o rotolamento, utilizzando le equazioni della cinematica. Per lo studio di un problema così complesso viene adottato un approccio statistico che consente di determinare le "aree di probabilità" di arresto dei blocchi e la distribuzione delle energie cinetiche. I risultati sono perciò costituiti da curve di iso-frequenza dei punti di arrivo, da curve iso-energetiche, ricavate dall'elaborazione dei livelli di energia specifica (per unità di massa) media e massima e dalle traiettorie di caduta dei blocchi. Possono inoltre essere calcolate le altezze massime dei rimbalzi.

A differenza della versione tradizionale disponibile sul mercato, nel corso del progetto è stata sviluppata una versione del codice (chiamato ROTOMAP GIS®) che simula la caduta massi a partire da una griglia di celle a passo regolare (definita per esempio dal modello digitale del terreno), distribuita entro ciascuna area omogenea di distacco, identificata nella fase di rilievo.

Oltre ai risultati che la versione originale di ROTOMAP® già forniva, la versione GIS consente il calcolo di un indice di suscettibilità (I_s), in corrispondenza di ogni singola cella in cui è discretizzato il dominio di studio.

Gli elementi necessari a definire le condizioni di *input* per la stima del *run out* in parte provengono dalle fasi precedenti, come per esempio:

- l'ubicazione e l'estensione delle aree di distacco;
- la probabilità di distacco dei blocchi (α , come nel caso del progetto PROVIALP, un indice di distacco I_D che riassume i risultati delle analisi probabilistiche di stabilità come descritto in seguito);
- la massa dei blocchi (m , nel caso in cui ci riferisca all'indice di distacco, la densità del materiale);
- le caratteristiche dei versanti in cui si sviluppa il moto.

Altri elementi invece vengono definiti dall'operatore, come descritto in dettaglio nel paragrafo seguente.

L'intera fase di *run out* viene gestita in ambiente GIS, mediante un'interfaccia che consente all'utente di inserire i dati di *input* e configurare le variabili, ma anche di utilizzare gli strati informativi disponibili per la definizione di alcuni parametri, quali per esempio i coefficienti di restituzione energetica.

Il codice di calcolo consente di tenere conto nell'analisi di opere di protezione, quali reti e barriere, al fine di definirne le caratteristiche meccaniche e geometriche nella progettazione di interventi di difesa o di valutare l'efficacia di opere esistenti. Come specificato al capitolo 2.1, tale aspetto esula dagli scopi del progetto PROVIALP e non viene perciò tenuto in conto in questa fase.

I principali parametri geomeccanici utilizzati nel modello sono i coefficienti di restituzione energetica normale (K_n) e tangenziale (K_t) ed il coefficiente di attrito di roto-scivolamento (φ). Tali parametri, definiti in dettaglio al paragrafo 2.3.3, riassumono l'influenza sulla traiettoria e sull'energia del moto di molti fattori, tra i quali la forma e la scabrezza della superficie topografica (a sua volta dipendente dal tipo di vegetazione e dal tipo di antropizzazione), i materiali che costituiscono tale superficie, la forma ed il volume dei massi, il tipo di roccia di cui sono costituiti.

Il carattere speditivo delle analisi di terreno ed il grado di dettaglio del modello digitale del terreno utilizzato nel progetto (DTM di Arpa Piemonte a maglia 10 m) hanno portato alla definizione di una metodologia di valutazione dei coefficienti di restituzione e di rotolamento che consentisse di basarsi su informazioni generali riguardo la tipologia dei versanti, derivate da strati informativi esistenti (cartografia geologica alla scala 1:50 000 o 1:100 000, carta dell'uso del suolo del Progetto CORINE alla scala 1:100 000, Piani Territoriali Forestali, ortofoto digitali, ecc.), integrate ed aggiornate con le informazioni speditive provenienti dal rilievo di terreno.

Nella fase di rilievo sul terreno, è stata perciò eseguita una caratterizzazione dei versanti in cui si sviluppa il moto dei massi in caduta (aree di tipo 0), al fine di trarre indicazioni su alcuni aspetti: il tipo di pendio (*TP*), il tipo di vegetazione (*TV*), la densità di vegetazione (*DV*), l'eventuale presenza di sistemazioni agrarie (*SA*). Come descritto nel paragrafo 2.3.3, sulla base di queste informazioni è possibile calcolare una terna di coefficienti per ciascuna cella del DTM appartenente alle aree di tipo 0. A causa delle semplificazioni relative al DTM, al rilievo di terreno ed al modello di calcolo, è tuttavia necessario che ciascun set di parametri venga tarato sul caso in esame. Prima di procedere con la fase del calcolo della suscettibilità, è perciò fondamentale la fase di taratura dei coefficienti, eseguita indipendentemente su ogni valle, al fine di rendere i risultati compatibili con i dati storici disponibili.

Il principale risultato dell'analisi è una mappatura dell'indice di suscettibilità I_s relativo ai versanti oggetto di indagine, che ha il significato di una pericolosità relativa (cioè una pericolosità avente solo la componente spaziale e non quella temporale) e che consente di identificare in modo semplice ed immediato le zone più "critiche" della valle. Esso è ottenuto tramite formulazione complessa che tiene conto:

- della probabilità che da una determinata area omogenea si generino crolli;
- della dimensione dell'area omogenea;
- della massa media dei blocchi;
- del comportamento reologico dei blocchi lungo le traiettorie seguite.

Sulla base della velocità calcolata da ROTOMAP GIS® per ciascun masso in transito in una cella del versante e della probabilità di rottura associata all'area omogenea di partenza, nel caso particolare di aree di distacco e di transito (o arrivo) unitarie (di lato unitario), da ciascuna delle quali ha origine una sola traiettoria di caduta, l'indice di suscettibilità I_s può essere calcolato come:

$$I_s = \sum_{i=1}^N \cdot m_i \cdot P_{f_i} \cdot \frac{1}{2} \dot{x}_i^2 \quad (2.5.1)$$

dove:

N numero di traiettorie in transito nella cella in esame

P_f probabilità di rottura associata all'area omogenea di partenza di ciascuna traiettoria

\dot{x} velocità

m massa del blocco

Il modello matematico permette comunque di utilizzare maglie di lato non unitario e nel contempo di simulare la partenza di più di una traiettoria da ciascuna maglia con diverse velocità e direzioni di partenza, al fine di avere una copertura migliore sul versante e consentire analisi di tipo statistico. Occorre perciò utilizzare una procedura di normalizzazione che renda confrontabili elaborati ottenuti con dimensioni delle maglie e condizioni iniziali differenti.

Tale normalizzazione viene effettuata moltiplicando l'indice di suscettibilità calcolato (**equazione 2.5.1**) per l'area totale di distacco (cioè il numero di maglie unitarie contenute nell'area di distacco) e dividendolo per il numero totale di traiettorie di partenza.

Un'ulteriore normalizzazione riguarda le dimensioni della maglia di valle, che potrebbe avvenire confrontando le dimensioni della sezione frontale della maglia reale e di quella convenzionale unitaria. Siccome però la sezione frontale delle maglie reali non è univocamente determinata, ma varia in funzione della direzione delle traiettorie, anziché il lato della maglia L viene utilizzato il diametro del cerchio equivalente:

$$\varnothing_{eq} = 2L \sqrt{\pi} \quad (2.5.2)$$

Le procedure di normalizzazione vengono effettuate in modalità automatica e trasparente dal software, per cui non è necessario alcun intervento di *post-processing* addizionale.

Nella sua formulazione più generale, perciò, l'indice di suscettibilità assume la forma:

$$I_s = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot P_{f_i} \cdot \frac{1}{2} \dot{x}_i^2}{n_{start}} \cdot \frac{A_{tot}}{\varnothing_{eq}} \quad (2.5.3)$$

dove:

A_{tot} superficie totale di distacco (somma di tutte le aree omogenee)

n_{start} numero totale di traiettorie simulate

Nell'ambito del progetto PROVIALP è tuttavia necessario tenere conto del fatto che da ogni area omogenea di distacco possono verificarsi diversi cinematismi di instabilità, a ciascuno dei quali sono associati un volume ed una probabilità (spaziale) di rottura, come evidenziato dai rilievi di terreno e dalle analisi meccanico-probabilistiche.

Per riassumere in un unico parametro i risultati delle analisi condotte nelle fasi relative al distacco, è stato perciò introdotto un indice di distacco I_D che viene associato a ciascuna area omogenea e tiene conto del numero di massi che si possono distaccare, della loro probabilità di distacco all'interno dell'area stessa e del loro volume. Nell'ambito del progetto I_D viene calcolato come segue:

$$I_D = \sum_{i=1}^n P_{f_i} \cdot V_i \quad (2.5.4)$$

dove:

n numero totale dei potenziali cinematismi di rottura individuati nell'area omogenea

P_f probabilità di rottura calcolata per ciascun cinematismo

V volume rappresentativo definito in fase di rilievo

Sulla base di questo parametro, l'equazione 2.5.3 assume la forma:

$$I_s = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i \cdot I_{D_i} \cdot \frac{1}{2} \dot{x}_i^2}{n_{start}} \cdot \frac{A_{tot}}{\varnothing_{eq}} \quad (2.5.5)$$

dove:

ρ densità del materiale costituente i blocchi in caduta

Come specificato in precedenza, l'indice di suscettibilità I_s è il risultato principale dell'intera metodologia e rappresenta, a meno della componente di probabilità, l'energia totale che dovrebbe essere assorbita da un metro lineare di rete paramassi, se da ogni metro quadro di area instabile si distaccasse un blocco di roccia. I_s viene calcolato in ogni cella del modello digitale del terreno attraversato da traiettorie di caduta e la sua distribuzione lungo l'asse vallivo consente di identificare le zone potenzialmente colpite da fenomeni di caduta massi, identificando al suo interno diversi livelli di suscettibilità.

È necessario tuttavia notare che la scelta delle classi di valori da associare a I_s per definirne una mappa è particolarmente delicato. Il valore che esso può assumere è infatti teoricamente compreso tra zero e infinito e occorre prestare particolare attenzione alla sua rappresentazione cartografica. Se per esempio I_s assume valori molto elevati ma concentrati in un'area limitata, adottando classi di ampiezza costante può capitare che un numero esiguo di celle aventi I_s molto alto "appiattisca" indistintamente in un'unica classe tutti i restanti valori, rendendo più difficile una corretta interpretazione del risultato.

L'ampio intervallo di variazione dell'indice di suscettibilità può essere imputato a molti fattori prevalentemente legati alla fase di rilievo di terreno. Tra di essi è possibile per esempio citare:

- la morfologia della valle che influenza il rilievo dei volumi potenzialmente coinvolti nei crolli e la velocità di caduta dei massi lungo il versante;

- la distanza delle aree di distacco dal fondovalle (o dalla strada);
- lo stato di fratturazione dell'ammasso che condiziona il numero di cinematismi ed i volumi coinvolti;
- le strumentazioni a disposizione dell'operatore che esegue i rilievi e la sua maturità e capacità tecnica;
- la visibilità delle pareti (neve, vegetazione);
- la sensibilità e l'esperienza del rilevatore.

Per cercare di ovviare a questo inconveniente, si è optato, nel progetto, per una rappresentazione cartografica in cui ogni classe contiene all'incirca un ugual numero di occorrenze, indipendentemente dall'ampiezza dell'intervallo che essa rappresenta.

Sebbene questa scelta consenta di differenziare più chiaramente la distribuzione dell'indice di suscettibilità e renda possibile la comparazione tra zone diverse lungo una valle, essa impedisce di fatto il confronto di mappe ottenute in valli diverse, poiché la classificazione di I_s può essere condotta unicamente con riferimento ad un contesto omogeneo.

Per questi motivi, nel progetto non è stato eseguito alcun confronto né direttamente tra i risultati ottenuti su valli diverse né tra le varie mappe di suscettibilità prodotte e le cartografie di suscettibilità contenute nel DVD allegato al presente volume devono essere considerate valide unicamente alla scala della valle.

Nei paragrafi che seguono vengono descritti in dettaglio i parametri necessari per l'analisi ed i risultati che si ottengono dall'elaborazione.

2.5.2 Parametri di input

Il modulo di calcolo prevede la presenza del file *rotomap_input.txt*, che contiene tutte le informazioni necessarie per condurre le analisi, sia quelle contenute in altri file, sia quelle inserite direttamente dall'operatore. Nel caso di collegamento a file esterni è necessario indicare il nome del file corrispondente, senza estensione e con il percorso completo; le due estensioni che verranno assegnate automaticamente dal modulo sono .HDR e .FLT.

In particolare è necessario indicare:

- *Nome del file contenente la descrizione della superficie topografica del terreno.* Grid in formato binario del modello digitale di terreno.
- *Nome del file contenente la probabilità di rottura (o l'indice di distacco).* Grid in formato binario contenente la probabilità di rottura relativa alle aree omogenee di distacco oppure, come nel caso del progetto PROVIALP, l'indice di distacco I_D calcolato secondo l'equazione (2.5.4).
- *Nome del file contenente le masse dei blocchi (o la densità del materiale).* Grid in formato binario del valor medio della massa dei blocchi in caduta (espresso in tonnellate) oppure, nel caso in cui ci riferisca all'indice di distacco, la densità del materiale.
- *Nome del file contenente i coefficienti di restituzione energetica normale.* Grid in formato binario dei coefficienti di restituzione energetica normale.
- *Nome del file contenente i coefficienti di restituzione energetica tangenziale.* Grid in formato binario dei coefficienti di restituzione energetica tangenziale.
- *Nome del file contenente i coefficienti di attrito.* Grid in formato binario dei coefficienti di attrito.
- *Angolo limite di urto, decollo e rimbalzo.* Angolo massimo oltre il quale il masso cambia le condizioni di moto da volo a roto-scivolamento o viceversa; si osservi che tale angolo non dipende solo dalla geometria del terreno, in quanto viene calcolato nel piano verticale orientato nella direzione del moto.
- *Numero di velocità di partenza (N_v).* Indica quanti blocchi possono distaccarsi con diversa velocità iniziale da ogni punto considerato.
- *Velocità iniziale minima e velocità iniziale massima.* Intervallo di velocità considerato per ogni punto di distacco.
- *Numero di punti di partenza (N_p).* Indica il numero di punti da cui possono staccarsi blocchi all'interno di ogni cella appartenente alle aree omogenee oggetto di analisi.
- *Numero di deviazioni angolari di partenza (N_d).* Indica il numero di direzioni iniziali, diverse da quella di massima pendenza, da far assumere ai massi per ogni punto di distacco. L'ampiezza di tali deviazioni

sarà contenuta entro la deviazione angolare massima.

- *Deviazione angolare massima.* Ampiezza dell'angolo di deviazione dalla direzione di massima pendenza in corrispondenza del punto di partenza dei massi. Il programma farà spaziare le direzioni di partenza nell'intervallo di valori ottenuto dalla direzione di massima pendenza più o meno il valore indicato: definendo ad esempio come deviazione angolare massima un angolo di 15°, i percorsi dei massi avranno una direzione angolare compresa tra +15° e -15° rispetto a quella della massima pendenza. Si può assumere come deviazione massima un valore compreso tra 10° e 40°, fondamentalmente aumentando il valore al crescere della distanza tra i punti di partenza, per garantire una distribuzione di percorsi che assicuri una buona copertura del versante.

Il numero di velocità N_v , il numero di punti N_p ed il numero di deviazioni angolari N_d definiscono il numero totale di simulazioni da ciascuna cella di partenza, che è pari a $N_p \cdot N_v \cdot N_d$. Si ipotizza infatti che i blocchi possano staccarsi da punti diversi della cella e che inizino a muoversi con velocità e direzioni diverse. In tal modo si ottiene uno spettro di condizioni iniziali ampio ed estremamente utile per una distribuzione dei percorsi statisticamente significativa.

- *Valore minimo per la condizione di arresto.* Questo parametro è stato inserito a seguito di un accurato lavoro di taratura del modello su alcune aree campione da tempo monitorate. Da questa analisi è emerso che le approssimazioni derivanti da una non accurata caratterizzazione del versante per l'attribuzione dei coefficienti di restituzione o da una scarsa precisione del modello digitale di terreno in alcune aree, portano a sovrastimare i risultati, in quanto i massi tendono a dissipare troppo lentamente la loro energia durante la fase di caduta, arrestandosi più lontano di quanto atteso. Utilizzando questa opzione è possibile inserire un valore soglia (in termini di energia specifica o di velocità), al di sotto del quale si impone l'arresto del masso per una più corretta simulazione del fenomeno.
- *Pulsanti di scelta per le condizioni di arresto,* precedentemente definite nella casella "Valore minimo condizioni di arresto". È possibile riferire la condizione minima di arresto alle velocità dei blocchi od alla loro energia. Il valore indicato sarà utilizzato come condizione minima per l'arresto del blocco solo nel caso in cui sia raggiunto in fase decrescente, al fine di evitare che il programma arresti i blocchi durante la fase iniziale di caduta.

I dati di *input* relativi all'area campione sono visibili nella **figura 2.5.1**.

Figura 2.5.1 Maschera di immissione parametri di input per ROTOMAP GIS®

The screenshot shows the 'Configurazione' (Configuration) window of the ROTOMAP GIS software. It contains several input fields for file names and numerical parameters, each with a 'Cerca' (Search) button. The parameters include:

- Nome File Topografia: c:\programmi\rotomap_gis\datidiprova\dtm
- Nome File Probabilità Distacco: c:\programmi\rotomap_gis\datidiprova\aree_omo_risk
- Nome File Masse Blocchi: c:\programmi\rotomap_gis\datidiprova\massa
- Nome File Coefficienti Normali: c:\programmi\rotomap_gis\datidiprova\kn_tot
- Nome File Coefficienti Tangenziali: c:\programmi\rotomap_gis\datidiprova\kt_tot
- Nome File Coefficienti Altrito: c:\programmi\rotomap_gis\datidiprova\phi_tot
- Angolo Limite Decollo: 9
- Angolo Limite Urto: 9
- Angolo Limite Rimbazo: 9
- Numero Punti di Partenza per Maglia: 1
- Passo in Maglie Punti di Partenza: 1
- Numero Velocità Iniziali: 1
- Velocità Iniziale Minima (m/s): 0.1
- Velocità Iniziale Massima (m/s): 0.1
- Numero Deviazioni Angolari: 1
- Deviazione Angolare Massima: 0
- Valore Minimo Condizioni di Arresto: 0
- Condizione di Arresto: Energia (kJ) Velocità (m/s)

At the bottom right, there is a 'Reti Paramassi' table with the following structure:

#	X1	Y1	X2	Y2	E	H
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Navigation buttons (left and right arrows) and an 'incolla' (paste) button are located below the table. A 'Conferma' (Confirm) button is at the bottom right of the window.

2.5.3 Risultati dell'analisi

Al termine dell'elaborazione ROTOMAP GIS® genera i seguenti grid in formato binario:

1. *Energia cinetica media*. Rappresentazione delle curve isoenergetiche ricavate dall'elaborazione dei livelli di energia specifica ($V^2/2$) media. Utilizzando la griglia relativa al modello digitale del terreno, ROTOMAP GIS® esegue il calcolo dell'energia di ogni tratto dello scendimento attribuendo al nodo più vicino il valore ottenuto. La somma dell'energia accumulata, divisa per il numero di segmenti associati al nodo fornisce il valore dell'energia media (J/kg) al nodo considerato (**figura 2.5.2**).

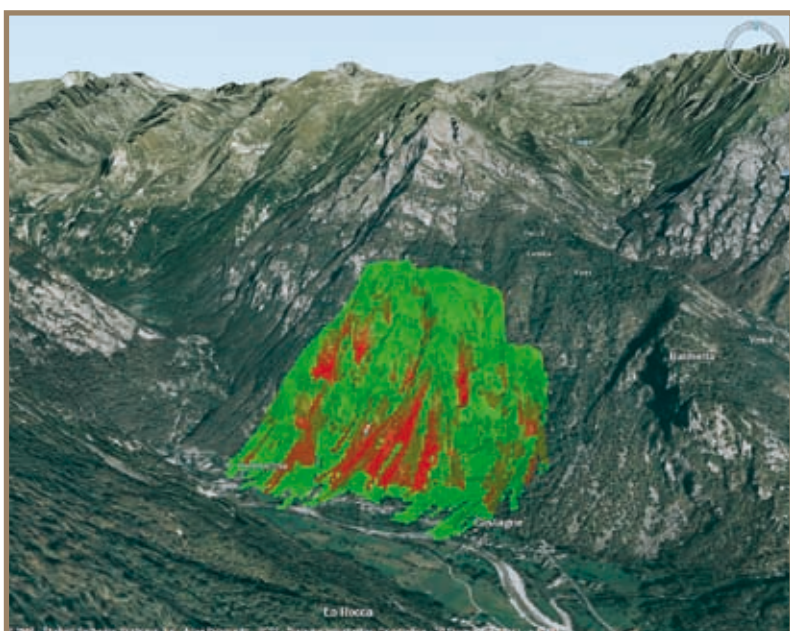


Figura 2.5.2 Esempio di output ottenuto da un'elaborazione di ROTOMAP GIS® e rielaborato con Skyline. Distribuzione dell'energia cinetica media. In rosso le aree a maggiore energia

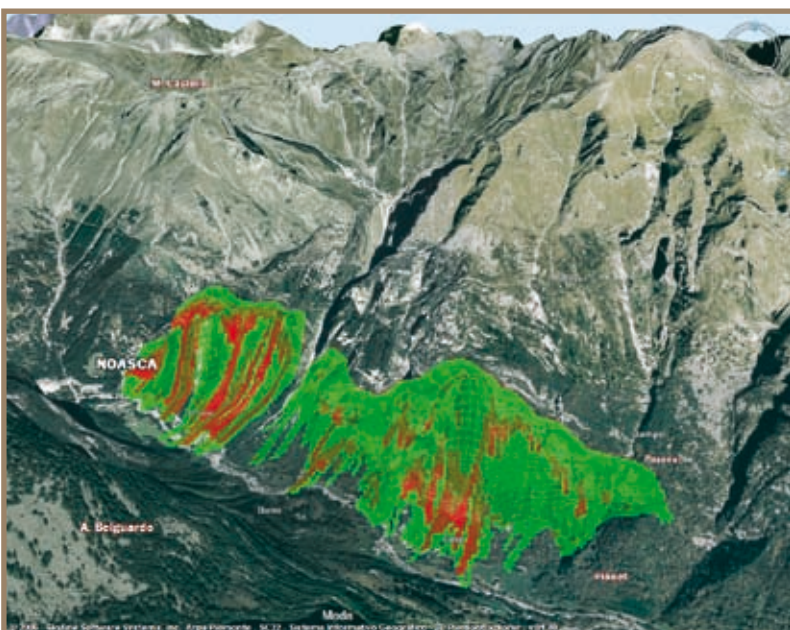


Figura 2.5.3 Esempio di output ottenuto da un'elaborazione di ROTOMAP GIS® e rielaborato con Skyline. Distribuzione dell'energia cinetica massima. In rosso le aree a maggiore energia

2. *Energia cinetica massima*. Rappresentazione delle curve isoenergetiche ricavate dall'elaborazione dei livelli di energia specifica ($\dot{x}^2/2$) massima. Utilizzando la griglia relativa al modello digitale del terreno ROTOMAP GIS® esegue il calcolo dell'energia di ogni tratto della traiettoria di caduta, attribuendo al nodo più vicino il valore massimo ottenuto. La somma dell'energia accumulata, divisa per il numero di segmenti associati al nodo, fornisce il valore dell'energia massima (J/kg) al nodo considerato (**figura 2.5.3**).

3. *Altezze massime di volo*. Grid che rappresenta la distribuzione delle altezze massime raggiunte dai blocchi nelle fasi di volo e rimbalzo. È un parametro molto importante per la verifica delle caratteristiche di eventuali opere di protezione (**figura 2.5.4**).

4. *Distribuzione punti di arresto*. Grid che fornisce la distribuzione dei punti di arresto dei blocchi per evidenziare eventuali zone di accumulo e la massima distanza percorsa dai massi (**figura 2.5.5**).

5. *Indice di suscettibilità I_S* . Come specificato in precedenza, l'indice di suscettibilità è sostanzialmente dato dal prodotto dell'energia cinetica (calcolata) per la probabilità di distacco (input), come descritto dalle equazioni 2.5.3 e 2.5.5. Tale valore viene quindi normalizzato rispetto alla spaziatura tra le maglie di partenza ed al numero di traiettorie simulate per ciascun punto di partenza; infine viene moltiplicato per la superficie delle maglie e diviso per la larghezza corretta, in modo da normalizzare il dato finale anche rispetto alla dimensione delle maglie. Si ricorda che per evitare interpretazioni errate del risultato, è necessario prestare particolare attenzione alla mappatura di tale parametro (**figura 2.5.6**).

Come specificato in precedenza, il risultato principale è costituito dall'indice di suscettibilità, che consente di evidenziare le zone a maggiore pericolosità relativa

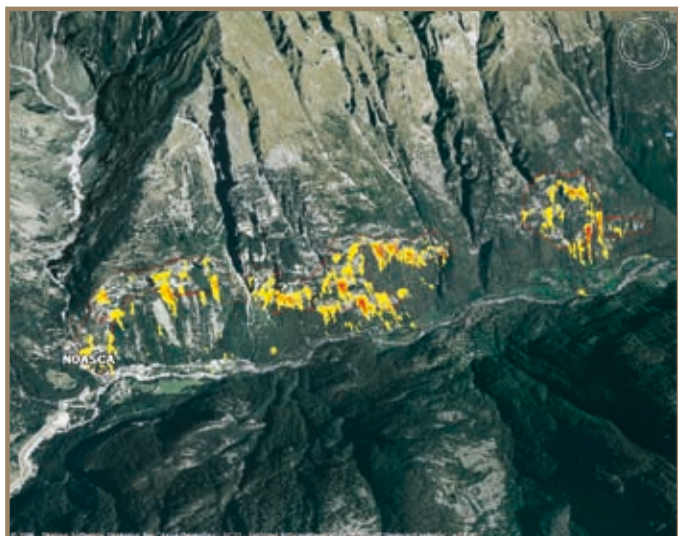


Figura 2.5.4 Esempio di output ottenuto da un'elaborazione di ROTOMAP GIS® e rielaborato con Skyline. Distribuzione delle altezze massime. In giallo sono rappresentate le altezze di volo minori o uguali a 1 m, raggiunte dai massi durante la caduta verso valle. In arancione e rosso i valori di altezza maggiori

spaziale o suscettibilità nell'ambito dell'analisi.

Gli altri prodotti possono comunque avere una grande importanza nell'interpretazione dei risultati e non devono essere trascurati. Per esempio la distribuzione dei punti di arresto fornisce preziose indicazioni per la definizione della vulnerabilità delle strade (principale obiettivo dell'indagine) e consente di identificare le zone di possibile accumulo. La distribuzione delle energie è un'altra informazione molto importante poiché consente di avere un'indicazione sulle velocità che possono raggiungere i massi. Inoltre, confrontata con la distribuzione dell'indice di suscettibilità, essa consente di mettere in luce il ruolo delle condizioni di distacco (numero di cinematismi, volumi e probabilità di rottura) sul risultato finale, distinguendolo dal ruolo delle condizioni di evoluzione (topografia, altezze di distacco, tipo di pendio, uso del suolo).



Figura 2.5.5 Esempio di output ottenuto da un'elaborazione di ROTOMAP GIS® e rielaborato con Skyline. Distribuzione dei punti di arresto dei massi. In giallo e in rosso le celle dove si è fermato il numero maggiore di massi

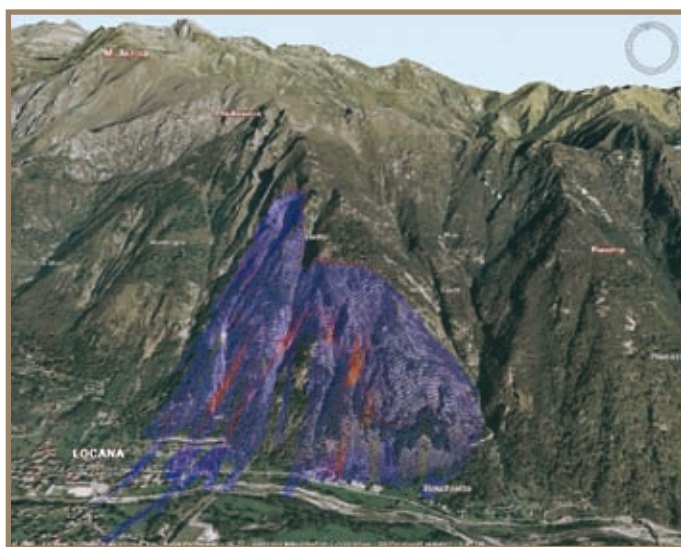


Figura 2.5.6 Esempio di output ottenuto da un'elaborazione di ROTOMAP GIS® e rielaborato con Skyline. Distribuzione dell'indice di suscettibilità I_s . In rosso le aree aventi I_s più elevato

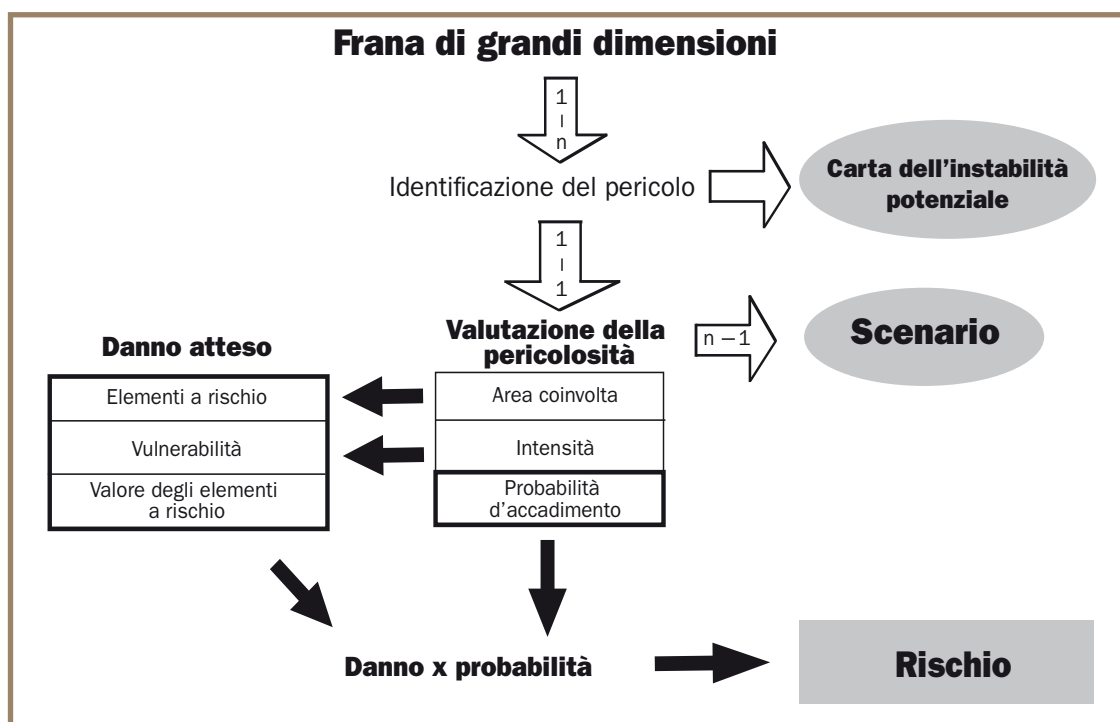
2.6 CONSIDERAZIONI SULLA VULNERABILITÀ CONNESSA AI FENOMENI DI CROLLO LUNGO LA VIABILITÀ ALPINA

Luca Paro - Arpa Piemonte

L'incremento delle interconnessioni tra fenomeni di instabilità naturali ed il tessuto antropico porta ad un aumento delle conseguenze che l'evoluzione di tali fenomeni produce sull'uomo e sullo sviluppo economico di una società. Tutto ciò si traduce in vittime e costi che sempre più è necessario prevedere, prevenire, mitigare.

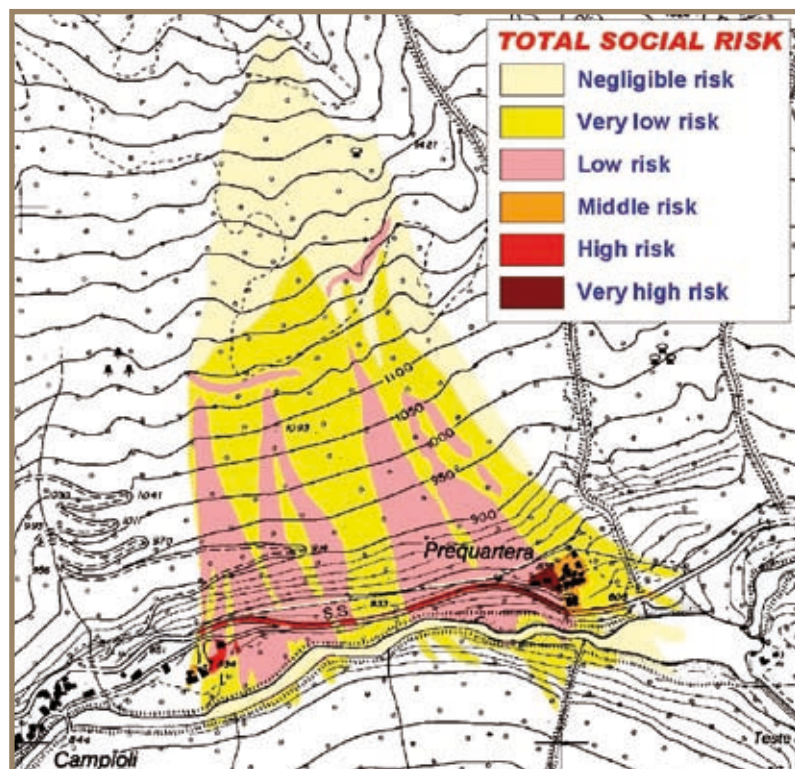
Il primo passo per svolgere queste azioni in modo efficace è condurre analisi di pericolosità e di rischio. I termini *pericolosità* e *rischio* hanno due significati nettamente distinti, anche se troppo spesso utilizzati come sinonimi o in modo scorretto. Con il termine *pericolosità* si intende la probabilità che un fenomeno di una certa intensità si verifichi in una certa area in un determinato periodo di tempo. Il *rischio* è la probabilità che si verifichino conseguenze negative per la vita umana, per i beni e le risorse, per le attività economiche e per l'ambiente, derivanti dall'interazione tra l'evoluzione di eventi naturali e le attività umane (**figura 2.6.1**). Dunque, da un punto di vista più descrittivo e più comprensibile, si può intendere il rischio come la combinazione della pericolosità con il danno (Amatruda et al., 2004; Campus e Paro, 2005; 2007).

Figura 2.6.1 Fasi principali dell'analisi di pericolosità e di rischio sviluppate nell'ambito del progetto IMIRILAND (modificato da Bonnard et al., 2004)



Per la valutazione della pericolosità e del rischio connesso ai fenomeni gravitativi viene in genere utilizzato un approccio di tipo matriciale che mette in correlazione alcuni aspetti base. L'utilizzo di applicativi GIS, che consentono funzioni di *overlay* topologico, velocizza e semplifica le fasi di calcolo e di mappatura del rischio. I livelli informativi raccolti nel GIS, infatti, consentono di realizzare mappe del rischio a partire dalla localizzazione degli elementi a rischio in funzione dello scenario considerato, mediante incrocio con le aree a diversa pericolosità. L'approccio matriciale e l'utilizzo dei GIS è stato favorito dalla introduzione della cosiddetta "analisi quantitativa del rischio" (QRA), sviluppata per la stima del rischio industriale ed oggi applicata in tutto il mondo in innumerevoli campi, compreso quello dei rischi naturali.

Questo processo consente di ottenere diverse rappresentazioni del rischio, valutate in funzione di singoli fenomeni di dissesto o di specifiche categorie di beni. Il risultato finale, che consiste nella perimetrazione del territorio secondo differenti livelli di rischio, costituisce un livello informativo di rilevante supporto alle Autorità competenti (Comuni, Province, Comunità Montane, Regioni, Autorità di Bacino) e fornisce uno strumento oggettivo per l'individuazione degli interventi urgenti di prevenzione e/o delle misure di salvaguardia da adottare (**figura 2.6.2**).



Nei capitoli precedenti sono stati affrontati alcuni temi riguardanti la valutazione della pericolosità legata ai fenomeni di crollo. Infatti, nella metodologia PROVIALP si è posta particolare attenzione alla definizione delle aree potenzialmente instabili, dei volumi mobilizzabili (e quindi dell'intensità del fenomeno) e delle aree di invasione. Non viene invece considerata la probabilità temporale che resta una incognita la cui risoluzione necessita di eccessive speculazioni, soprattutto nel caso dei fenomeni gravitativi. Ciò impedisce, di fatto, la possibilità di condurre una completa analisi di rischio.

Tuttavia, si ritiene importante riprendere nel presente capitolo alcune considerazioni di carattere generale sugli aspetti riguardanti l'analisi delle conseguenze legate ai fenomeni di crollo lungo la viabilità alpina.

Figura 2.6.2 Esempio di mappatura del rischio sociale calcolato secondo la metodologia IMIRILAND per il sito di Ceppo Morelli, valle Anzasca (Vb) (Bonnard et al., 2004)

2.6.1 Analisi delle conseguenze o del danno

Il rischio R è classicamente ottenuto moltiplicando la pericolosità H per il danno atteso D ed è espresso, analogamente alla pericolosità, in termini temporali di probabilità annua:

$$R = H \cdot D \text{ con } H f(I,A,P) \quad (2.6.1)$$

dove:

I intensità del fenomeno

A area di invasione del fenomeno (area di innesco + area di propagazione)

P probabilità di accadimento del fenomeno

L'analisi del rischio s.s. si compone delle seguenti fasi:

- identificazione degli elementi a rischio;
- valutazione degli elementi a rischio E_v ;
- valutazione della vulnerabilità V ;
- calcolo del danno atteso ($D = V \cdot E_v$);
- calcolo del rischio ($R = H \cdot D$).

Come si evince dalla **figura 2.6.1**, le componenti della pericolosità H , area A ed intensità I , vengono utilizzate nell'ambito dell'analisi di rischio rispettivamente per l'individuazione degli elementi a rischio e per la valutazione della vulnerabilità. Da queste considerazioni appare evidente che il calcolo del rischio può essere semplificato come segue:

$$R = P \cdot D \quad (2.6.2)$$

Come accennato precedentemente, la probabilità temporale di accadimento del fenomeno P è un parametro molto importante nell'analisi della pericolosità e del rischio in quanto ne condiziona pesantemente il risultato, ma estremamente difficile da valutare per i fenomeni di crollo. Stime di tale parametro possono essere

effettuate sulla base dell'analisi storica di eventi documentati (da cui si ricava una probabilità dedotta dalla frequenza) o sulla base di analisi delle cause scatenanti (ad esempio, se si considerano delle soglie pluviometriche di innesco dei crolli è possibile ricavare una probabilità dedotta dai tempi di ritorno delle diverse curve di possibilità pluviometrica).

Poiché tali analisi esulano dalle finalità specifiche del progetto PROVIALP, in questo capitolo vengono affrontati, seppur in modo qualitativo o semi-quantitativo, tutti gli aspetti inerenti la valutazione del danno *D*, dalla identificazione degli elementi a rischio al calcolo del danno.

Identificazione degli elementi a rischio

L'identificazione degli elementi a rischio può avvenire in modo generico, conoscendo a priori quali elementi possono essere esposti all'evoluzione di un fenomeno, oppure, in modo più preciso, sovrapponendo geometricamente le aree coinvolte dal fenomeno naturale con le aree antropizzate. Quest'ultimo è un metodo che si adatta molto bene alle tecniche GIS ma che richiede particolare attenzione nella definizione dei limiti delle aree perimetrate.

Nel caso del progetto PROVIALP gli elementi a rischio sono individuati a priori in modo generico e sono: le strade, i veicoli e le persone. Grazie alle analisi di *run out* (capitolo 2.5) è possibile individuare con maggior precisione quali tratti di strada sono potenzialmente coinvolti dai crolli.

Attraverso un'analisi di dettaglio è possibile distinguere diverse tipologie di strade, distinte sia per importanza dei collegamenti sia per dimensioni: strade internazionali, interregionali, statali, regionali, provinciali e comunali; autostrade a carreggiata singola o doppia, a due o più corsie, strade a scorrimento veloce a due o più corsie, strade a carreggiata unica a una o due corsie, strade a senso unico di marcia o a doppio senso, ecc. Queste distinzioni, oltre a condizionarne il valore intrinseco, caratterizzano in genere il tipo di traffico, la velocità dei veicoli e la visibilità lungo la strada.

A differenza delle strade che sono statiche, i veicoli (nel senso più ampio del termine) e le persone sono elementi mobili. La mobilità degli elementi a rischio comporta alcuni problemi nella fase di identificazione in quanto non è possibile conoscere in modo deterministico quali e quanti elementi sono presenti nell'area soggetta a crolli. Anche se è possibile rilevare il numero e le tipologie di veicoli transitanti in uno specifico tratto stradale, il numero di persone ospitate all'interno dei veicoli è di difficile determinazione (**tabella 2.6.1**).

	Traffico commerciale	Traffico turistico				
	indifferenziato	bicicletta	motociclo	automobile	mini-van	autobus
Rapporto minimo	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
Rapporto massimo	1/3	1/2	1/3	1/5	1/9	1/55

Tabella 2.6.1 Rapporto Veicoli/Persone occupanti (minimo e massimo) per le varie tipologie di veicoli

Un altro problema collegato agli elementi a rischio mobili è la loro variabilità nel tempo. Infatti, il traffico lungo una strada varia continuamente durante la giornata, la settimana, i mesi, le stagioni e l'anno. Questa variabilità dipende molto dal tipo di strada considerata (un collegamento internazionale avrà un traffico più costante di una strada locale), dal tipo di traffico (un traffico commerciale è più continuo di uno turistico), dalle condizioni climatiche (condizioni meteo avverse sono meno favorevoli al traffico turistico rispetto alle condizioni di tempo buono), ecc.

Nel tentativo di modellizzare il traffico lungo un asse viario alpino, e la sua variabilità nel tempo, bisogna quindi estendere l'analisi considerando anche l'eventuale presenza di:

- attività turistiche, stagionali (invernali e/o estive) o indipendenti dalla stagione (es. fonti termali);
- attività commerciali/produttive, quali imprese industriali o artigiane, cave o miniere, ristoranti, strutture ricettive (alberghi, B&B, rifugi, ecc) e locali pubblici, infrastrutture di servizio pubblico (scuole, ospedali, musei, uffici amministrativi);
- strutture architettoniche-storiche-religiose di attrazione, quali chiese, abbazie, monasteri, eremi, luoghi

- di culto e di pellegrinaggio, castelli e fortificazioni, antichi borghi alpini;
- mercati settimanali, mostre-mercato, fiere;
- ricorrenze civili, religiose, militari, feste patronali;
- servizi di trasporto pubblico e loro periodicità.

È necessario anche conoscere il numero di abitanti residenti stabilmente o occasionalmente e la loro distribuzione lungo la valle. In questo modo è possibile stimare il volume di traffico locale nei tratti stradali congiungenti i vari centri abitati intravallivi o congiungenti questi ultimi con le aree urbanizzate poste al di fuori della valle. Infatti, nelle vallate alpine di dimensioni modeste in cui sono presenti attività produttive/artigianali che impiegano lavoratori locali, si registrano più picchi di traffico nell'arco della giornata a causa dei trasferimenti dei lavoratori dalle abitazioni alle industrie ed ai laboratori (al mattino e dopo la pausa pranzo) e viceversa (prima della pausa pranzo e nel tardo pomeriggio); se le attività lavorative sono poste lontano dai centri abitati vallivi, pur impiegando lavoratori delle stesse valli, i picchi di traffico che si registrano nell'arco della giornata sono in genere due, uno al mattino ed uno nel tardo pomeriggio/sera. Il caso più frequente è la combinazione dei due fenomeni in cui i picchi di maggior traffico si registrano al mattino ed alla sera ed un picco secondario nelle ore centrali della giornata (linea blu in **figura 2.6.3**).

Durante i giorni festivi, accompagnati da bel tempo, la curva del traffico giornaliero cambia sensibilmente l'andamento. In questo caso, il traffico si trasforma da lavorativo a turistico con un incremento del volume di traffico dovuto ai turisti provenienti dall'esterno della valle. In generale aumentano gli autobus, le automobili, i motocicli e le biciclette e si registrano due picchi giornalieri: uno nella tarda mattinata ed uno nel tardo pomeriggio corrispondenti rispettivamente con l'ascesa e la discesa dei turisti lungo la valle (linea rossa in **figura 2.6.3**). In occasione di festività e/o ricorrenze particolari che richiamano un grande numero di persone, la curva evidenzia un aumento notevole dei picchi di traffico senza subire tuttavia significative modificazioni di forma.

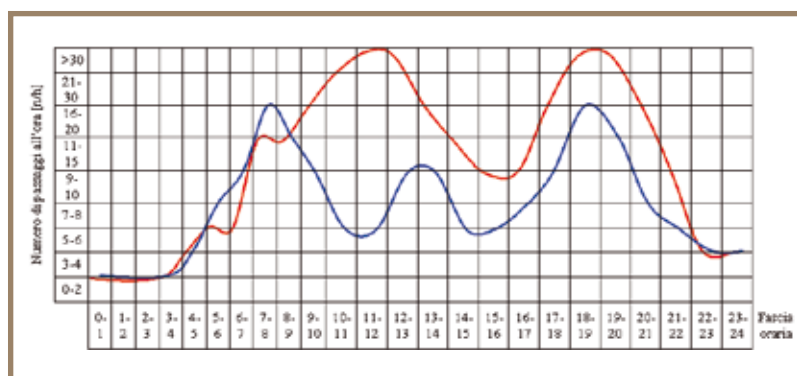


Figura 2.6.3 Esempio di variabilità giornaliera del traffico lungo una strada principale alpina (es. valle di Viù, tratto Germagnano-Viù, valli di Lanzo, Prov. TO) durante un giorno feriale (linea blu) e festivo (linea rossa) nel mese di aprile. In ordinata è riportata l'intensità di traffico calcolata come n° di veicoli totali all'ora, in entrambi i sensi di marcia

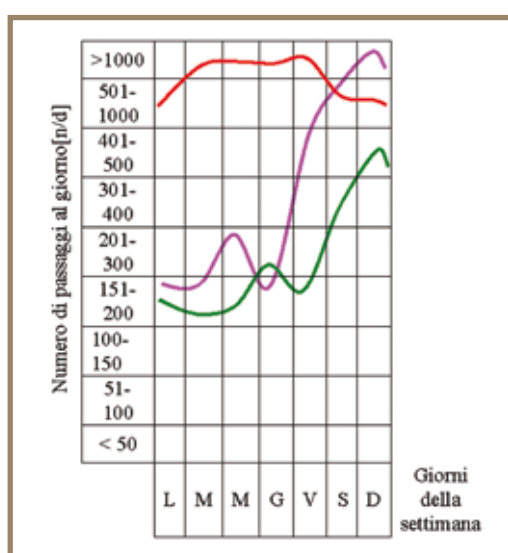


Figura 2.6.4 Variabilità infra-settimanale lungo tre tratti stradali principali in tre diverse valli alpine

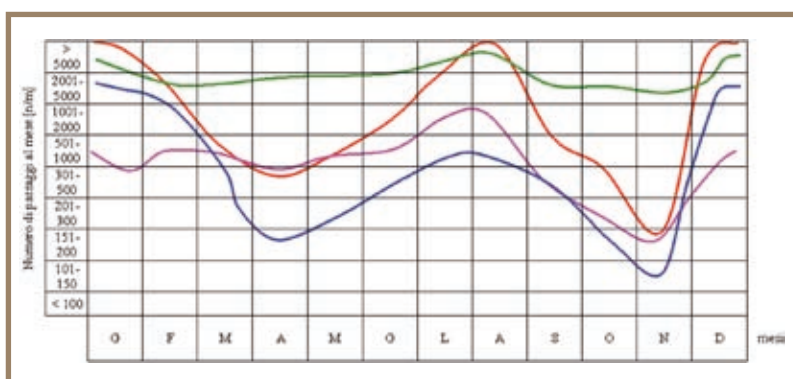
Il tipo di viabilità e di traffico condiziona anche la variabilità settimanale dell'andamento dei transiti nella valle. Infatti, nelle valli caratterizzate da un traffico di tipo locale durante la settimana e di tipo turistico nei fine settimana, l'andamento delle curve di traffico subisce una brusca impennata a partire dalla serata del venerdì ed una netta diminuzione nella serata di domenica; le uniche variazioni infra-settimanali possono essere legate, ad esempio, allo svolgimento di mercati nei centri abitati principali (curve viola e verde in **figura 2.6.4** che si riferiscono a due valli con flussi turistici diversi).

Notevolmente diverso l'andamento delle curve di traffico nelle vallate caratterizzate da una viabilità di tipo commerciale, a scorrimento veloce: in questo caso il volume di traffico, soprattutto pesante, è maggiore durante la settimana; si riduce nella serata di venerdì, in corrispondenza con la fine delle attività lavorative, solo parzialmente compensato dal traffico pendolare e turistico (curva rossa in **figura 2.6.4**).

La variabilità annuale è funzione soprattutto dei flussi turistici che in genere sono maggiori in inverno, in concomitanza con la stagione sciistica, ed in estate.

In **figura 2.6.5** sono riportati quattro esempi di andamenti di traffico in contesti differenti di valli alpine:

- la curva rossa evidenzia un tipico andamento ed un volume di traffico legato alla presenza di comprensori sciistici di tipo alpino, attrezzati con impianti di innevamento, che hanno attrattive turistico-ambientali tali da attrarre un turismo anche estivo;
- la curva blu esemplifica il traffico lungo una valle dotata di impianti sciistici ma che non ha attrattive particolari nel periodo estivo;
- la curva viola è tipica di un traffico in valli alpine senza impianti sciistici e con turismo invernale ridotto ma con modeste attrattive ambientali tali da essere meta turistica nel periodo estivo;
- la curva verde rappresenta il traffico lungo una viabilità prevalentemente commerciale, a veloce scorrimento ed intenso traffico di tipo pesante, che si mantiene costante per tutto l'anno, con leggeri incrementi dovuti al turismo nelle stagioni estiva ed invernale.



Un ulteriore aspetto da considerare nella fase di identificazione degli elementi a rischio riguarda l'esposizione, che esprime la possibilità della presenza di elementi a rischio nell'area soggetta a pericolo. Queste considerazioni hanno particolare valore per gli elementi mobili in quanto la loro velocità ed il tempo di permanenza/transito in un'area di pericolo condiziona fortemente la probabilità che essi subiscano un danno (vedi oltre).

Figura 2.6.5 Variabilità annuale

lungo quattro tratti stradali principali in diverse valli alpine

Valutazione degli elementi a rischio

La valutazione degli elementi a rischio, ossia l'attribuzione di un valore a tali elementi, è una fase assai delicata da cui dipende l'esito dell'intera analisi del rischio. L'attribuzione di un valore agli elementi a rischio è un aspetto controverso in quanto risulta difficile esprimerlo univocamente. Se, ad esempio, è possibile attribuire un valore monetario alle attività economiche o ai beni, ciò risulta difficile nel caso delle persone o dei beni ambientali. Inoltre, la valutazione degli elementi a rischio è fortemente legata al contesto politico, sociale, culturale e religioso in cui viene condotta l'analisi di rischio. Per la nostra società, ad esempio, paradossalmente si verifica che il valore di un ferito è due-tre volte superiore a quello di una persona deceduta nel corso di un evento calamitoso, a causa dei costi delle cure e dell'assistenza delle persone ferite o con invalidità permanenti (Morelli e Paro, 2005; 2007).

Una possibile soluzione a questo problema è quella di mantenere separate le varie tipologie di valori. Nella metodologia predisposta nel progetto IMIRILAND, Progetto europeo dedicato all'analisi di pericolosità e rischio connessi ai grandi fenomeni gravitativi (Bonnard et al., 2004), sono state distinte quattro categorie di valori:

- *Fisico*: valore dei beni, in considerazione della loro tipologia e di eventuali costi di ripristino e/o ricostruzione.
- *Economico*: valore legato alle attività produttive e commerciali (fatturato, guadagni, introiti, ecc.).
- *Sociale*: valore legato alla presenza dell'uomo ed alla utilità sociale di un bene (ad esempio di un ospedale).
- *Ambientale*: valore floro-faunistico e paesaggistico (storico-culturale-architettonico) di un'area.

Un elemento a rischio può avere una o più di queste categorie di valori. Ad esempio, una strada ha un valore fisico (per i costi di costruzione e manutenzione), un valore economico (per il valore delle merci trasportate), un valore sociale (per le persone che vi transitano) ed anche un valore ambientale (nel caso in cui si tratti, ad esempio, di una antica via alpina).

Per evitare problemi di calcolo connessi alla distinzione delle quattro categorie di valori, la metodologia

IMIRILAND ha adottato la soluzione di procedere con quattro distinte analisi di rischio, mantenendo quindi separate le tipologie di valori. Nell'ambito dello stesso progetto si è deciso inoltre di fare ricorso a valori gerarchici relativi suddivisi in quattro classi (da 1, valore minore, a 4, valore massimo) per evitare problemi connessi alle valutazioni di tipo monetario.

Il valore di una strada dipende da molti fattori connessi con il tipo di collegamento, le caratteristiche costruttive, il tipo e la variabilità di traffico, le quantità ed il valore delle merci trasportate, il numero di persone in transito, ecc. Tutti questi aspetti condizionano una variabilità del valore di una strada in termini sia spaziali sia temporali, anche nell'ambito dello stesso asse viario.

Il valore fisico è massimo per le autostrade (a una o due carreggiate, a due o più corsie) e decresce progressivamente per le strade a scorrimento veloce, per le strade statali, regionali, provinciali e comunali; il valore di ciascuna tipologia aumenta in corrispondenza dei tratti in cui sono presenti opere particolari (viadotti, ponti, gallerie). Il valore fisico tiene conto dei costi di costruzione e manutenzione della strada, comprese le opere di stabilizzazione dei versanti per la sicurezza del traffico.

Il valore economico è massimo per la viabilità internazionale e nazionale che collega centri produttivi/commerciali strategici, attraverso le quali transitano merci ed interessi economici pari a qualche punto percentuale del PIL europeo. Particolarmente significativi sono anche gli assi viari intravallivi che consentono l'accesso alle principali aree turistiche che hanno un notevole peso a livello locale, regionale e/o nazionale, sia per il giro d'affari sia per il numero di persone occupate. Il valore economico cresce anche in considerazione del fatto che molto spesso queste strade sono le uniche vie di accesso e transito esistenti in valle. Tale valore considera numerosi aspetti economici: le merci trasportate, il fatturato delle attività produttive/commerciali che utilizzano la strada, gli introiti derivanti dai pedaggi, ecc.

Il valore ambientale di una strada è in genere assai limitato e può essere valutato in ragione del valore storico che hanno alcune vie alpine o del valore florofaunistico delle aree attraversate (aree di protezione, parchi, aree di riforestazione, ecc.).

Il valore sociale di una strada è assai più complesso in quanto dipende direttamente dal numero di persone che vi transitano ed indirettamente dal numero di persone che mette in collegamento. Il valore sociale di una strada cresce quindi in funzione del collegamento tra i vari centri abitati della valle e di questi con i servizi di importanza sociale quali ospedali, scuole, uffici amministrativi, ecc. Tale valore viene ulteriormente esaltato qualora la strada in questione sia l'unico collegamento possibile.

Vulnerabilità degli elementi a rischio

Per quanto riguarda la vulnerabilità degli elementi a rischio, essa esprime il grado di perdita che gli elementi a rischio (siano essi beni o persone) possono subire qualora coinvolti da un evento. La vulnerabilità è funzione sia del tipo di elemento considerato sia del tipo e dell'intensità del processo, in quanto è il risultato dell'interazione tra l'energia liberata dall'impatto dell'evento sull'elemento a rischio e la capacità di quest'ultimo di resistere all'impatto stesso.

Per valutare la vulnerabilità possono essere utilizzati vari approcci che si differenziano notevolmente nel dettaglio dell'analisi e conseguentemente nel risultato finale. Alcuni approcci non tengono conto del tipo di movimento gravitativo, altri non considerano l'intensità del processo, altri ancora valutano la vulnerabilità utilizzando criteri differenti per le diverse tipologie di elementi a rischio, soprattutto rispetto alle persone. Non esiste infatti una metodologia univoca e consolidata per la valutazione della vulnerabilità. Anche il gruppo di lavoro sulle frane afferente alla IUGS (*International Union of Geological Sciences*, IUGS/WGL/CRA, 1997) ha messo in evidenza che "nonostante l'identificazione degli elementi a rischio e delle loro caratteristiche sia sufficientemente sviluppata, lo stato dell'arte per la valutazione della vulnerabilità è in generale inadeguato". Per gli elementi strutturali (edifici, strade, ferrovie, ecc.), la valutazione della vulnerabilità dipende dal modello che mette in relazione l'evoluzione della frana con la struttura considerata. Ciò è relativamente ben documentato nel caso dei fenomeni di crollo mentre lo è meno nel caso delle colate detritiche e dei movimenti lenti di versante. Infatti, nel caso dei crolli è più facile la modellazione matematica delle traiettorie di caduta dei blocchi da cui è possibile ottenere anche l'energia di impatto; inoltre, in letteratura

sono disponibili numerosi esempi di sperimentazioni, sia in laboratorio sia in siti reali, di caduta di blocchi con diversa geometria e volume per registrarne gli effetti (traiettorie, velocità, energia d'impatto, perdite energetiche durante gli impatti con diversi materiali, vulnerabilità degli oggetti impattati, ecc.).

La vulnerabilità può essere valutata attraverso un approccio quantitativo, utilizzando valori percentuali (da 0 al 100 %) o decimali (tra 0 e 1) per esprimere una perdita nulla, parziale o totale. La difficoltà di esprimere in modo quantitativo la vulnerabilità ha portato allo sviluppo di numerose metodologie che utilizzano un approccio di tipo euristico, che definiscono la vulnerabilità in modo qualitativo o semi-quantitativo suddivisa generalmente in classi (**tabella 2.6.2**). Questi metodi si basano su stime spesso soggettive o sull'utilizzo di apposite matrici.

Ne è un esempio la metodologia IMIRILAND in cui si è deciso di suddividere la vulnerabilità in quattro categorie (fisica, economica, sociale ed ambientale), analogamente alla categorie di valori esposte nel paragrafo precedente. Sono state pertanto individuate le seguenti vulnerabilità:

Physical vulnerability		
Vulnerability description	Loss range	Index
Intact structures	0	0
Local damages	1÷25%	0.25
Seriously damages (possible to repair)	26÷50%	0.5
Mostly destroyed (difficult to repair)	51÷75%	0.75
Total destruction (out of use; e.g. >5% inclination)	76÷100%	1

Economical vulnerability	
Vulnerability description	Index
Non interruption	0
Short temporary interruption (hours to day)	0.25
Average temporary interruption (days to week)	0.5
Long temporary interruption (weeks to months)	0.75
Permanent interruption	1

Social vulnerability	
Vulnerability description	Index
Non affected persons	0
Non physical damages, evacuated persons	0.25
Physical damages (person continue their activities)	0.5
Seriously wounded persons (50% disability)	0.75
Died, 51-100% disability	1

Environmental vulnerability		
Vulnerability description	Loss range	Index
Intact element	0	0
Local loss	1÷25%	0.25
Seriously damages (possible to repair)	26÷50%	0.5
Mostly destroyed (difficult to repair)	51÷75%	0.75
Total destruction	76÷100%	1

Tabella 2.6.2 Esempi di tabelle di conversione qualitativo-quantitativo della vulnerabilità suddivisa in 5 classi per ciascuna delle quattro tipologie individuate nella metodologia IMIRILAND (Amatruda et al., 2004)

Nel caso di crolli lungo la viabilità stradale, la vulnerabilità dipende quindi sia dagli impatti diretti sia dagli effetti indiretti che il fenomeno produce su strade, veicoli e persone.

L'impatto diretto dei massi sulla strada determina danni di tipo strutturale (dalla semplice intaccatura o asportazione dell'asfalto fino alla distruzione totale) e di tipo funzionale (interruzione alla viabilità). La durata dell'interruzione al traffico condiziona gli effetti indiretti che saranno maggiori quanto più lunga è l'interruzione al traffico. Tale proporzione non è sempre lineare ma segue delle funzioni di utilità che considerano l'esistenza di vie alternative (**figura 2.6.6**).

- **Vulnerabilità fisica.** Considera (a) l'intensità del fenomeno (velocità o energia), (b) il tipo, la funzione e la resistenza della struttura, (c) lo stato di manutenzione e la capacità di deformazione della struttura.
- **Vulnerabilità economica.** Considera (a) l'intensità del fenomeno (in grado di produrre interruzioni temporanee o definitive delle attività economiche), (b) il tipo di attività economica o di servizio coinvolto (industriale, turistico, trasporti, ecc.), (c) la possibilità di evitare disagi (ad esempio attraverso l'utilizzo di strade alternative).
- **Vulnerabilità sociale.** Considera (a) l'intensità del fenomeno (in relazione ai tempi di allertamento), (b) la sensibilità della popolazione (funzione dell'età e dell'esperienza delle persone e della capacità di anticipare l'evento), (c) la capacità delle persone di comprendere il fenomeno e di allontanarsi dalle zone coinvolte.
- **Vulnerabilità ambientale.** Considera (a) l'intensità del fenomeno (in relazione agli effetti negativi che produce direttamente o indirettamente sui beni ambientali), (b) le tipologie di beni ambientali (specie floro-faunistiche ed elementi antropici), (c) grado di resistenza delle strutture antropiche (quali villaggi storici alpini) o capacità di ripopolamento delle specie naturali (in particolare delle specie endemiche o rare).

Per quanto riguarda l'impatto tra i tronchi e gli elementi mobili si possono distinguere 3 casi (in accordo con Bunce *et al.*, 1997):

1. *Blocco in caduta su elemento in movimento.* Il grado di vulnerabilità dipende dall'energia cinetica del sistema blocco-veicolo (energia del blocco in caduta + energia del veicolo in movimento) e dalle caratteristiche strutturali dell'elemento a rischio. Poiché l'energia è funzione della massa e della velocità di un corpo, un blocco di piccole dimensioni che urta contro un veicolo che procede a grande velocità è in grado di produrre danni molto gravi. Infatti, la cronaca recente ha testimoniato alcuni esempi drammatici in cui si sono verificati incidenti mortali a causa del lancio doloso di piccole pietre dai ponti sulle autostrade. L'impatto di piccoli blocchi (pochi dm³) su veicoli ad alta velocità (> 100 km/h) ha causato la rottura del parabrezza, colpito direttamente gli occupanti dei veicoli e/o provocato la perdita di controllo del mezzo. Sulle strade montane, considerando le cause di distacco naturali, tali accadimenti sono più rari in quanto le velocità dei veicoli sono in genere minori o sono elevate per brevi tratti; in questo caso gioca un ruolo preponderante l'energia del blocco in caduta.

Le caratteristiche strutturali dell'elemento a rischio ne condizionano intuitivamente la vulnerabilità. La stessa energia liberata durante l'impatto del blocco con l'elemento produce effetti diversi a seconda del tipo di elemento (persona, motociclo, automobile, ecc.) ed effetti diversi a seconda della parte colpita dell'elemento. Infatti, un piccolo blocco che colpisce una persona può produrre da semplici lesioni al decesso a seconda se viene colpito un arto o la testa. Una persona senza casco è più vulnerabile di una dotata di casco o che si trova all'interno di un abitacolo di un autoveicolo, ecc. Gli autoveicoli hanno una resistenza maggiore nei confronti degli urti frontali rispetto agli impatti nella parte superiore (cristalli, cofano, capotte), dove generalmente colpiscono i blocchi in caduta.

2. *Blocco in caduta su elemento in sosta temporanea.* Il grado di vulnerabilità dipende dall'energia cinetica del blocco in caduta e dalle caratteristiche strutturali dell'elemento a rischio. Essendo l'elemento a rischio ad un livello di energia cinetica nullo, l'impatto è determinato esclusivamente dall'energia posseduta dal blocco in caduta e, quindi, dalla sua massa e dalla sua velocità. Le considerazioni sulle caratteristiche di resistenza dell'elemento a rischio sono analoghe a quelle espresse al precedente punto 1.
3. *Elemento in movimento che urta un blocco caduto.* Il grado di vulnerabilità è funzione delle dimensioni del blocco che occupa la carreggiata e delle caratteristiche costruttive e dell'energia dell'elemento a rischio. In questo caso il blocco ha un livello di energia cinetica nullo e l'impatto dipende esclusivamente dall'energia cinetica dell'elemento a rischio. Ma se il blocco caduto non occupa tutta la carreggiata o è di piccole dimensioni, il veicolo, pur avendo una elevata energia, può non subire alcun danno o danni lievi. Maggiori sono le dimensioni del blocco ed il livello energetico dell'elemento mobile, maggiore è il livello di vulnerabilità. Nel caso di un elemento mobile che urta contro un blocco caduto sulla strada, l'impatto avviene in genere nella parte frontale o latero-frontale del mezzo che per gli autoveicoli corrisponde alla parte più resistente. Anche per le persone occupanti l'autoveicolo la vulnerabilità può essere contenuta grazie alle dotazioni di sicurezza di cui sono provviste alcune automobili moderne (airbag, barre antisfondamento, materiali ad assorbimento d'urto, ecc.).

Calcolo del danno atteso

Il danno atteso, in genere, viene espresso come il risultato della moltiplicazione tra il valore dell'elemento a rischio per la vulnerabilità:

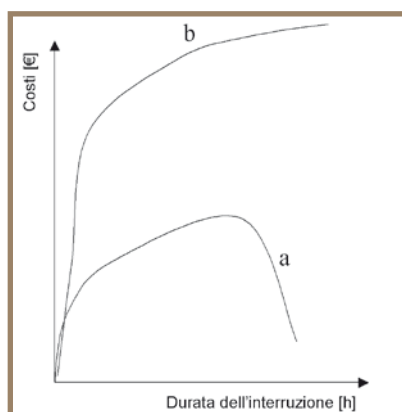
$$D = E_v \cdot V \quad (2.6.3)$$

Si tratta quindi di una fase che avviene attraverso un processo oggettivo ed automatico (calcolo matematico). È quindi evidente che le fasi precedenti devono essere condotte con assoluto rigore al fine di ridurre il più possibile il grado di soggettività nella procedura.

In questa fase è possibile mantenere separato il danno diretto (impatto dei blocchi sulla strada, sui veicoli e sulle persone) dal danno indiretto (interruzione del traffico). Come accennato nel paragrafo precedente,

la durata dell'interruzione al traffico condiziona gli effetti indiretti che saranno maggiori quanto più lunga è l'interruzione al traffico. Tale proporzione non è sempre lineare, ma segue delle funzioni di utilità che considerano l'esistenza di vie alternative, già presenti in loco o costruite in seguito all'evento che ha determinato la chiusura al traffico (Crosta *et al.*, 2001; Einstein, 1988). La chiusura al traffico di una strada produce immediatamente un danno che cresce rapidamente nelle prime ore di interruzione. Nel tempo, la tendenza di crescita del danno diminuisce in quanto la fase di ripristino porta alla riapertura al traffico della stessa strada o alla apertura di un nuovo asse stradale (**figura 2.6.6**).

Figura 2.6.6 Esempi di curve di utilità applicate alla valutazione del danno legato alla interruzione del traffico (a - esistono già strade alternative al momento dell'interruzione; b - le strade alternative vengono costruite in seguito all'evento)



La presenza di vie alternative diminuisce sensibilmente il danno economico ed il danno sociale. Ad esempio, durante l'evento alluvionale dell'ottobre 2000 che coinvolse gran parte del Piemonte, si verificò un imponente fenomeno gravitativo che causò il crollo di alcuni blocchi sulla strada provinciale della valle Anzasca, unico collegamento per il rinomato centro turistico di Macugnaga. L'interruzione al traffico che ne seguì, oltre ad isolare metà valle, poneva seri problemi per la imminente stagione invernale a causa dell'impossibilità, da parte dei turisti, di raggiungere la stazione sciistica. Sebbene il ripristino della provinciale fosse fattibile in poco tempo e con poca spesa, permanevano condizioni di instabilità dei versanti elevate, tali da suggerire ai gestori del rischio di aprire un nuovo collegamento. In pochi giorni venne studiato il

percorso alternativo sul versante opposto, al sicuro dalla caduta dei blocchi; nelle settimane successive vennero posati due ponti provvisori per attraversare il torrente e fu costruito il nuovo tratto stradale *by-pass* che collegava il vecchio tracciato della provinciale, a monte e valle della zona a pericolosità elevata. Tale intervento, realizzato in tempi utili, permise di salvare la stagione turistica senza compromettere l'economia della valle. Tale collegamento è tuttora funzionante in modo permanente in quanto è stata decisa la dismissione del tratto di strada provinciale coinvolto dai crolli nell'ottobre 2000.

L'esposizione al rischio

Un altro aspetto molto importante nell'analisi di rischio è il concetto di *esposizione*. Nelle diverse discipline tale concetto è trattato in modo differente ed attualmente, per i fenomeni naturali, non è stato ancora formalizzato in letteratura in modo sistematico. In generale, l'esposizione si riferisce a quanto e come un certo fenomeno interagisce con gli elementi a rischio. Nel caso dei fenomeni naturali, l'esposizione è legata essenzialmente alla mobilità/staticità degli elementi a rischio: ogni elemento è caratterizzato da una esposizione ad un determinato tipo di processo in ogni punto dello spazio in funzione del tempo trascorso in quel punto. Tale concetto può essere espresso anche in termini probabilistici indicando la probabilità spaziale e temporale che un elemento sia soggetto ad una certa pericolosità o, in altri termini, è la probabilità che un elemento si trovi nel punto *x* al tempo *t*. Da questa espressione risulta evidente che l'esposizione è direttamente proporzionale con la mobilità dell'elemento a rischio (Crosta *et al.*, 2001).

Per esprimere la probabilità è necessario riferirsi ad un certo intervallo temporale e comunemente ci si riferisce a probabilità annue (diversamente si possono calcolare probabilità giornaliere, settimanali, mensili, ecc.). Per gli elementi statici, come una strada, l'esposizione nel punto *x* è uguale a 1, poiché sono esposti al pericolo esistente in ogni secondo dell'intera durata della strada e/o del pericolo. Per gli elementi mobili, come le persone o i veicoli, tale valore diminuisce. Ad esempio, una persona che transita per 10' ogni giorno lungo un tratto di strada in cui possono verificarsi dei crolli ha una esposizione di $10' / (60 \cdot 24h \cdot 7g) = 1 \cdot 10^{-3} / \text{settimana}$, ovvero $10' / (60 \cdot 24h \cdot 365g) = 2 \cdot 10^{-5} / \text{anno}$. Un assiduo alpinista che permane in arrampicata su pareti potenzialmente instabili per 5 ore alla settimana ha una esposizione di $5h / (24h \cdot 7g) = 3 \cdot 10^{-2} / \text{settimana}$, ovvero $5h / (24h \cdot 365g) = 6 \cdot 10^{-4} / \text{anno}$. Da questo rapido calcolo risulta evidente come l'esposizione dell'alpinista sia di un ordine di grandezza superiore a quello del passante. Questi valori, in termini fisici, rappresentano i livelli di esposizione delle persone, considerando costanti nel tempo le condizioni di pericolosità (Alexander, 2004).

L'esposizione si modifica se si considerano anche le condizioni significative di pericolosità ossia quelle legate, ad esempio, alle cause innescanti. Nel caso dei crolli, considerando quali cause d'innescio le precipitazioni ed i cicli gelo-disgelo, è possibile ricalcolare l'esposizione del passante dell'esempio precedente, considerando solo i giorni di precipitazione intensa e quelli in cui avvengono i cicli gelo-disgelo (per esempio, tot. 188 giorni/anno): $10' / (60' \cdot 24h \cdot 365g) \cdot (365/188) = 1 \cdot 10^{-5} / \text{anno}$, ossia la metà del valore calcolato precedentemente. Per gli elementi mobili, quali i veicoli e le persone, l'esposizione è legata anche alla velocità con cui tali elementi transitano nell'area soggetta al pericolo nel tempo di riferimento. Nel caso il fenomeno di crollo sia già avvenuto e quindi siano presenti dei massi sulla strada, l'esposizione di elementi mobili dipende anche dalla reazione dell'elemento al pericolo (fuga, deviazione, arresto, ecc.). Questa reazione è influenzata, oltre che dalla velocità dell'elemento, dalla visibilità dell'ostacolo, dalla reattività dell'elemento a rischio, dalla larghezza della strada, dalla presenza di vie di fuga, ecc. In base alle considerazioni appena espresse, rispetto all'esempio precedente, il passante che si trova a transitare sotto una parete suscettibile di crolli ha una vulnerabilità potenziale maggiore rispetto allo scalatore in quanto, in genere, non è dotato di protezioni (caschetto ed imbragatura) ed il suo livello di attenzione è tale per cui non gli è possibile cambiare posizione per minimizzare gli effetti di un impatto (spostando la testa, riparandosi con le braccia, ...). Il livello di attenzione inferiore rispetto allo scalatore determina una esposizione maggiore del passante in quanto, senza preavviso, non è in grado di sottrarsi all'impatto. Tuttavia, come abbiamo visto, il passante è generalmente sottoposto a rischi minori perché è inferiore la sua esposizione al pericolo, essendo minore il tempo trascorso sotto la parete rispetto allo scalatore.

In una trattazione probabilistica è quindi necessario tenere conto dell'esposizione E_s che, nella formulazione del rischio, può rientrare come fattore correttivo:

$$R = P \cdot D \cdot E_s \quad (2.6.4)$$

dove:

$$0 \leq E_s \leq 1$$

$E_s = 0$ se non vi sono elementi a rischio o se la pericolosità è nulla (per cui anche D ed R sono $= 0$)

$E_s = 1$ nel caso di elementi a rischio di tipo statico per cui $R = f(P, D)$

Nel caso di elementi mobili che sostano temporaneamente nell'area soggetta a crolli la loro esposizione è proporzionale al tempo di sosta (questa situazione si può verificare quando un elemento sosta volontariamente o quando vi è costretto a causa della presenza di blocchi o altri impedimenti che interrompono il traffico). Se gli elementi mobili attraversano un tratto di strada soggetto a crolli, la loro esposizione è funzione del tempo di permanenza dell'elemento nel tratto in cui esiste il pericolo. Quest'ultimo aspetto è quindi funzione della velocità dell'elemento e della lunghezza del tratto di strada soggetto a crolli. La velocità dell'elemento a rischio dipende a sua volta dalla tipologia di elemento (persona a piedi, in bicicletta, in motocicletta, in autoveicolo, ecc.), dalle caratteristiche della strada (larghezza, tortuosità, visibilità, pendenza positiva o negativa, ecc.), dai limiti di velocità imposti (restrizioni a causa della presenza di centri abitati, di scuole o di ospedali, di lavori in corso, ecc.), dall'età e dallo stato di salute delle persone che transitano, ecc.

In letteratura sono stati proposti alcuni metodi che, seppur non sempre esplicitamente, permettono una valutazione dell'esposizione. Pierson *et al.* (1990) hanno elaborato un processo per la gestione dei versanti rocciosi lungo le vie di traffico chiamato *Rockfall Hazard Rating System* (RHRS). In questa procedura, tra gli altri fattori, viene calcolato l'*Average Vehicle Risk* (AVR) che "rappresenta la percentuale di tempo in cui i veicoli sono presenti nel tratto soggetto a crolli":

$$AVR (\%) = [(ADT \cdot L_s) / (PSL \cdot 24)] \cdot 100\% \quad (2.6.5)$$

dove:

ADT traffico giornaliero medio (auto/giorno)

L_s lunghezza del tratto di strada soggetto a crolli (km)

PSL limite di velocità imposto (km/h)

Crosta e Locatelli (1999) hanno aggiunto altri parametri al RHRS che considerano aspetti legati alla esposizione: la distanza necessaria al riconoscimento visivo dell'ostacolo, il tempo di reazione del conducente, la velocità media di percorrenza (o limite di velocità imposto), la frequenza di transito, la direzione di percorrenza che influenza il campo di visibilità (distanza e angolo).

Tali parametri evidenziano l'estrema difficoltà di arrivare ad una valutazione precisa del rischio per problemi di tipo dinamico, in cui gli elementi mobili sono presenti transitoriamente nell'area soggetta a crolli.

Tutte le considerazioni espresse nel presente capitolo sono importanti ai fini della gestione del rischio che, in ultimo, è la vera finalità di tutte le analisi del rischio.

2.7 APPLICAZIONE DELLO STRUMENTO AD ALCUNI SITI CAMPIONE

La metodologia sviluppata è stata applicata su alcune aree campione caratterizzate da una differente geologia e morfologia al fine di validare le conclusioni ottenute.

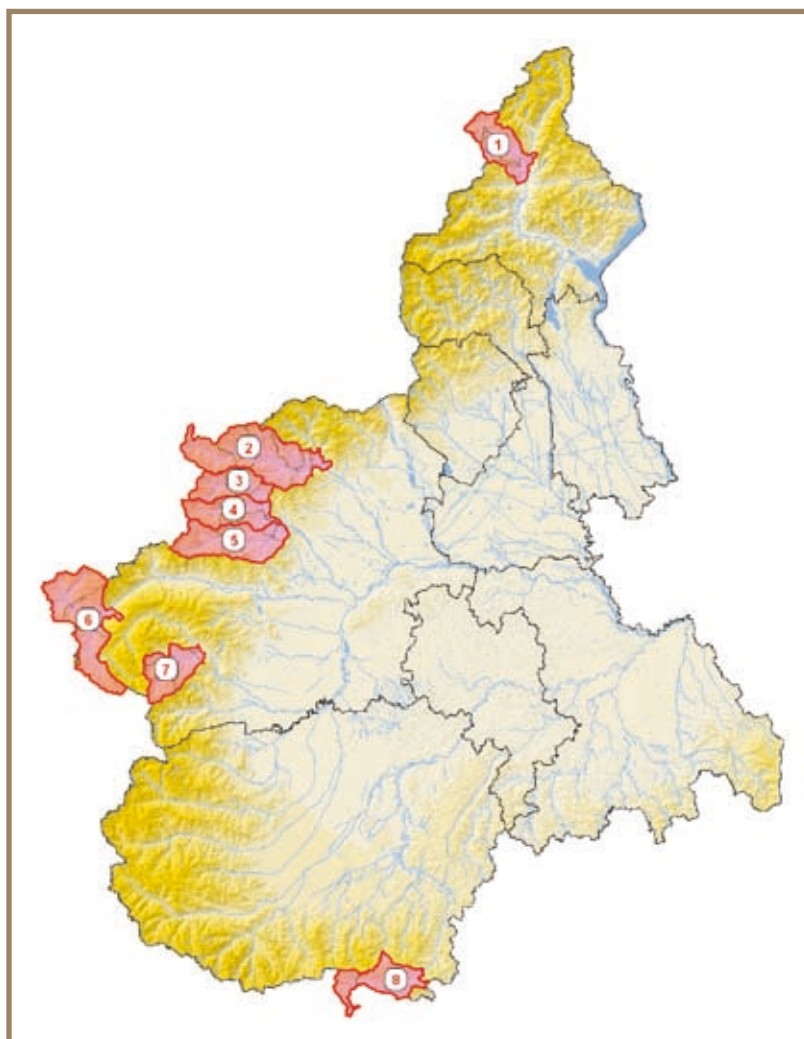


Figura 2.7.1 Aree interessate dai rilievi PROVIALP. 1-Valle Divedro, 2-Valle Orco, 3-Valle Grande di Lanzo, 4-Valle di Ala di Lanzo, 5-Valle di Viù di Lanzo, 6-Valle di Susa, 7-Valle Germanasca, 8-Valle Tanaro

presentativi per la pericolosità dell'intera valle, mentre per la seconda, i dati hanno richiesto un maggiore approfondimento che non ha permesso il suo inserimento nel testo. Si tenga presente che, nei paragrafi seguenti, i riferimenti specifici alle aree omogenee tramite un numero corrispondono nel database alla parte numerica del campo "Sigla area omogenea".

La scelta delle vie di comunicazione è stata effettuata sulla base del carattere transfrontaliero, dell'importanza sociale, storica ed economica e della localizzazione strategica delle vie stesse. In particolare, la scelta è stata fatta sulla base della frequentazione della strada e sul suo valore storico e ambientale (presenza di parchi naturali, vie di comunicazione commerciali, antiche vie militari). Complessivamente sono state selezionate 8 valli di importanza regionale che raggruppano in sé alcune centinaia di chilometri di viabilità (**figura e tabella 2.7.1**):

Lungo i tratti di valle considerati, rispettando i criteri riportati nei capitoli precedenti, sono state individuate le aree omogenee e sono stati condotti i rilievi strutturali e le analisi cinematiche. Relativamente alla valle Susa le analisi sono state effettuate soltanto su 4 siti ubicati nel settore dell'alta valle, scelti sulla base della convenzione con il Consorzio Forestale Alta Valle di Susa a proposito delle implicazioni del bosco nello studio sulla caduta massi. Questi siti sono posti a notevole distanza tra loro e le loro caratteristiche non sono generalizzabili a tutta la valle ma solo all'immediato intorno delle pareti stesse.

L'intera mole dei risultati ottenuti è stata inclusa nel DVD allegato al presente testo sottoforma di database, shapefile, tabelle e immagini (capitolo 1.6).

I paragrafi successivi contengono un commento dei risultati ottenuti dallo studio di 6 delle 8 valli; sono state escluse da questa trattazione la valle Grande di Lanzo e la valle Divedro in quanto la prima presenta solo 4 siti idonei alla metodologia, poco rap-

Tabella 2.7.1 Riepilogo delle valli interessate dai rilievi PROVIALP

Valle	Tratto analizzato
Valle Divedro (VCO)	da Crevoladossola al confine di stato con la Svizzera
Valle Orco (TO)	da Pont Canavese a Ceresole Reale
Valle Grande di Lanzo (TO)	da Ceres a Forno Alpi Graie
Valle di Ala di Lanzo (TO)	da Germagnano a Pian della Mussa
Valle di Viù di Lanzo (TO)	da Germagnano a Malciaussia
Valle Susa (TO)	Oulx/Bardonecchia/Cesana
Valle Germanasca (TO)	da Pomaretto a Prali
Valle Tanaro (CN)	da Ponte di Nava a Upega

2.7.1 VALLE ORCO

Inquadramento geografico e geologico

Claudia Borgarello - Arpa Piemonte

La valle Orco fa parte delle Alpi Graie ed occupa la porzione più occidentale del Canavese (Piemonte occidentale). La valle si sviluppa con andamento est-ovest e confina a nord con la Valle d'Aosta, con la quale condivide il territorio del Parco Nazionale del Gran Paradiso, a sud con la valle Stura di Lanzo, ad est con la pianura canavesana e con l'imponente anfiteatro morenico di Ivrea e ad ovest con la regione francese della Savoia e con il Parco Nazionale della Vanoise (figura 2.7.2).



Figura 2.7.2 Rappresentazione geografica dell'area in esame (figura non in scala)

La valle deve la propria denominazione al torrente che vi scorre per circa 47 km, dalla Punta Basei a Pont Canavese, ove accoglie le acque del torrente Soana. Durante il suo percorso, il torrente Orco riceve il tributo di numerosi affluenti: molto brevi quelli del versante orografico destro, più lunghi quelli del sinistro, che scendono dai valloni laterali del Roc, di Noaschetta, di Ciamosseretto e di Ribordone, tutti inclusi nel Parco Nazionale del Gran Paradiso.

Il bacino idrografico del torrente Orco, chiuso alla confluenza con il fiume Po, presso Chivasso, presenta un'estensione di circa 890 km² e un perimetro di circa 210 km.

Il versante orografico destro, esposto a nord, è ricco di boschi lussureggianti e culmina nelle vette delle Tre Levanne, di cui la Centrale raggiunge la quota di 3 619 m. Il versante orografico sinistro, esposto a sud e sede di più centri abitati, ha subito una maggior opera di disboscamento ed abbonda di alpeggi. Presenta anche cime più elevate: fra tutte spicca quella del Roc che, con i suoi 4 026 m, è la più alta vetta dell'intero Canavese.

Per quanto concerne le caratteristiche geologiche, la valle è inserita in un'area dominata dalle Unità Pennidiche Superiori del massiccio del Gran Paradiso, costituite da un basamento cristallino composito in cui litologicamente affiorano prevalenti gneiss occhidini (Compagnoni et al., 1974). La quasi totalità della valle Orco, sia il versante destro sia quello sinistro, dalla testata fino a Locana, è incisa all'interno di queste litologie. Il margine orientale del massiccio è delimitato da litologie afferenti alla Zona Piemontese, costituite da Calcescisti con Pietre Verdi, che affiorano nel settore compreso tra Locana e Pont Canavese; all'esterno

si trovano le unità del basamento policciclico della Zona Sesia-Lanzo (Venturini, 1995), rappresentate da micascisti e paragneiss (**figura 2.7.3**).

La morfologia della valle è caratterizzata dal modellamento glaciale, evidente in modo particolare nella zona dei laghi Serrù ed Agnel. Il ghiacciaio che occupò la valle nell'epoca glaciale raggiunse una lunghezza di 40 km, spingendo il proprio fronte fino a 6-7 km oltre Pont Canavese. All'interno della valle, la massa glaciale presentava uno spessore assiale di 600 m, con ampiezza di oltre 2 km nella zona di Locana, dove si possono ancora osservare rocce levigate ed arrotondate proprie di gran parte della valle. Il profilo longitudinale del torrente Orco mette in evidenza, almeno nella parte medio-alta (valloni del Roc, di Noaschetta e di Piantonetto), la presenza di gradini e piani glaciali.



Figura 2.7.3 Geologia della valle Orco (estratto dalla Carta Geologica d'Italia a scala 1:100 000).

Legenda

Gn (rosso): ortogneiss localmente granitoidi del Gran Paradiso; gs (arancione): gneiss minuti e micascisti eclogitici; gs1 (rigato): gneiss tabulari e gneiss minuti con micascisti; λ (verde chiaro): serpentini e serpentinoscisti con lenti di talcoscisti e cloritoscisti; σ (verde scuro): prasiniti e anfiboliti semplici e granatifere)

L'attività lungo i versanti è resa particolarmente evidente dalla presenza di orli di scarpate attivi e corpi di accumulo. Di questi ultimi, l'esempio di maggiori dimensioni è localizzato presso Rosone, dove un movimento interessa il versante sinistro della valle in corrispondenza dell'omonimo abitato e può essere classificato come settore in Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (AA.VV., 1996). Frane di dimensioni meno rilevanti si trovano in corrispondenza di Vigna di Locana e Piandellera di Noasca (Leporati et al., 2002).

La morfologia del fondovalle principale è invece legata ad una dinamica fluviale e torrentizia che si è appunto imposta su un paesaggio già modellato dall'azione dei ghiacciai. Il corso d'acqua principale, nella parte montana, secondo una concezione classica della geomorfologia, può essere considerato in uno stadio di sviluppo giovanile, con forti pendenze, accentuati fenomeni erosivi e frequenti aree di alluvionamento e sovralluvionamento. Si possono verificare inoltre, fenomeni di trasporto torrentizio in massa, a volte anche violenti, legati ad aste fluviali secondarie caratterizzate da forti pendenze, grazie ai quali il materiale viene depositato sui numerosi conoidi presenti lungo il fondovalle, con conseguenze a volte gravi per le strutture e le infrastrutture antropiche.

I comuni compresi all'interno della valle sono, partendo dal fondovalle: Pont Canavese, Sparone, Locana, Noasca e Ceresole Reale.

Ricerca storica

Claudia Borgarello - Arpa Piemonte

Le testimonianze storiche e le evidenze morfologiche indicano che nel territorio della valle Orco il problema della pericolosità da caduta massi costituisce una situazione d'incombente rischio per le infrastrutture e i numerosi insediamenti presenti. Inoltre, in occasione dell'evento alluvionale dell'ottobre 2000 si sono registrate numerose riattivazioni di fenomeni pregressi, che hanno interessato quasi tutta la valle.

Per la raccolta dei dati storici si è utilizzata principalmente la Banca Dati di Arpa Piemonte che censisce le informazioni sugli effetti morfologici e sui danni, indotti da fenomeni di instabilità naturale nei comuni oggetto di interesse (**tabella 2.7.2**).

Comune	Località	Data	Descrizione
Locana	Località Vigna	Dal 1300 al 1971	Crolli e cadute massi si sono ripetuti dal 1300 al 1971, spesso seguiti da scivolamenti e colate di detrito, interferendo con i coltivi e le abitazioni. Numerosi i rapporti emessi degli enti pubblici preposti
Locana	Zona tra Boschetto e il capoluogo	1920 e settembre 1994	Si verificano periodici distacchi di blocchi e massi dalle pareti del monte Vardlà, fino a raggiungere la SS 460 e le borgate Boschetto e Quarde
Locana	Perebecche, Casetti, Castagne	Dal 1981	Si segnalano distacchi dalle pareti rocciose fino alla quota 1 200 m del versante sinistro, con massi che franano a valle. Nel 1918, dalla regione Pezza, alcuni massi raggiungono le case della frazione Castagne e la SS 460
Locana	Località Bosco	Febbraio 1989 e autunno 1995	Alcuni massi si arrestano a pochi metri da una casa e raggiungono un tratto dismesso della SS 460
Locana	Località Bosco	Marzo 1989	Caduta libera di singoli massi con mobilitazione di altro materiale lungo il percorso. Il dislivello coperto risulta di circa 200-300 m con dimensioni dei blocchi variabili (40 m ³ volume del blocco arrestatosi a pochi metri da un'abitazione)
Locana	Località Bardonetto	1990	Si verifica un crollo di singoli massi dell'ordine di alcuni metri cubi che scendono a valle per un dislivello di circa 350 m su pendenze medie di 45° provocando lo sfondamento di una tettoia di una casa civile posta 20 m a monte della SS 460
Locana	Località Rosone vecchio		In corrispondenza della galleria artificiale paramassi sulla SS 460 i massi raggiungono spesso la piana di fondovalle e sono caratterizzati da volumetrie massime mediamente comprese tra 10 m ³ e 100 m ³ ; la volumetria più fine, con ciottoli e blocchi inferiori al metro, è molto abbondante
Locana - Noasca	Fornetti e Prà	1705-1706, 3 luglio 1997	Un ampio settore di versante a monte della "Frana di Rosone" è interessato da crolli diffusi che hanno origine dalla cresta spartiacque di Perebella. Sono segnalati diversi crolli già negli anni 1705-1706, nella zona di Fei. Il 3 luglio 1997 un crollo in massa di circa 30 000 m ³ coinvolge il versante sinistro presso Prà distruggendo una parte di pineta. I blocchi (fino a 100 m ³) si sono arrestati a 150 m dalle abitazioni. Presso l'area di distacco, un pilastro di circa 4 000 m ³ è ancora in precarie condizioni di stabilità
Locana - Noasca	Località Frera - Località Prà	3 luglio 1997	Il distacco si è verificato circa 1 km a sud-ovest della zona in cui già si era avuto un fenomeno analogo nel giugno 1992 e che aveva provocato l'interruzione della SS 460. I cinematismi possono essere riconducibili a scivolamento planare lungo la foliazione principale, a ribaltamento lungo un giunto di trazione (K2 nei rilievi condotti) o ad una combinazione tra i due. Il crollo si è sviluppato su una superficie di versante di circa 4 ha. Il volume del materiale crollato, che ha rimobilizzato il detrito già presente sul versante, è stimabile nell'ordine di 20-30 000 m ³ . I massimi volumi unitari osservati raggiungono 100 m ³ mentre i blocchi osservabili in corrispondenza del fronte raggiungono 0.3 m ³ . Il fronte massimo di arrivo si colloca in corrispondenza di un angolo d'attrito equivalente di circa 33°-35° rispetto alla nicchia di distacco. È stato individuato, poche decine di metri più a sud dell'area di distacco, un pilastro di circa 4 000 m ³ in precarie condizioni di stabilità per mancato confinamento laterale verso sud e verso est. La zona di distacco è impostata su gneiss occhiadini compatti del Massiccio del Gran Paradiso. L'ammasso si presenta estremamente allentato, con vistosi fenomeni di disgiunzione (anche 1 m) lungo ben definiti sistemi di frattura. La foliazione principale immerge verso valle (sud) di circa 55°; altri due sistemi di frattura subverticali determinano la formazione di solidi prismatici: K2 con direzione all'incirca est-ovest e K3 con direzione NNE-SSW. Il punto di distacco è ubicato a quota 1 125 m, circa 1 km a sud-ovest dalla zona di distacco del giugno 1992. Al piede della parete rocciosa si sviluppa un cono di detrito che testimonia crolli anche recenti. I blocchi principali, presso il margine inferiore della zona invasa, hanno costituito una serie di barriere naturali. È stata distrutta in parte una pineta. Il limite inferiore della zona di espansione dei blocchi si colloca ad una distanza di circa 150 m dalle abitazioni di Prà ed anche la probabilità che il crollo del pilastro le raggiunga appare bassa; i blocchi dovrebbero infatti percorrere 100 m oltre il limite del crollo recente, superare una leggera contropendenza ed un tratto quasi pianeggiante
Noasca	Località Pianderella	Febbraio 1959	Una frana formata da grossi massi si è staccata dalle pendici del versante in prossimità della località Brec; uno dei massi, di considerevole volume, ha sfiorato le case per arrestarsi nel letto del torrente Orco; nel maggio 1984 una nuova frana ha interessato l'abitato e la SS 460. Ripetuti sopralluoghi dei tecnici del Settore Prevenzione del Rischio Geologico, Meteorologico e Sismico della Regione Piemonte hanno confermato il permanere di condizioni di grave pericolo e hanno proposto il trasferimento dell'abitato di Pianderella. Il trasferimento è stato approvato in data 23-09-1987
Noasca	Località Fè	1992	Un crollo ha interessato la porzione lapidea (gneiss occhiadini) di una vecchia nicchia di distacco e la maggior parte del materiale franato (80- 90%) si è incanalato in un'incisione posta in prossimità dell'abitato di Fè, in direzione della SS 460. Durante il rotolamento a valle di tale materiale è stato coinvolto parte del detrito sottostante, costituito da grossi blocchi e da una elevata percentuale di materiale fine. I massi hanno lambito l'abitato di Fè ed in alcuni punti hanno attraversato la SS 460, raggiungendo l'alveo dell'Orco. Quota nicchia 1 500 m, quota di arresto e massima invasione blocchi 868 m, volume materiale distaccatosi 50 000/60 000 m ³ (solo 80%-90% di questo è sceso lungo questa incisione), volume detrito coinvolto 20 000/30 000 m ³ , pezzatura blocchi franati da pochi metri cubi ad un centinaio di metri cubi, sistemi di discontinuità da decimetrici a metrici. Interventi realizzati: deviazione SS 460, vallo paramassi in difesa della frazione Fè, messa in posa di una rete paramassi su vecchio tracciato SS 460 (proposta ANAS)
Pont Canavese		Aprile 1889	Frana in una cava provoca due vittime. Crollo di un enorme masso pochi giorni prima minato inutilmente
Pont Canavese	Località Fasane	Settembre 1968	Caduta massi sulla frazione. Alcuni blocchi raggiungono anche il peso di 8-10 t. Gli interventi sono stati: demolizione di alcuni locali di servizio, nonché cantine e pollai e una scala esterna
Pont Canavese	Località Fasane	Aprile (?) 1969	Caduta massi sulla frazione con lievi danni ad alcune case e minaccia ad un albergo chiuso per motivi di sicurezza. Tra le cause il crioclastismo e le infiltrazioni d'acqua
Pont Canavese	Località Deir Bianco	Luglio 1982	Viene segnalata la presenza di un masso pericolante posto in bilico su una rupe a strapiombo sulla SS 460. Volume del masso circa 30 m ³

Tabella 2.7.2 Sintesi dell'analisi storica delle informazioni relative al dissesto lungo i versanti in valle Orco

Rilievi di terreno

Claudia Borgarello - Arpa Piemonte

In valle Orco, il rilievo speditivo delle pareti (intese come aree di distacco) ha evidenziato la presenza di 45 aree omogenee (figura 2.7.4) distinte in base alla tipologia strutturale. Tali aree risultano omogeneamente distribuite lungo la valle ed evidenziano situazioni già note per la loro pericolosità quali la zona di Locana (aree omogenee n° 26-27) e la zona di Rosone – Perebecche (aree omogenee n° 28-29-30-31-32-33), caratterizzata dalla presenza della DGPV di Rosone.

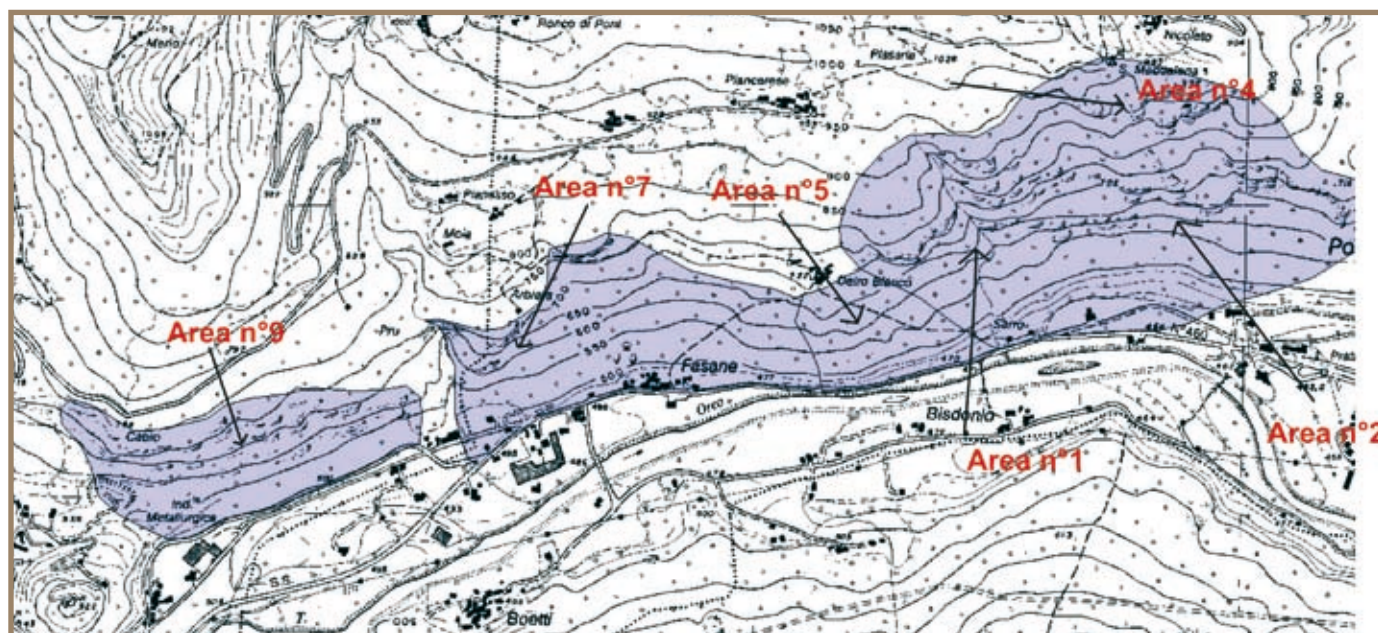


Figura 2.7.4 Esempio di delimitazione delle aree omogenee in valle Orco (figura non in scala)

L'analisi ha riguardato esclusivamente il versante orografico sinistro della valle al cui piede si sviluppa la strada provinciale. Su di esso erano anche localizzati i maggiori fenomeni di dissesto censiti storicamente.

L'assetto strutturale della valle è caratterizzato da pareti molto acclivi e strapiombanti, alte anche 20 m, dovute ad un'unica superficie di fratturazione subverticale, a sua volta frammentata da sistemi minori che danno origine a diedri di varie dimensioni. Ciò testimonia il progressivo rilassamento delle porzioni più esposte dell'ammasso roccioso dovuto al rilascio tensionale a seguito del ritiro del ghiacciaio. Tale situazione è comune lungo quasi tutto il versante analizzato, nel quale non mancano situazioni di affioramenti in genere disgiunti con blocchi completamente isolati dalla massa retrostante.

L'assetto morfologico della valle ha permesso l'applicazione della metodologia così come descritta nei capitoli precedenti. L'ampiezza della valle, infatti, ha fatto sì che tutte le pareti prese in esame fossero ben visibili dal fondovalle e facilmente analizzabili dal punto di vista strutturale.

Le aree hanno dimensioni che variano da circa 0.01 a 0.36 km². Considerata l'estensione dell'area in esame e il rilievo a scala di vallata alpina proprio del progetto, tali valori risultano pienamente in accordo con altri lavori già prodotti sull'argomento. Un'ulteriore frammentazione delle pareti in esame avrebbe comportato un lavoro di maggior dettaglio non adeguato alle esigenze del progetto.

In base alla classificazione delle aree omogenee definita nella metodologia, tutte le aree individuate nella valle Orco appartengono esclusivamente alle aree di tipo 2 e 3. Sebbene in alcuni casi sia stato possibile raggiungere la base di alcune pareti per un controllo diretto dei dati, si è deciso di mantenere la classificazione dell'area come imposto dalla metodologia in quanto più veritiera per la fase di raccolta dati.

In generale, la situazione strutturale delle pareti in esame risulta abbastanza complessa e dà luogo a numerose situazioni di potenziale instabilità visibili anche tramite un rilievo speditivo da fondovalle. Attraverso l'analisi e il plottaggio dei singoli dati di discontinuità rilevati, complessivamente sono state individuate 12

famiglie di discontinuità, successivamente denominate K1÷K12. Relativamente alla distribuzione areale dei vari sistemi ed alla loro importanza si può notare che le prime 8 famiglie sono presenti in quasi tutta l'area e che al loro interno sono presenti i sistemi che originano le principali instabilità dell'area (Locana, Rosone e Noasca). I dati raccolti rafforzano dunque le conoscenze dell'area, confermando la fruibilità del metodo esposto (figura 2.7.5).



Figura 2.7.5 Esempio di alcuni piani di discontinuità rilevati nell'area omogenea n°1

L'analisi dei dati strutturali evidenzia come la spaziatura assuma un andamento abbastanza uniforme con valori da 50 a 150 cm. Tutti i sistemi sono invece caratterizzati da una persistenza dell'ordine di 1-2 m o maggiore che può determinare porzioni di roccia di notevoli dimensioni, con prismi larghi anche una decina di metri. Per quanto riguarda la forma delle superfici di discontinuità, la maggior parte è caratterizzata da un andamento piano o leggermente ondulato. Il riempimento è in generale assente mentre per ciò che riguarda le caratteristiche idrauliche, la maggior parte delle fratture risulta asciutta, eccezion fatta per quelle dove si sono impostate piccole cascate e/o ruscelli attivi nel periodo primavera-estate.

Per quanto riguarda l'analisi delle singole instabilità, sono stati individuati 54 cinematismi di cui 14 planari, 40 cunei. Si sottolinea come molti di questi cinematismi abbiano in realtà dimensioni tali da non far supporre una loro dislocazione complessiva in un unico evento mentre si ritiene più probabile una loro frammentazione in blocchi più piccoli più facilmente mobilizzabili.

Analisi cinematica tramite stereogrammi

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

In questo paragrafo è descritto l'iter seguito per l'individuazione dei potenziali cinematismi (analisi cinematica) all'interno delle aree omogenee di tipo 2 in cui sono stati suddivisi i versanti analizzati in valle Orco.

Al fine di illustrare la procedura seguita ed i risultati ottenuti, viene riportato un esempio corrispondente ad un'area omogenea significativa; si rimanda al materiale contenuto nel DVD allegato al presente lavoro, per consultare i dati relativi all'intera valle.

A partire dai risultati del rilievo speditivo di terreno, per ciascuna area omogenea l'analisi cinematica consiste in:

1. rappresentazione stereografica equatoriale della giacitura media del fronte e delle discontinuità presenti;
2. individuazione e verifica dei potenziali cinematismi osservati in sito, ossia verifica che la giacitura delle discontinuità rispetti le condizioni cinematiche per l'instabilità illustrate al paragrafo 2.4.2 (**figura 2.4.1**);
3. individuazione di eventuali ulteriori cinematismi, possibili dal punto di vista geometrico ma non indicati dal rilievo.

A seguito di tale operazione è emerso che il rilievo a grande scala, condotto prevalentemente ad una certa distanza dal versante, tende a sottostimare il numero di possibili cinematismi, essendo influenzato dalla posizione del punto di osservazione rispetto al fronte, dalla presenza di vegetazione o di neve che possono mascherare parte del versante, dalla luce e dalle condizioni atmosferiche. Inoltre in questo caso il rilevatore è in grado di osservare unicamente i cinematismi caratterizzati da dimensioni metriche (visibili alla scala di osservazione). Considerazioni diverse sono emerse in altre valli, caratterizzate da diversa morfologia (si veda per esempio il caso della valle Tanaro descritto al paragrafo 2.7.6). Per questi motivi le analisi di stabilità sono state condotte per ciascuna area omogenea sia sui cinematismi osservati in sito sia su quelli individuati sullo stereogramma, distinguendo gli uni dagli altri ma assegnando lo stesso peso ai risultati.

L'analisi cinematica condotta sulle 27 aree omogenee di tipo 2 identificate nella valle Orco ha dato come risultato 116 potenziali cinematismi, di cui 19 scivolamenti planari e 97 scivolamenti a cuneo (De Benedittis, 2007). Nessun caso di potenziale ribaltamento è stato rilevato. È necessario sottolineare che, siccome le condizioni necessarie perché avvenga un ribaltamento sono legate essenzialmente alla forma dei blocchi potenzialmente instabili, non viene condotta in questo caso alcuna analisi cinematica e si considerano perciò unicamente i casi osservati nel corso del rilievo, per i quali vengono fornite le dimensioni dei blocchi osservati. Dei 116 cinematismi analizzati, 54 sono stati "segnalati" dal rilievo e 62 sono risultati dall'analisi degli stereogrammi.

A titolo di esempio si riporta in dettaglio il caso dell'area omogenea n° 43, situata in località Noasca. Si tratta di un ammasso roccioso di tipologia tabulare, formato da rocce metamorfiche poco o per nulla fogliate, con grado di fratturazione notevole, grado di alterazione debole, ed elevata resistenza. La **figura 2.7.6** mostra una vista panoramica del versante rilevato.

Figura 2.7.6 Parete corrispondente all'area omogenea n° 43, sita in località Noasca



In questa area omogenea l'angolo di immersione α del fronte può assumere valori compresi tra un minimo di 210° ed un massimo di 230° , con un valore medio di 220° , mentre l'angolo di inclinazione ψ varia tra

50° e 70°, con un valore medio di 60°. Sono state inoltre individuate e misurate in sito 5 famiglie di discontinuità; la **tabella 2.7.3** riporta i valori medi e gli intervalli di variazione delle giaciture misurate.

Tabella 2.7.3

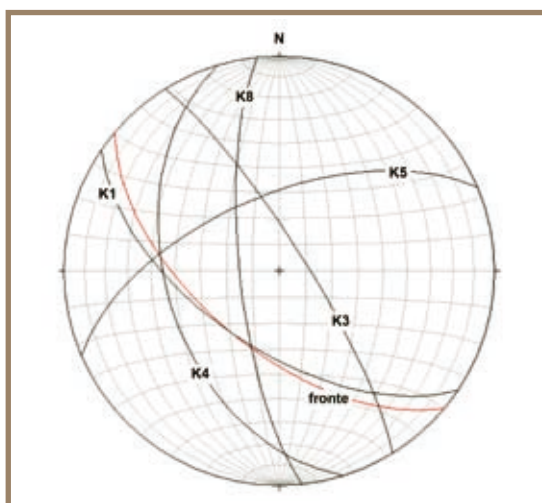
Caratteristiche di giacitura delle famiglie di discontinuità rilevate nell'area omogenea n° 43

Famiglia	Immersione (α)		Inclinazione (ψ)	
	media	variabilità	media	variabilità
K1	214°	$\pm 10^\circ$	60°	$\pm 10^\circ$
K3	58°	$\pm 10^\circ$	80°	$\pm 10^\circ$
K4	253°	$\pm 10^\circ$	46°	$\pm 10^\circ$
K5	337°	$\pm 10^\circ$	61°	$\pm 10^\circ$
K8	264°	$\pm 10^\circ$	75°	$\pm 10^\circ$
fronte	220°	$\pm 10^\circ$	60°	$\pm 10^\circ$

I valori medi delle giaciture dei piani di discontinuità e del fronte sono stati inseriti nello stereogramma riportato in **figura 2.7.7** e con la rappresentazione stereografica è stata condotta l'analisi cinematica.

Figura 2.7.7

Stereogramma relativo all'area omogenea n° 43



I potenziali cinematismi rilevati in sito risultano essere i seguenti:

- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K1 e K5, con direzione media di scivolamento (retta di intersezione) pari a $\alpha = 274^\circ$, $\psi = 40^\circ$;
- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K1 e K4, con direzione media pari a $\alpha = 269^\circ$, $\psi = 45^\circ$;
- scivolamento planare sul piano K1, con direzione di scivolamento pari alla giacitura del piano e possibile giunto di trazione il piano K3.

Dall'osservazione dello stereogramma è inoltre emerso un ulteriore scivolamento a cuneo, formato dall'intersezione tra i piani K4 e K8, con direzione media pari a $\alpha = 178^\circ$, $\psi = 15^\circ$.

Per quanto riguarda le altre aree omogenee individuate lungo la valle Orco, si rimanda alle schede contenute nel DVD allegato.

Analisi di stabilità

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

Al termine della fase di analisi cinematica, mediante l'applicazione dei programmi di calcolo meccanico-probabilistici PlaSMon (Pisani, 2005), Wintam (Major *et al.*, 1974) e Toppling Stones (Allodi e Castelli, 2007), è possibile determinare la probabilità di rottura per ogni cinematismo evidenziato. A tal fine è necessario (come illustrato nel paragrafo 2.4.4 e nei manuali di ciascun programma riportati nel DVD in allegato) compilare un file di *input* per ciascuno, all'interno del quale sono specificati i valori medi delle caratteristiche geometriche e meccaniche del cinematismo stesso e le relative distribuzioni di frequenza.

Non avendo a disposizione alcun dato sulle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso, in particolare i parametri di resistenza delle discontinuità in sito, difficili da determinare nel corso del rilievo speditivo, sulla base dei litotipi presenti e di esperienze precedentemente sviluppate per altri siti simili a quello della valle Orco, si sono considerati su tutte le superfici di discontinuità un angolo d'attrito costante $\phi = 30^\circ$ e una coesione $c = 0$. Nessuna variabilità statistica viene considerata nel progetto per questi parametri. La scelta di assumere coesione nulla è da considerarsi a favore di sicurezza, poiché si trascura il contributo alla stabilità di eventuali ponti di roccia presenti all'interno delle discontinuità.

Andando ad analizzare una zona geografica relativamente ampia e un numero di cinematismi notevole, non si è potuto inoltre fare alcuna considerazione sulla presenza dell'acqua all'interno delle discontinuità; per questo motivo si è scelto di compiere tutte le simulazioni in condizioni drenate, ovvero in assenza di acqua in pressione.

Per quanto riguarda le dimensioni dei blocchi potenzialmente instabili, dove indicato vengono assunti i valori medi forniti dal rilievo di terreno; nel caso in cui il cinematismo non sia stato osservato in sito vengono invece considerate dimensioni unitarie (fittizie). È necessario notare che, a causa delle semplificazioni geometriche e meccaniche introdotte nel progetto (discontinuità piane, assenza di coesione e di forze esterne, ecc.), nel caso di potenziali instabilità per scivolamento, come quelle analizzate nella valle Orco, la geometria dei blocchi non influisce sui fattori di sicurezza ma solo sui volumi calcolati per ciascuna estrazione di Monte Carlo. Per questo motivo i volumi indicati nella **tabella 2.7.4** hanno una validità limitata nel caso in cui il cinematismo non sia stato rilevato.

Gli unici parametri forniti in senso statistico sono quelli relativi alla giacitura dei piani coinvolti in ciascun cinematismo. Ad essi viene associata una distribuzione di frequenza uniforme corrispondente all'intervallo di variazione fornito dal rilievo speditivo. Questo significa che qualsiasi valore compreso tra il minimo ed il massimo valore della distribuzione ha la stessa probabilità di essere estratto nel corso delle simulazioni di Monte Carlo. Questa forte semplificazione è legata al grado di dettaglio con cui vengono forniti i dati dal rilievo di terreno, come specificato al paragrafo 2.4.4.

Tabella 2.7.4 Risultati delle analisi svolte per l'area omogenea n° 43

Cinematismo		F_s (-)			Volume (m ³)		Casi possibili	P_f -possibili (%)	P_f (%)
tipo	discontinuità	min	med	max	min	max			
Cuneo	K1-K5	0.58	1.17	1.99	1.50 *10 ⁻⁵	120.07	659	25.34	16.70
Cuneo	K1-K4	0.40	0.78	2.13	0.30*10 ⁻⁵	120.05	650	78.31	50.90
Cuneo	K4-K8	0.98	6.95	49.05	1.79*10 ⁻⁴	0.23	772	0.13	0.10
Planare	K1	0.21	0.38	0.48	9.10*10 ⁻³	5.70	504	100	50.40

Per ciascun cinematismo sono state effettuate 1 000 estrazioni di Monte Carlo. I risultati delle analisi svolte sono schematizzati nella **tabella 2.7.4**, in termini di fattore di sicurezza (F_s) minimo, medio e massimo, volume minimo e massimo (con le limitazioni specificate sopra per quanto riguarda i cinematismi risultanti unicamente dall'analisi dello stereogramma), numero di casi staticamente e cinematicamente possibili (si veda il paragrafo 2.4.3), probabilità di rottura (P_f) calcolata con riferimento ai soli casi possibili

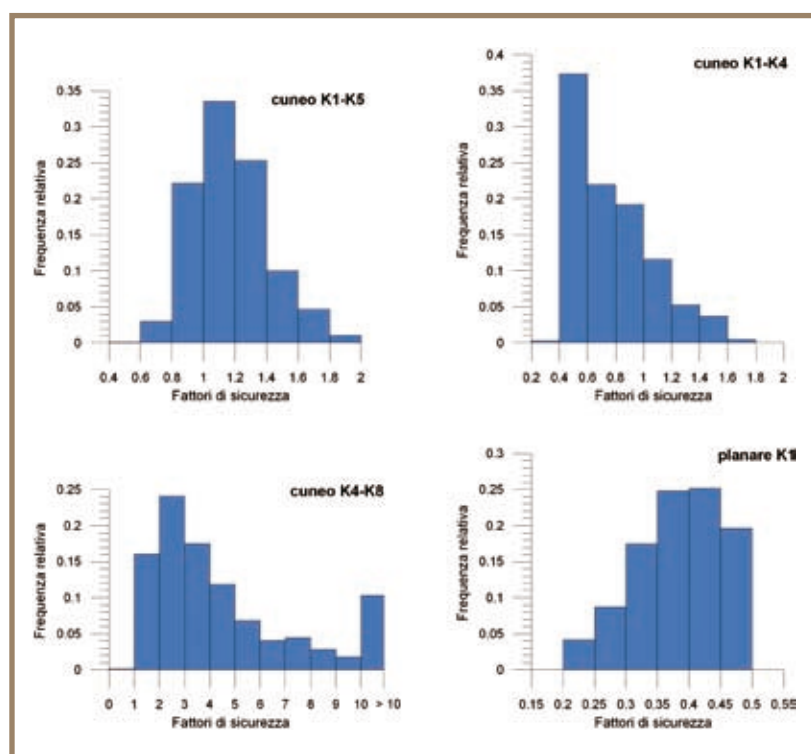
e probabilità di rottura calcolata con riferimento alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo. Si ricorda che nelle successive fasi del progetto PROVIALP si fa riferimento a quest'ultimo valore di P_f al fine di tenere conto nel risultato probabilistico del fatto che alcune combinazioni dei parametri non portino a definire volumi potenzialmente instabili all'interno dell'area omogenea.

In **figura 2.7.8** si riportano infine gli istogrammi rappresentanti la distribuzione relativa dei fattori di sicurezza campionati per ciascun cinematismo analizzato.

Dall'analisi dei risultati emerge che:

- per lo scivolamento planare su K1, tutti i 504 casi possibili campionati sono risultati instabili ($F_s < 1$), con valore medio di $F_s = 0.38$. P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili risulta perciò pari al 100%, mentre essa si riduce al 50.40% se rapportata alla totalità delle estrazioni di Monte Carlo effettuate;

Figura 2.7.8 Istogrammi di frequenza relativa dei fattori di sicurezza calcolati nell'area omogenea n° 43



- per lo scivolamento a cuneo K1-K5, dei 659 casi possibili campionati 167 sono risultati instabili, pari al 25.34%, che corrisponde a P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili. Rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo si ottiene invece P_f ridotta al 16.70%. Il valore medio di F_S è risultato 1.17;
- per lo scivolamento a cuneo K1-K4, dei 650 casi possibili campionati, 509 sono risultati instabili, pari al 78.31%, che corrisponde a P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili. Rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo si ottiene invece P_f ridotta al 50.90%. Il valore medio di F_S è risultato 0.78;
- per lo scivolamento a cuneo K4-K8, a causa della bassa inclinazione della retta d'intersezione, dei 772 casi possibili campionati, solo 1 è risultato instabile, pari a 0.13%, che corrisponde a P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili. Rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo si ottiene P_f ridotta al 0.10%. In questo caso i fattori di sicurezza calcolati sono risultati piuttosto alti, ed in alcuni casi il cinematismo è stato considerato staticamente impossibile ($F_S > 50$). Il valore medio di F_S calcolato è pari a 6.95.

In sintesi per i cinematismi presenti all'interno dell'area omogenea n° 43 è stato calcolato:

- F_S minimo pari a 0.21, corrispondente allo scivolamento planare su K1;
- F_S massimo pari a 49.05, corrispondente al cuneo formato dai piani K4 e K8 (si ricorda che il codice WINTAM considera casi staticamente impossibili quelli con $F_S > 50$);
- P_f minima pari a 0.10%, corrispondente al cuneo formato dai piani K4 e K8;
- P_f massima pari a 50.90%, corrispondente al cuneo formato dai piani K1 e K4.

Si rimanda al file contenuto nel DVD allegato per la consultazione della tabella generale recante i risultati delle analisi estese a tutti i cinematismi rilevati nell'intera valle Orco.

Analisi di run out

Luca Mallen - Arpa Piemonte

Ultimate le analisi di stabilità e stimata una probabilità di rottura per ogni cinematismo identificato, si è proceduto alle analisi di *run out*.

Mediante l'utilizzo del software ROTOMAP GIS® è stata simulata una serie di crolli aventi origine dalle aree omogenee individuate durante i rilievi speditivi di terreno.

L'applicativo prevede l'inserimento di una serie di parametri di *input* relativi principalmente al modello digitale di terreno utilizzato, ai coefficienti di restituzione normale, tangenziale e al coefficiente di attrito, nonché agli angoli limite di urto, rimbalzo e decollo, al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari.

Il DTM utilizzato è a maglia 10 m e rappresenta un buon compromesso tra l'esigenza di avere un modello digitale che descriva nel modo più accurato possibile la morfologia dei versanti e la capacità di calcolo delle macchine che devono elaborare i dati, trattandosi di un'analisi arealmente molto estesa.

I coefficienti di restituzione utilizzati sono stati inizialmente ricavati dalla letteratura e successivamente adattati ai dati a nostra disposizione mediante operazioni di *back analysis* e sulla base di esperienze fatte in passato con studi simili in zone alpine.

Per quanto riguarda gli angoli limite di decollo, urto e rimbalzo si è optato per utilizzare una terna di angoli compresa nel range proposto dalla letteratura, ovvero tra 9° e 12° (valori peraltro già impostati come *default* negli esempi contenuti all'interno della guida dell'applicativo).

Per la scelta dei parametri relativi al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari infine, si è optato per la simulazione del distacco di un masso per ogni cella appartenente ad una determinata area omogenea, senza deviazioni angolari, dal momento che le aree omogenee di partenza sono spesso arealmente piuttosto estese, e quindi in grado di garantire la variabilità necessaria per una corretta stima dei valori energetici.

Ultimate le elaborazioni, l'applicativo restituisce una serie di grid relativi all'energia cinetica (media e massima), ai punti di arresto dei massi, alle altezze di volo e all'indice di suscettività.

Dalle elaborazioni svolte, in primo luogo si evidenzia come la SS 460, che corre lungo il fondovalle, sia fortemente interessata da potenziali fenomeni di crollo. L'analisi dei punti di arresto infatti, mostra come da tutte le aree omogenee di distacco (caratterizzate da indice di distacco $I_D > 0$) si potrebbero staccare dei blocchi in grado di raggiungere ed attraversare la sede stradale.

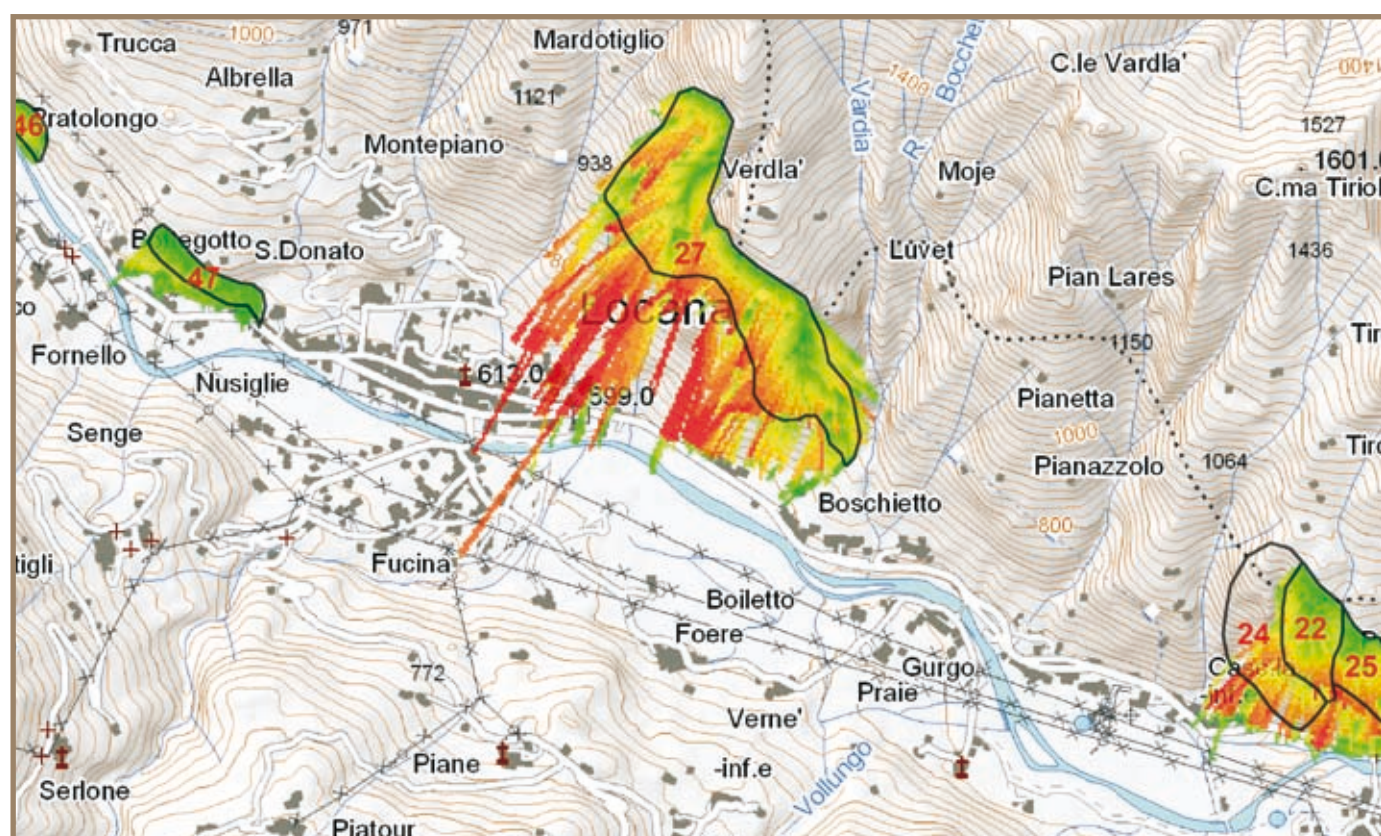
A questo proposito è necessario notare che le zone del fondovalle prive di copertura dell'indice di suscettività possono avere significati diversi ed opposti. Esse possono indicare per esempio zone sottostanti aree omogenee che non hanno dato evidenza di potenziali instabilità ($I_D = 0$), oppure zone sottostanti aree di tipo 3, riconosciute come potenzialmente instabili ma per le quali non è stato possibile condurre alcun rilievo di terreno, o ancora zone del versante su cui non è stato possibile avere alcuna informazione (per esempio perché coperte da vegetazione o troppo lontane dal punto di osservazione).

Al fine di evitare errori di interpretazione nella lettura delle carte prodotte, sono state perciò indicate sempre le aree omogenee di potenziale distacco, specificando la loro tipologia. Se esse non sono presenti o se si tratta di aree di tipo 3, nessuna considerazione può essere fatta sulla suscettività del fondovalle e della strada.

Per quanto riguarda la distribuzione dell'energia cinetica massima, i valori più alti si riscontrano in prossimità dell'abitato di Locana ($> 4\,500\text{ J/kg}$), e provengono dall'area 27.

Valori piuttosto elevati ($> 2\,000\text{ J/kg}$) provengono inoltre dalle aree 2, 24, 25 e 44, rispettivamente in prossimità degli abitati di Pont, Praie e Noasca (figura 2.7.9).

Figura 2.7.9 Distribuzione dell'energia cinetica massima relativa all'area omogenea 27. In rosso i valori energetici più elevati



Per ciò che concerne infine l'indice di suscettività (I_S), il parametro maggiormente significativo in quanto tiene conto del numero di cinematismi possibili in ogni area di distacco, della loro probabilità di rottura e delle volumetrie dei massi coinvolti, è possibile notare come questo assuma valori decisamente più elevati lungo il tratto rilevato ubicato più a monte, facendo registrare i valori maggiori in corrispondenza dei settori di versante sottostanti le aree omogenee 35, 39, 40, 43 e 44 e in misura leggermente minore presso l'abitato di Locana (area 27), mentre nella parte bassa della valle assume

valori tendenzialmente più modesti (**figura 2.7.10**).

Nella valle Orco, le distribuzioni dell'energia massima e della suscettività sembrano evidenziare una correlazione abbastanza netta, in quanto ad alti valori della prima corrispondono sempre valori elevati della seconda.

Unica eccezione l'area omogenea 12, che presenta alti valori di energia associati ad una bassa suscettività. Ciò è spiegabile considerando che i cinematismi evidenziati durante i rilievi speditivi di terreno in quest'area, risultano associati ad una bassa probabilità di rottura e ad una modesta volumetria dei blocchi coinvolti.

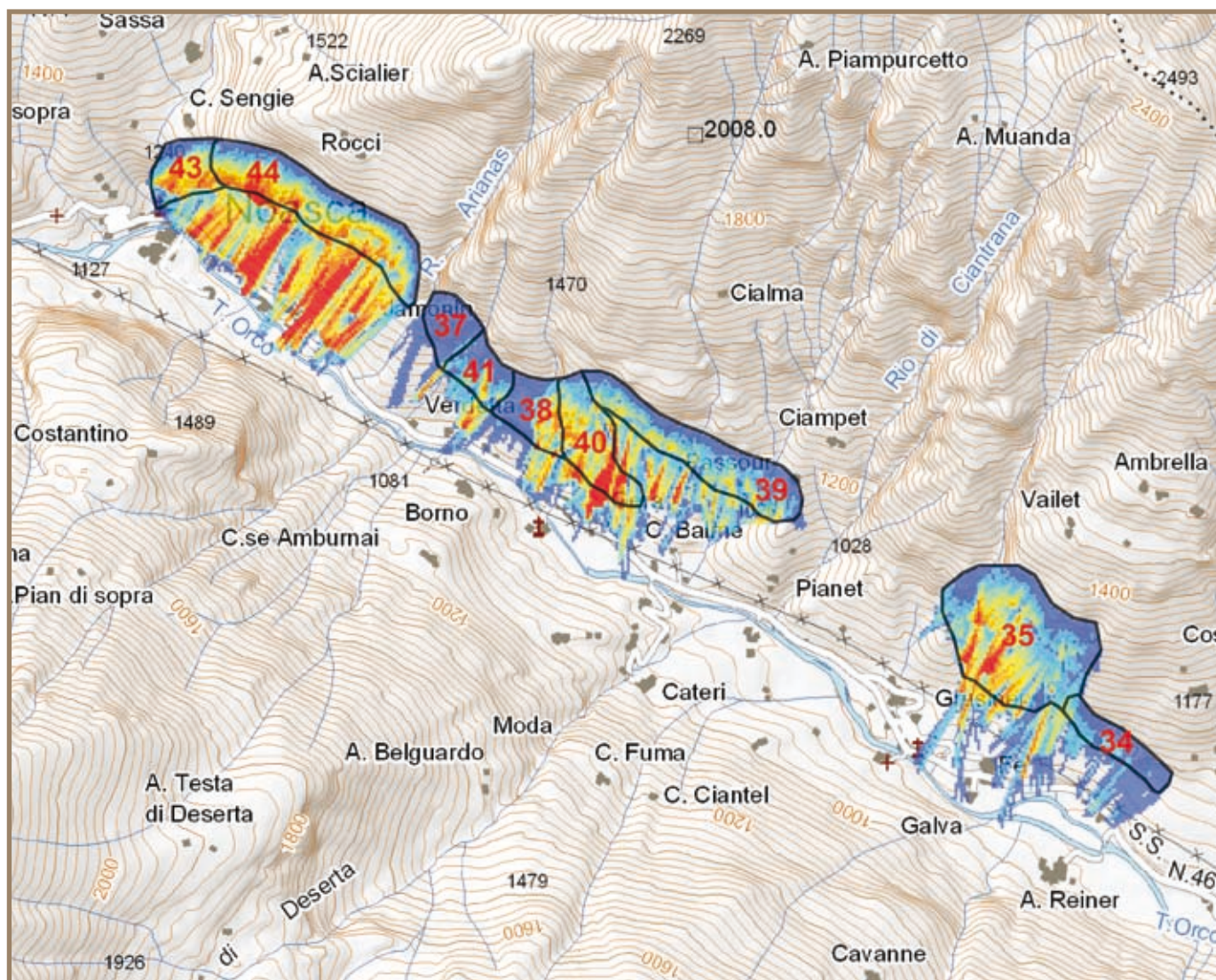


Figura 2.7.10 Distribuzione dell'indice di suscettività relativo alle aree omogenee ubicate in prossimità dell'abitato di Noasca. In rosso i valori più elevati

2.7.2 VALLE D'ALA DI LANZO

Inquadramento geografico e geologico

Claudia Borgarello - Arpa Piemonte

La valle d'Ala rappresenta la valle centrale delle tre valli di Lanzo. La valle si origina dalla dorsale alpina tra l'Uja di Ciamarella (3 676 m), la Bessanese (3 632 m) e il colle d'Arnaud (3 014 m). Il circo glaciale originario ha una superficie di circa 12 km² e le sue acque si raccolgono sul Pian della Mussa da cui prende origine il corso fluviale vero e proprio. Da questo pianoro a 1 800 m di altitudine, il torrente scende attraverso una forra fino a Balme (1 450 m) dove la valle si dispone in direzione est per circa 7.3 km, ricevendo molti valloni laterali da entrambe le sponde.

In corrispondenza di Balme la valle piega in direzione nord e scende fino ad Ala di Stura (1 081 m) per un tratto di 7 km ricevendo altri ripidi canali. Sotto l'abitato di Ala la valle si restringe e prosegue incanalata e sinuosa per 8.5 km fino al suo sbocco. La pendenza media del torrente dall'Alpe Venoni (1 815 m) alla confluenza con la valle Grande risulta essere 5.2% (figura 2.7.11).



Figura 2.7.11

Rappresentazione geografica delle valli di Lanzo. Al centro la valle d'Ala (figura non in scala)

L'assetto strutturale generale da nord-ovest verso sud-est è definito dall'affioramento dei litotipi appartenenti al Massiccio Cristallino Pennidico del Gran Paradiso a cui si sovrappone l'Unità dei Calcescisti con Pietre Verdi.

Quest'ultima interessa prevalentemente la valle d'Ala e la valle di Viù mentre gli gneiss del Gran Paradiso sono limitati alla parte medio-alta della valle Grande. In posizione sommitale, verso nord-est, nella parte interna medio-bassa del bacino affiorano infine i termini austro-alpini della Zona Sesia-Lanzo. Il settore più orientale, in prossimità della zona di imbocco delle valli, è caratterizzato dagli estesi affioramenti del Massiccio Ultrabascico di Lanzo, associato alle Pietre Verdi Piemontesi.



Figura 2.7.12 Geologia della valle d'Ala (estratto dalla Carta Geologica d'Italia a scala 1:100 000)

Legenda

σ (verde chiaro): serpentini e serpentinoscisti; gs (rosso): gneiss minuti e micascisti vari; cs (marrone): calcescisti e filladi; p (verde scuro): prasiniti e anfiboliti semplici e granatiere)

Dal punto di vista strutturale, l'area del bacino delle valli di Lanzo presenta una notevole varietà di situazioni tra cui si individua una blanda configurazione a duomo delle rocce del Gran Paradiso, cui si contrappone la complessità strutturale dei settori vallivi impostati prevalentemente in corrispondenza dei litotipi della Zona Piemontese, valle d'Ala e valle di Viù, o come nel caso della complessa fascia di contatto tettonico tra i Calcescisti con Pietre Verdi e gli gneiss della Zona Sesia - Lanzo, area di Cantoira. L'andamento delle principali faglie è da circa E-W a N60°E - S60°W oppure da N-S a N20°E - S20°W.

Ricerca storica

Claudia Borgarello - Arpa Piemonte

Nella raccolta dei dati si è fatto grande utilizzo della Banca Dati di Arpa Piemonte che censisce le informazioni sugli effetti morfologici e sui danni indotti da fenomeni di instabilità naturale nei comuni oggetto di interesse.

Comune	Località	Data	Descrizione
Ala di Stura	Frazione Malone	1962	La frazione Malone è periodicamente interessata da frane
Ala di Stura	Miniera delle Curbassere		Crollo di limitate porzioni di materiale lapideo che portò al danneggiamento della miniera
Balme	Pian della Mussa	Agosto 1931	Una frana, scesa dal canalone del Beccas d'Arnas provoca due vittime
Balme	Chialambertetto	7-8 Novembre 1962	Una frana interrompe la strada provinciale nei pressi di Chialambertetto
Balme	Frazione Moletta	7-8 Novembre 1962	Una frana di crollo, con fronte di circa 300-400 m, danneggia la strada provinciale e isola la frazione di Balme
Balme	Strada provinciale per Pian della Mussa	1990	Richiesta di sopralluogo inerente il distacco di porzioni rocciose dalle pareti sovrastanti il 1° e il 2° tornante della strada provinciale per Pian della Mussa (Torrioni del Ru). Crollo incanalato di materiale (alcuni grossi blocchi anche superiori ad alcune centinaia di m ³) attraverso un ripido impluvio da una zona di alimentazione a quota 1 700-1 900 m ed arresto degli stessi a quota 1 520 m. Due blocchi, di circa 20 m ³ , hanno raggiunto la strada provinciale lesionandola
Balme	Malzè		Paleofrana di Malzè al cui contorno si segnalano crolli ed indizi di dissesto
Balme	Balme e Chialambertetto		DGPV fra Balme e Chialambertetto in cui un enorme cuneo in roccia è parzialmente separato dal resto del versante da trench che alimentano crolli continui (i blocchi più distali hanno raggiunto il fondovalle). Nel corso degli anni sono numerose le segnalazioni di crolli, anche cospicui, che coinvolgono questa parte di versante
Balme	Frazione Chialambertetto		Distruzione della fraz. di Chialambertetto ad opera di una frana staccatasi dai versanti dell'Uja di Mondrone. La borgata è stata ricostruita circa 200 m più a valle (frazione attuale)
Balme			Una frana seppellisce un'abitazione causando la morte degli abitanti (coniugi Castagneri), danneggia l'Albergo Reale ed alcune case adiacenti
Balme	Pian della Mussa		DGPV del versante sinistro di Pian della Mussa, caratterizzata da sdoppiamenti di cresta e trench che interessano quasi tutto il versante
Ceres	Località Chiamperotto – Brachiello	1971	Si verifica un distacco di una decina di massi che vanno ad ostruire la carreggiata
Ceres	Voragno	1980	A monte di Voragno presenza di almeno 5 massi con volume medio di 2 m ³ pericolanti sul versante. Interventi proposti: ancoraggio dei massi
Ceres	Voragno	1988	A monte di Voragno presenza di un masso pericolante di 250 m ³ disarticolato (diaciasi di 30 cm) che minaccia alcuni edifici
Ceres	Strada provinciale	1988	Grossi blocchi che costituiscono il detrito di falda sovrastante la strada provinciale crollano su questa ripetutamente
Ceres	Località Chiamperotto	1991	Crollo di materiale lapideo da uno sperone roccioso di circa 30 m di altezza, alterato e disarticolato con presenza di apparati radicali nelle fratture beanti, spesso riempite da materiale terroso. A sinistra dello sperone vi è un diedro roccioso in totale aggetto, disarticolato dalla parete da una frattura alquanto pronunciata. Gli interventi proposti sono stati: ancoraggi mediante cuciture e bullonature, legatura con catene
Ceres	Località Voragno	1994	Distacco di volumi rocciosi causato dall'azione del gelo e disgelo e forse anche da cause tettoniche. Si verifica un distacco puntuale di blocchi con volume 1-3 m ³ da una parete fratturata con giacitura a franapoggio. Per circa 200 m la parete potrebbe essere interessata da crolli come testimonia la presenza di volumi di maggiori dimensioni risalenti ad eventi più antichi. Gli interventi previsti sono stati: taglio della vegetazione sul versante con indagini di dettaglio per individuare i blocchi instabili e le possibili traiettorie di caduta, quindi disaggio ed eventuale chiodatura o sottomurazione, ecc. per i volumi maggiori

Tabella 2.7.5 Sintesi dell'analisi storica delle informazioni relative al dissesto lungo i versanti in valle d'Ala

Rilievi di terreno

Claudia Borgarello - Arpa Piemonte

In valle d'Ala, il rilievo speditivo delle pareti (intese come aree di distacco) ha evidenziato 15 aree omogenee (figura 2.7.13) distinte in base alla tipologia strutturale. Tali aree risultano omogeneamente distribuite lungo la valle ed evidenziano situazioni già note per la loro pericolosità quali la zona di Bracchiello-Chiampernotto (aree omogenee n° 6-9-10) e la zona di Chialambertetto-Balme (aree omogenee n° 17-19-20-21).

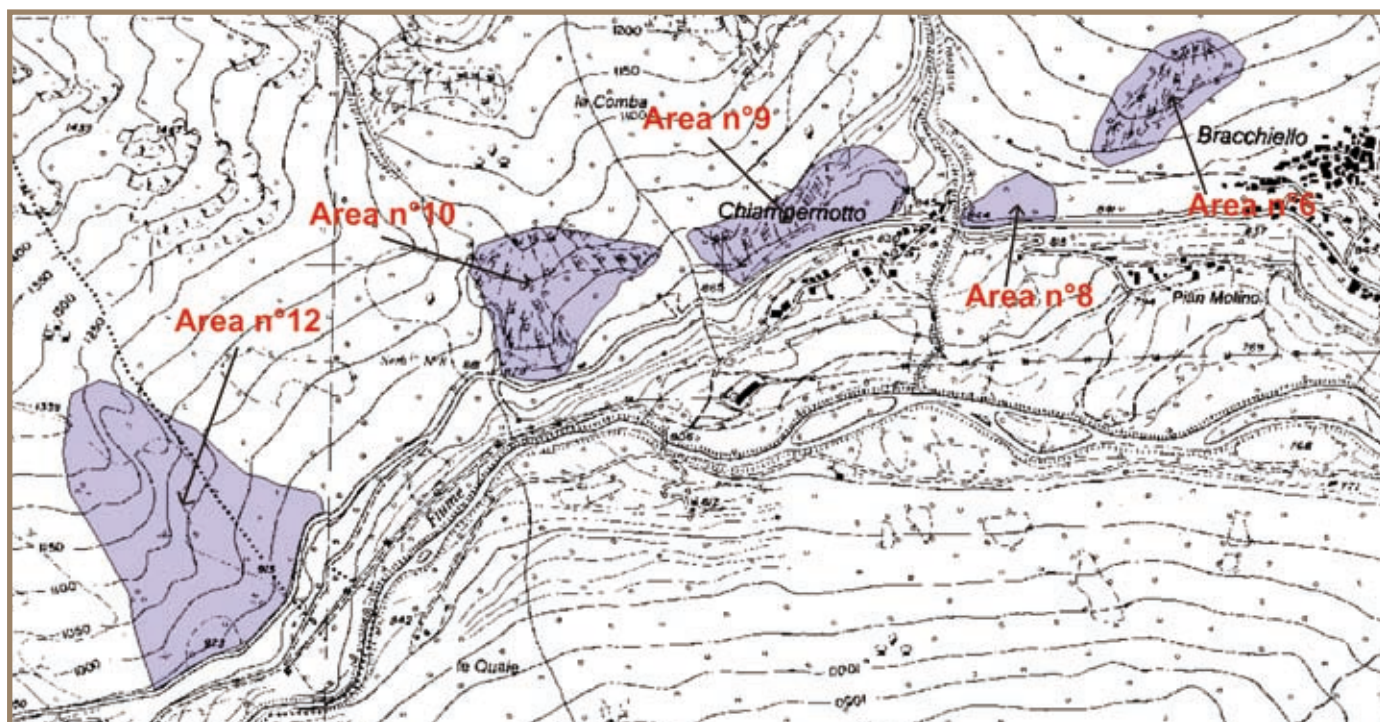


Figura 2.7.13 Esempio di delimitazione delle aree omogenee in valle d'Ala (figura non in scala)

Figura 2.7.14 Esempio di parete aggettante sulla strada (area omogenea n° 20) in cui sono evidenziati alcuni dei piani di discontinuità rilevati

L'analisi ha riguardato esclusivamente il versante orografico sinistro della valle su cui si sviluppa la strada provinciale. Su di esso sono localizzati i maggiori fenomeni di dissesto censiti storicamente.

L'assetto strutturale della valle è caratterizzato da pareti con una acclività molto variabile in funzione della loro morfologia e differenziabili sulla base della loro posizione rispetto alla strada.

Infatti, si possono distinguere due tipologie di versanti: i primi sono rappresentati da pareti di dimensioni ragguardevoli, alte anche 20 m, dovute ad un'unica superficie di fratturazione subverticale, a sua volta frammentata da sistemi minori che danno origine a diedri di varie dimensioni. In generale, queste pareti sono sempre abbastanza lontane dalla strada che, per buona parte della valle, soprattutto nella zona centrale, si sviluppa a mezza costa rispetto al versante esaminato (es. aree omogenee n° 4-6-19-22). Il raccordo tra queste pareti e il fondovalle è rappresentato da versanti boscati con alberi ad alto fusto che mitigano il rotolamento dei massi.



La seconda tipologia di pareti è, invece, rappresentata da piccole pareti direttamente a strapiombo sulla strada, derivate da tagli stradali, e che presentano dimensioni modeste ma superfici a volte anche molto articolate (es. aree omogenee n° 2-9-10). Il raccordo con il versante superiore non è immediatamente percepibile, ragion per cui queste pareti rappresentano delle aree singole la cui analisi strutturale si limita alla loro superficie e al loro intorno (figura 2.7.14).

L'assetto morfologico della valle ha permesso l'applicazione della metodologia così come descritta nei capitoli precedenti. Le aree omogenee hanno dimensioni che variano da circa 0.26 a 0.010 km², essendo queste ultime poste immediatamente a monte della strada. Considerata l'estensione dell'areale in esame e il rilievo a scala di vallata alpina proprio del progetto, tali valori risultano pienamente in accordo con altri lavori già prodotti sull'argomento. Un'ulteriore frammentazione delle pareti in esame avrebbe comportato un lavoro di maggior dettaglio non adeguato all'esigenze del progetto.

Considerando la suddivisione delle aree omogenee definita nella metodologia, la maggior parte delle aree individuate nella valle d'Ala appartengono alle aree di tipo 1 e 2. Infatti, data la morfologia della valle, le pareti a strapiombo sulla strada sono state analizzate direttamente tramite un classico rilievo di terreno, sebbene speditivo. Ciò ha permesso l'analisi diretta dei dati che, in alcuni casi, sono stati poi estesi alle pareti sovrastanti non direttamente visibili dalla strada data la scarsa ampiezza della valle.

In generale, la situazione strutturale delle pareti in esame risulta abbastanza complessa, dando luogo a numerose situazioni di potenziale instabilità visibili anche tramite un rilievo speditivo da fondovalle.

Complessivamente sono state individuate 11 famiglie di discontinuità attraverso l'analisi e il plottaggio dei singoli dati di discontinuità rilevati e successivamente denominati K1÷K11. Relativamente alla distribuzione areale dei vari sistemi ed alla loro importanza si può notare che le prime 8 famiglie sono presenti in quasi tutta l'area e che al loro interno sono presenti i sistemi che originano le principali instabilità. I dati raccolti rafforzano dunque le conoscenze dell'area, confermando la fruibilità del metodo esposto.

Le famiglie risultano omogeneamente distribuite all'interno delle aree omogenee considerate, essendo sempre presenti in numero di 4-6 famiglie principali.

L'analisi dei dati strutturali evidenzia come la spaziatura assuma un andamento abbastanza uniforme con valori da 40 a 120 cm per quanto riguarda le pareti di dimensioni maggiori mentre in quelle prospicienti la strada il valore si riduce al di sotto del metro per tutti i sistemi individuati.

La stessa differenza è rilevabile nei valori della persistenza che presenta un ordine di 1-2 m o maggiore nelle pareti più estese, determinando porzioni di roccia anche di notevoli dimensioni, con prismi larghi fino ad una decina di metri. Nelle pareti di minori dimensioni, anche la persistenza risente della superficie a disposizione e si assesta quindi su valori dell'ordine del metro.

Per quanto riguarda la forma delle superfici di discontinuità, la maggior parte è caratterizzata da un andamento piano o leggermente ondulato. Il riempimento è in generale assente mentre per ciò che riguarda le caratteristiche idrauliche, per lo più le fratture risultano asciutte, eccezion fatta per quelle dove si sono impostate piccole cascate e/o ruscelli attivi nel periodo primavera-estate.

L'analisi delle singole instabilità ha individuato 31 cinematismi di cui 7 planari e 24 cunei mentre non sono state evidenziate fenomenologie dovute a cinematismi di ribaltamento. Si sottolinea come molti di questi cinematismi abbiano in realtà dimensioni tali da non far supporre una loro dislocazione complessiva in un unico evento mentre si ritiene più probabile una loro frammentazione in blocchi più piccoli più facilmente mobilizzabili. Anche i cinematismi presentano una distribuzione omogenea essendo sempre in numero di 2-3 all'interno di ogni area.

Analisi cinematica tramite stereogrammi

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

In questo paragrafo è descritto l'iter seguito per l'individuazione dei potenziali cinematismi (analisi cinematica) all'interno delle aree omogenee di tipo 1 o di tipo 2 in cui sono stati suddivisi i versanti analizzati in valle d'Ala di Lanzo. Al fine di illustrare la procedura seguita ed i risultati ottenuti, viene riportato un esempio di applicazione, corrispondente ad un'area omogenea significativa; si rimanda al materiale contenuto nel DVD allegato al presente lavoro, per consultare i dati relativi all'intera valle d'Ala.

A partire dai risultati del rilievo speditivo di terreno, per ciascuna area omogenea l'analisi cinematica consiste in:

- 1 rappresentazione stereografica equatoriale della giacitura media del fronte e delle discontinuità presenti;
- 2 individuazione e verifica dei potenziali cinematismi osservati in sito, cioè verifica che la giacitura delle discontinuità rispetti le condizioni cinematiche per l'instabilità illustrate al paragrafo 2.4.2 (figura 2.4.1);

3 individuazione di eventuali ulteriori cinematismi, possibili dal punto di vista geometrico ma non indicati dal rilievo.

L'analisi cinematica sugli stereogrammi viene condotta non solo per i valori medi di giacitura del fronte e delle discontinuità ma anche tenendo conto della variabilità della giacitura stessa, al fine di non trascurare la possibilità di formazione di un volume potenzialmente instabile per effetto di variazioni dei parametri geometrici. Solo nel caso in cui il rilievo abbia evidenziato un potenziale cinematismo riferito ad una variazione locale del fronte non sono state condotte ulteriori analisi cinematiche.

L'analisi cinematica condotta sulle 15 aree omogenee di tipo 1 o 2 individuate in valle d'Ala ha dato come risultato 116 potenziali cinematismi, di cui 18 scivolamenti planari e 98 scivolamenti a cuneo. Nessun caso di potenziale ribaltamento è stato rilevato (Mantelli, 2007). È necessario sottolineare che, siccome le condizioni necessarie perché avvenga un ribaltamento sono legate essenzialmente alla forma dei blocchi potenzialmente instabili, non viene condotta in questo caso alcuna analisi cinematica e si considerano perciò unicamente i casi osservati nel corso del rilievo, per i quali vengono fornite le dimensioni dei blocchi osservati. Dei 116 cinematismi analizzati, 31 sono stati "segnalati" dal rilievo e 85 sono risultati dall'analisi degli stereogrammi.

A titolo di esempio si riporta in dettaglio il caso dell'area omogenea n° 20, situata in località Balme. Il versante è costituito da un ammasso di rocce metamorfiche poco o nulla fogliate, che si presentano piuttosto fratturate, moderatamente alterate e aventi resistenza elevata. La **figura 2.7.15** mostra una vista panoramica del versante rilevato all'interno dell'area 20.

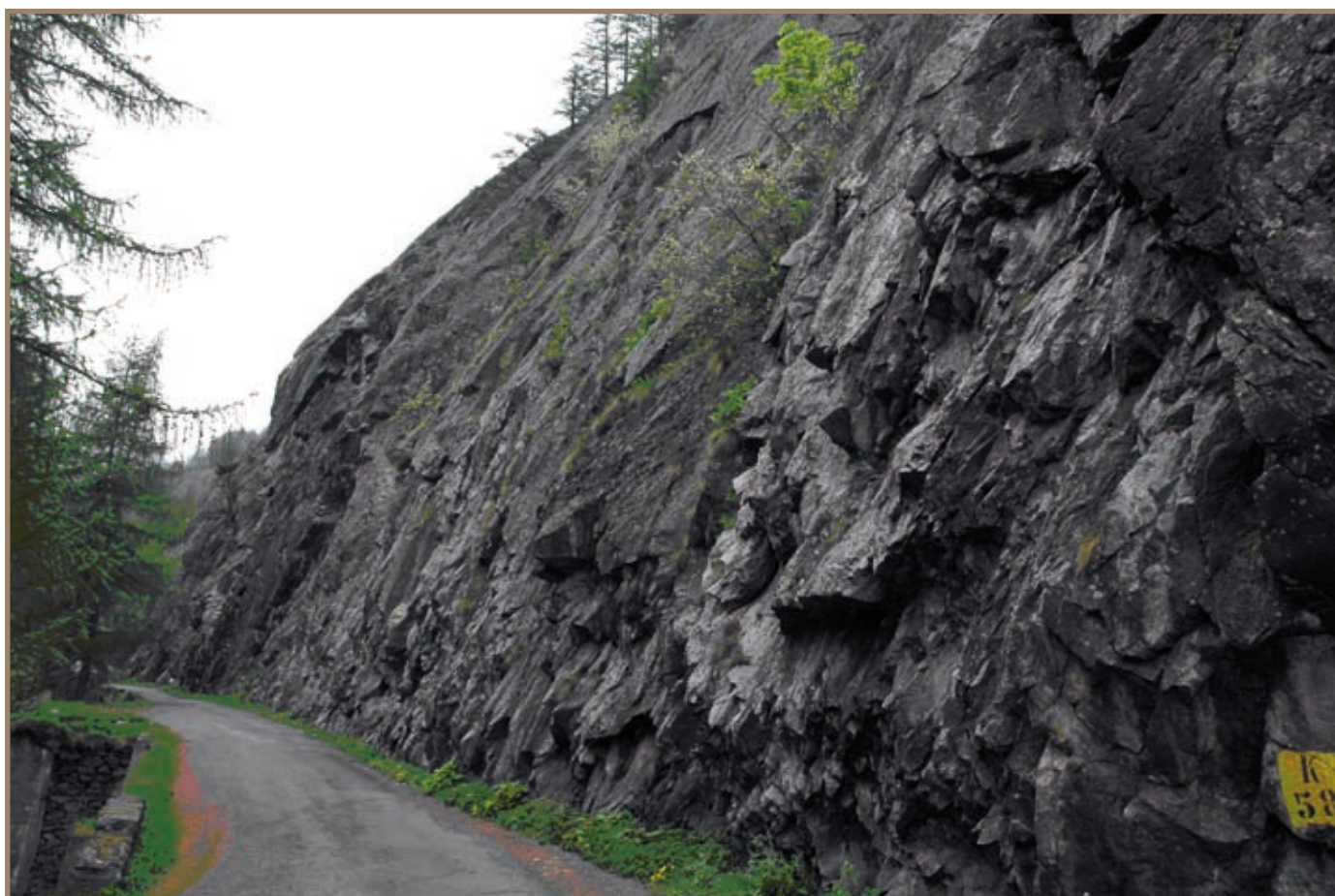


Figura 2.7.15 Parete corrispondente all'area omogenea n° 20, sita in località Balme

In questa area omogenea l'angolo di immersione α del fronte può assumere valori compresi tra un minimo di 160° ed un massimo di 180° , con un valore medio di 170° , mentre l'angolo di inclinazione ψ varia tra 60° e 80° , con un valore medio di 70° . Sono state inoltre individuate e misurate in sito 4 famiglie di discontinuità; la **tabella 2.7.6** riporta i valori medi e gli intervalli di variazione delle giaciture misurate.

Tabella 2.7.6

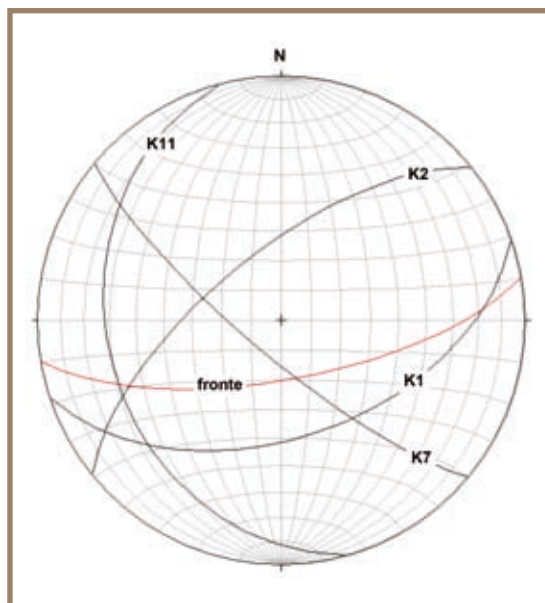
Caratteristiche di giacitura delle famiglie di discontinuità rilevate nell'area omogenea n° 20

Famiglia	Immersione (α)		Inclinazione (ψ)	
	media	variabilità	media	variabilità
K1	161°	$\pm 5^\circ$	50°	$\pm 5^\circ$
K2	321°	$\pm 10^\circ$	67°	$\pm 10^\circ$
K7	220°	$\pm 10^\circ$	78°	$\pm 5^\circ$
K11	255°	$\pm 15^\circ$	29°	$\pm 10^\circ$
fronte	170°	$\pm 10^\circ$	70°	$\pm 10^\circ$

I valori medi delle giaciture dei piani di discontinuità e del fronte sono stati inseriti nello stereogramma riportato in **figura 2.7.16** e con la rappresentazione stereografica è stata condotta l'analisi cinematica.

Figura 2.7.16

Stereogramma relativo all'area omogenea n° 20



I potenziali cinematismi rilevati in sito risultano essere i seguenti:

- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K1 e K7, con direzione media di scivolamento (retta di intersezione) pari a $\alpha = 144^\circ$, $\psi = 49^\circ$;
- scivolamento planare sul piano K1, con direzione pari alla giacitura del piano.

Dall'osservazione dello stereogramma sono inoltre emersi ulteriori potenziali scivolamenti:

- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K1 e K2, con direzione media di scivolamento pari a $\alpha = 238^\circ$, $\psi = 15^\circ$;
- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K2 e K11, con direzione media di scivolamento pari a $\alpha = 244^\circ$, $\psi = 29^\circ$;
- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani

K1 e K11, con direzione media di scivolamento pari a $\alpha = 227^\circ$, $\psi = 26^\circ$.

Per quanto riguarda le altre aree omogenee individuate lungo la valle d'Ala, si rimanda alle schede contenute nel DVD allegato.

Analisi di stabilità

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

Al termine della fase di analisi cinematica, mediante l'applicazione dei programmi di calcolo meccanico-probabilistici PlaSMon (Pisani, 2005), Wintam (Major *et al.*, 1974) e Toppling Stones (Allodi e Castelli, 2007), è possibile determinare la probabilità di rottura per ogni cinematismo evidenziato. A tal fine è necessario (come illustrato nel paragrafo 2.4.4 e nei manuali di ciascun programma riportati nel DVD in allegato) compilare un file di *input* per ciascuno, all'interno del quale sono specificate le caratteristiche geometriche e meccaniche del cinematismo stesso e le relative distribuzioni di frequenza.

Non avendo a disposizione alcun dato sulle caratteristiche degli ammassi rocciosi, in particolare i parametri di resistenza delle discontinuità in sito, difficili da determinare nel corso del rilievo speditivo, sulla base dei litotipi presenti e di esperienze precedentemente sviluppate per altri siti, si è deciso di considerare un angolo d'attrito del materiale roccioso $\varphi = 30^\circ$ ed una coesione $c = 0$. La scelta di adottare coesione nulla è da considerarsi a favore di sicurezza, poiché si trascurano i possibili contributi di eventuali ponti di roccia presenti all'interno delle discontinuità.

Inoltre, andando ad analizzare una zona geografica relativamente ampia e un numero di casi cinematicamente possibili notevole, non si è potuto compiere alcuna considerazione sulla presenza dell'acqua all'interno delle discontinuità; per questo motivo si è scelto di compiere le simulazioni in condizioni drenate, ovvero in assenza di acqua in pressione.

Per quanto riguarda le dimensioni dei blocchi potenzialmente instabili, dove indicato vengono assunti i valori

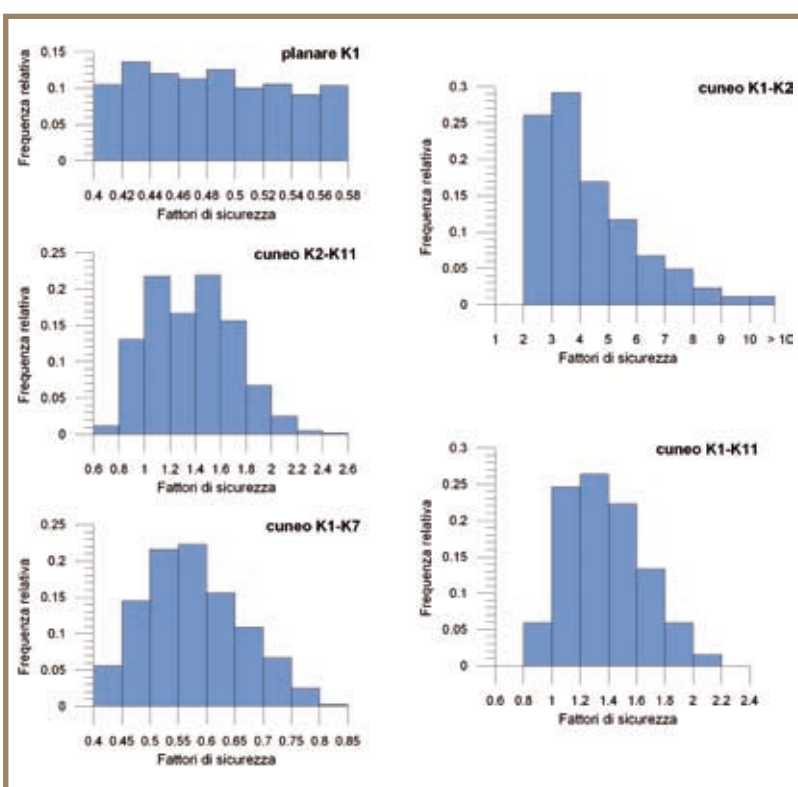
medi forniti dal rilievo di terreno; nel caso in cui il cinematismo non sia stato osservato in sito vengono invece considerate dimensioni unitarie (fittizie). È necessario notare che, a causa delle semplificazioni geometriche e meccaniche introdotte nel progetto (discontinuità piane, assenza di coesione e di forze esterne ecc.), nel caso di potenziali instabilità per scivolamento la geometria dei blocchi non influisce sui fattori di sicurezza ma solo sui volumi calcolati per ciascuna estrazione di Monte Carlo. Per questo motivo i volumi indicati nella **tabella 2.7.7** hanno una validità limitata nel caso in cui il cinematismo non sia stato rilevato.

Gli unici parametri forniti in senso statistico sono quelli relativi alla giacitura dei piani coinvolti in ciascun cinematismo. Ad essi viene associata una distribuzione di frequenza uniforme corrispondente all'intervallo di variazione fornito dal rilievo speditivo. Questo significa che qualsiasi valore compreso tra il minimo ed il massimo valore della distribuzione ha la stessa probabilità di essere estratto nel corso delle simulazioni di Monte Carlo. Questa forte semplificazione è legata al grado di dettaglio con cui vengono forniti i dati dal rilievo di terreno, come specificato al paragrafo 2.4.4.

Per ciascun cinematismo sono state effettuate 1 000 estrazioni di Monte Carlo. I risultati delle analisi svolte sono schematizzati nella **tabella 2.7.7**, in termini di fattore di sicurezza F_s minimo, medio e massimo, volume minimo e massimo (con le limitazioni specificate sopra per quanto riguarda i cinematismi risultanti unicamente dall'analisi dello stereogramma), numero di casi staticamente e cinematicamente possibili

Tabella 2.7.7 Risultati delle analisi svolte per l'area omogenea n° 20

Cinematismo		F_s (-)			Volume (m ³)		Casi possibili	P_f possibili (%)	P_f (%)
tipo	discontinuità	min	med	max	min	max			
Planare	K1	0.40	0.49	0.58	18.92	100.41	956	100	95.60
Cuneo	K1-K7	0.40	0.58	0.83	2.65	20.79*10 ⁴	1000	100	100
Cuneo	K1-K11	0.86	1.37	2.11	8.0*10 ⁻²	15.66*10 ³	999	5.91	5.90
Cuneo	K2-K11	0.75	1.37	2.43	0	16.77	612	14.22	8.70
Cuneo	K1-K2	1.99	4.32	13.00	5.9*10 ⁻²	1174.24	999	0	0



(si veda il paragrafo 2.4.3), probabilità di rottura P_f calcolata con riferimento ai soli casi possibili e probabilità di rottura P_f calcolata con riferimento alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo. Si ricorda che nelle successive fasi del progetto PROVIALP si fa riferimento a quest'ultimo valore di P_f al fine di tenere conto nel risultato probabilistico del fatto che alcune combinazioni dei parametri non portino a definire volumi potenzialmente instabili all'interno dell'area omogenea.

In **figura 2.7.17** si riportano infine gli istogrammi rappresentanti la distribuzione relativa dei fattori di sicurezza campionati per ciascun cinematismo analizzato.

Dall'analisi dei risultati emerge che:

- per lo scivolamento planare su K1, tutti i 956 casi possibili campionati sono risultati instabili ($F_s < 1$), con valore medio di $F_s = 0.49$. P_f calcolata con

Figura 2.7.17 Istogrammi di frequenza relativa dei fattori di sicurezza calcolati nell'area omogenea n° 20

riferimento ai soli cinematismi possibili risulta perciò pari al 100%, mentre essa si riduce al 95.60% se rapportata alla totalità delle estrazioni di Monte Carlo effettuate;

- per lo scivolamento a cuneo K1-K7, tutte le 1 000 estrazioni di Monte Carlo hanno fornito cinematismi possibili con $F_S < 1$. P_f risulta perciò pari a 100% in entrambi i casi. Il valore medio di F_S è risultato 0.58;
- per lo scivolamento a cuneo K1-K11, dei 999 casi possibili campionati, 590 sono risultati instabili, pari al 5.91%, che corrisponde a P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili. Rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo si ottiene P_f pari al 5.90%. Il valore medio di F_S è risultato 1.37;
- per lo scivolamento a cuneo K2-K11, dei 612 casi possibili campionati, 87 sono risultati instabili, pari al 14.22%, che corrisponde a P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili. Rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo si ottiene P_f pari al 8.70%. Il valore medio di F_S è risultato 1.37;
- per lo scivolamento a cuneo K1-K2, a causa della bassa inclinazione della retta d'intersezione, dei 999 casi possibili campionati, nessuno è risultato instabile. In questo caso i fattori di sicurezza calcolati sono risultati piuttosto alti. Il valore medio di F_S calcolato è pari a 4.32. La probabilità di rottura risulta perciò nulla con riferimento sia ai soli cinematismi possibili, sia alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo. Tale cinematismo è stato perciò escluso dalle successive analisi.

In sintesi per i cinematismi presenti all'interno dell'area omogenea n° 20 è stato calcolato (escludendo i cunei con P_f nulla):

- F_S minimo pari a 0.40, calcolato per lo scivolamento a cuneo formato dai piani K1 e K7 e per lo scivolamento planare su K1;
- F_S massimo pari a 2.43, calcolato per il cuneo formato dai piani K2 e K11;
- P_f minima pari a 5.90%, calcolata per il cuneo formato dai piani K1 e K11;
- P_f massima pari al 100%, calcolata per il cuneo formato dai piani K1 e K7.

Si rimanda al file contenuto nel DVD allegato per la consultazione della tabella generale recante i risultati delle analisi estese a tutti i cinematismi rilevati nell'intera valle d'Ala.

Confronto con un dissesto recente

Claudia Borgarello - Arpa Piemonte

Alla fine di maggio 2007, in corrispondenza dell'area omogenea n° 12, si è verificato un crollo di massi di varie dimensioni sulla sottostante SP 1 che ha portato alla chiusura totale della carrozzabile (figura 2.7.18).

Figura 2.7.18 Area omogenea n° 12. La foto riprende l'area interessata dal crollo prima del dissesto (nel tondo rosso)



L'area in esame è caratterizzata dalla presenza di una parete rocciosa alta circa 10 m che digrada lateralmente in una zona in cui, accanto a blocchi di varie dimensioni, si associa la presenza di vegetazione anche di alto fusto le cui radici si sono sviluppate all'interno delle fratture che scompaginano la parete stessa. Il crollo si è verificato in corrispondenza della parte più occidentale dell'area, subito dopo una curva che la strada compie proprio per aggirare la parete. Da una quota di circa 900 m si sono staccati alcuni blocchi che, rotolando verso valle, hanno dato origine ad un'ampia zona di transito, travolgendo alberi e coinvolgendo parte della cotica erbosa presente sul versante. I blocchi si sono quindi fermati in corrispondenza della strada, ostruendola completamente.

Durante il sopralluogo sono risultati chiaramente riconoscibili la nicchia di distacco del materiale e il tragitto seguito dallo stesso fino sulla strada mentre l'accumulo detritico era stato rimosso per poter ripristinare la circolazione.

L'area da cui il crollo si è originato è caratterizzata dalla presenza di almeno tre famiglie distinte di discontinuità che hanno originato, all'interno della parete, dei cunei resi instabili dall'apertura delle fratture e dal loro riempimento. L'elemento scatenante del dissesto è da ricercarsi nelle piogge prolungate che hanno interessato il territorio in esame da 24 a 36 ore prima dell'evento e che hanno minato la stabilità della porzione di versante. Il dilavamento del riempimento delle fratture e la contemporanea presenza delle radici degli alberi ad alto fusto all'interno delle stesse ha favorito la dislocazione dei blocchi, originati dalle discontinuità.

Sono infatti ancora ben visibili le fratture aperte in prossimità della nicchia e la presenza di alberi ad alto fusto nella parte sommitale proprio in corrispondenza delle fratture stesse (figura 2.7.19).

Figura 2.7.19 Crollo avvenuto all'interno dell'area omogenea n° 12 lungo la SP 1 delle valli di Lanzo (maggio 2007). Nella foto sono evidenti le fratture aperte, che hanno favorito il dissesto, e la presenza di alcuni blocchi in equilibrio precario, immediatamente al di sotto della nicchia di distacco



L'analisi dell'area in esame con la metodologia elaborata per il progetto PROVIALP mette in luce alcuni aspetti di seguito descritti:

- sulla base della ricerca storica effettuata, nell'area in esame non si erano mai evidenziati indizi di dissesto; in nessuna banca dati esaminata risultano dissesti censiti;
- sulla base dell'incrocio dei vari tematismi individuati nel progetto PROVIALP, l'area in esame rientra perfettamente all'interno di un settore da analizzare ed è risultata in accordo con tutti i parametri utilizzati;
- sulla base dei rilievi di terreno sono state individuate 5 famiglie di discontinuità e 2 cinematismi a cuneo dello stesso tipo verificatosi durante il dissesto;
- l'ulteriore analisi tramite stereogramma, comprendente la variazione del fronte e dei valori di giacitura delle famiglie, ha permesso l'individuazione di altri 3 cinematismi di cui 2 a cuneo e 1 planare, dimostrando la forte instabilità della parete in esame;
- l'analisi probabilistica ha evidenziato che alcuni tra i cinematismi planari e a cuneo hanno una probabilità di rottura prossima o superiore al 50% (per maggiori dettagli si vedano i risultati delle analisi riportati nel DVD).

Tali considerazioni evidenziano, quindi, la buona applicabilità della metodologia in primo luogo nell'identificazione dei siti su cui è necessario approfondire le conoscenze e successivamente nella valutazione dell'analisi probabilistica che, evidenziando la pericolosità dei cinematismi individuati, fornisce uno strumento di calibratura per le aree a maggiore pericolosità.

Analisi di run out

Luca Mallen - Arpa Piemonte

Ultimate le analisi di stabilità e stimata una probabilità di rottura per ogni cinematismo identificato, si è proceduto alle analisi di *run out*.

Mediante l'utilizzo del software ROTOMAP GIS® è stata simulata una serie di crolli aventi origine dalle aree omogenee individuate durante i rilievi speditivi di terreno.

L'applicativo prevede l'inserimento di una serie di parametri di *input* relativi principalmente al modello digitale di terreno utilizzato, ai coefficienti di restituzione normale, tangenziale e al coefficiente di attrito, nonché agli angoli limite di urto, rimbalzo e decollo, al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari.

Il DTM utilizzato è a maglia 10 m e rappresenta un buon compromesso tra l'esigenza di avere un modello digitale che descriva nel modo più accurato possibile la morfologia dei versanti e la capacità di calcolo delle macchine che devono elaborare i dati, trattandosi di un'analisi arealmente molto estesa.

I coefficienti di restituzione utilizzati sono stati inizialmente ricavati dalla letteratura e successivamente adattati ai dati a nostra disposizione mediante operazioni di *back analysis* e sulla base di esperienze fatte in passato con studi simili in zone alpine.

Per quanto riguarda gli angoli limite di decollo, urto e rimbalzo si è optato per utilizzare una terna di angoli compresa nel range proposto dalla letteratura, ovvero tra 9° e 12° (valori peraltro già impostati come *default* negli esempi contenuti all'interno della guida dell'applicativo).

Per la scelta dei parametri relativi al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari infine, si è optato per la simulazione del distacco di un masso per ogni cella appartenente ad una determinata area omogenea, senza deviazioni angolari, dal momento che le aree omogenee di partenza sono spesso arealmente piuttosto estese, e quindi in grado di garantire la variabilità necessaria per una corretta stima dei valori energetici.

Ultimate le elaborazioni, l'applicativo restituisce una serie di grid relativi all'energia cinetica (media e massima), ai punti di arresto dei massi, alle altezze di volo e all'indice di suscettività.

Dalle elaborazioni svolte, in primo luogo si evidenzia come la SP 1, che corre lungo il fondovalle, sia fortemente interessata da potenziali fenomeni di crollo. L'analisi dei punti di arresto infatti, mostra come da tutte le aree omogenee oggetto di studio (aventi cioè caratteristiche di idoneità per un'analisi di terreno speditiva e probabilità di rottura > 0) si potrebbero staccare dei blocchi in grado di raggiungere ed attraversare la sede stradale.

A questo proposito è necessario notare che le zone del fondovalle prive di copertura dell'indice di suscettività possono avere significati diversi ed opposti. Esse possono indicare per esempio zone sottostanti aree omogenee che non hanno dato evidenza di potenziali instabilità ($I_D = 0$), oppure zone sottostanti aree di tipo 3, riconosciute come potenzialmente instabili ma per le quali non è stato possibile condurre alcun rilievo di terreno, o ancora zone del versante su cui non è stato possibile avere alcuna informazione (per esempio perché coperte da vegetazione o troppo lontane dal punto di osservazione).

Al fine di evitare errori di interpretazione nella lettura delle carte prodotte, sono state perciò indicate sempre le aree omogenee di potenziale distacco, specificando la loro tipologia. Se esse non sono presenti o se si tratta di aree di tipo 3, nessuna considerazione può essere fatta sulla suscettività del fondovalle e della strada.

Per quanto riguarda la distribuzione dell'energia cinetica massima, i valori più alti si riscontrano in prossimità dell'abitato di Balme, presso la frazione Bogone (> 2 900 J/kg), e provengono dall'area

19. Valori piuttosto elevati ($> 1\,700\text{ J/kg}$) provengono inoltre dalle aree 22 e 24, al Pian della Mussa (figura 2.7.20).

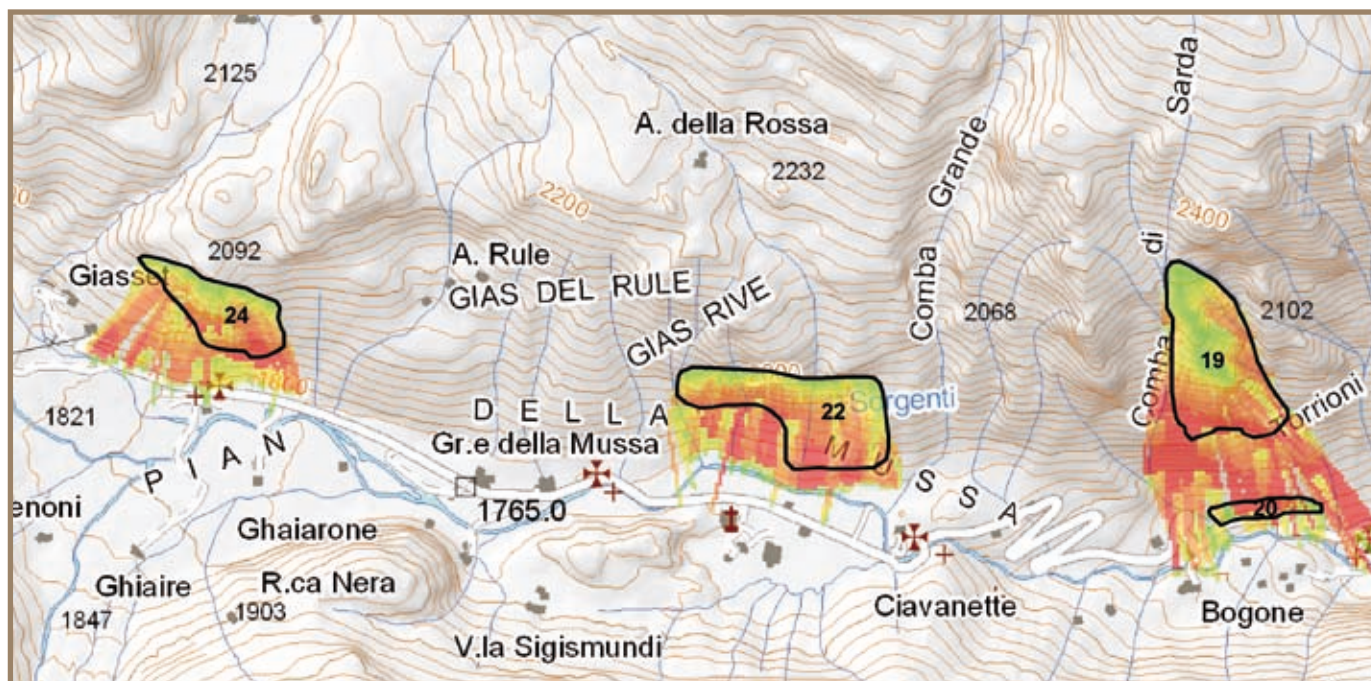


Figura 2.7.20 Distribuzione dell'energia cinetica massima relativa alle aree 19, 22 e 24. In rosso i valori energetici più elevati

Per ciò che concerne infine l'indice di suscettività, il parametro maggiormente significativo in quanto tiene conto sia della probabilità di rottura che delle volumetrie dei massi coinvolti, è possibile notare come questo assuma valori decisamente più elevati lungo il settore di valle rilevato ubicato più a monte, facendo registrare i valori maggiori in corrispondenza dei versanti sottostanti le aree omogenee 19, 22 e 24, mentre nella parte bassa della valle assume valori tendenzialmente più modesti (figura 2.7.21).



Figura 2.7.21 Distribuzione dell'indice di suscettività relativa alle aree 19, 22 e 24. In rosso i valori più elevati

In valle d'Ala, le distribuzioni dell'energia massima e della suscettività sembrano evidenziare una correlazione abbastanza netta, in quanto ad alti valori della prima corrispondono sempre valori elevati della seconda.

2.7.3 VALLE VIÙ DI LANZO

Inquadramento geografico e geologico

Luca Paro - Arpa Piemonte

La valle di Viù è la più meridionale delle valli di Lanzo (TO) a cui appartengono anche la valle Grande e la valle d'Ala. La valle di Viù confina a sud con la bassa valle di Susa, ad ovest con la valle Cenischia e la francese vallée de l'Arc, a Nord con la valle d'Ala e ad est con la valle di Lanzo.

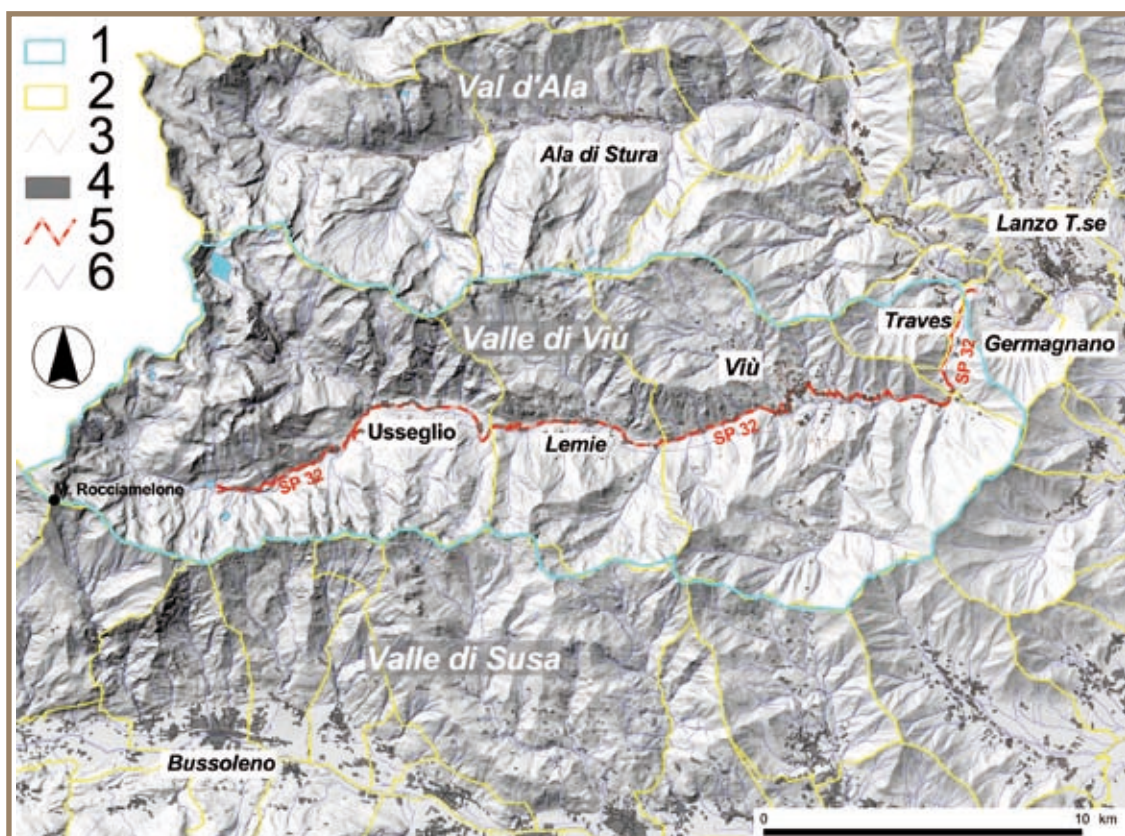
Il torrente Stura di Viù è il corso d'acqua principale della valle; nasce alle pendici del monte Rocciamelone (3 538 m) e dopo un percorso di circa 35 km da ovest verso est confluisce nella Stura di Lanzo a monte di Germagnano (506 m). L'area dell'intero bacino è di circa 240 km².

Dal punto di vista amministrativo la valle di Viù comprende i comuni di Germagnano, Traves, Viù, Lemie ed Usseglio, tutti appartenenti alla Comunità Montana delle Valli di Lanzo.

La viabilità principale è costituita dalla SP 32 che percorre l'intero asse vallivo, attraversando tutti i principali centri abitati della valle, e dalla SP 197 del Col del Lys che collega Almese (valle di Susa) con Viù (figura 2.7.22).

Figura 2.7.22

Inquadramento geografico dell'area di interesse.
 Legenda: 1) bacino idrografico della Stura di Viù; 2) limiti amministrativi comunali; 3) strade provinciali; 4) aree edificate; 5) SP 32, tratto interessato dal rilevamento PROVIALP; 6) idrografia



Il solco vallivo della valle di Viù ha una direzione prevalente est-ovest, analogamente alle altre due valli di Lanzo ma, a valle della località Borgo (al confine tra i comuni di Viù e Germagnano), assume bruscamente un andamento nord-sud che mantiene fino alla confluenza con la valle di Lanzo.

La valle presenta caratteri morfologici tipici legati prevalentemente al modellamento da parte dei corsi d'acqua ed alla dinamica dei versanti che obliterano e mascherano forme e depositi legati al modellamento glaciale quaternario. Le tracce più antiche di quest'ultimo sono state riconosciute in bassa valle di Viù in prossimità dell'abitato di Castagnole risalenti alla parte inferiore del Pleistocene medio mentre le più recenti sono ubicate in località Molar del Lupo, sospese circa 50 m sopra il fondovalle attuale e databili in modo

imprecisato tra il Pleistocene sup. e l'Olocene (Pinciarioli, 1989). Alle quote più elevate prevalgono le forme ed i depositi glaciali, riferibili sia all'ultimo massimo glaciale (LGM, *Last Glacial Maximum*) sia in diretta relazione con la presenza attuale o recente dei ghiacciai.

Il modellamento da parte dei corsi d'acqua si esprime sia attraverso i processi di erosione, prevalenti in tutto il bacino a causa probabilmente dell'attuale sollevamento generalizzato dell'area alpina, sia attraverso i processi deposizionali, caratterizzati dalla presenza di conoidi allo sbocco dei tributari nella valle principale e da limitati depositi alluvionali di fondovalle. Le testimonianze dei vari processi erosivo-deposizionali succedutisi nel corso dell'evoluzione della valle di Viù sono visibili a diverse quote su entrambi i versanti vallivi dove si riscontrano alcune rotture di pendenza e superfici terrazzate con o senza depositi. Nella bassa valle, la strada provinciale corre lungo una di queste superfici terrazzate ed in particolare lungo quella che rappresenta l'intersezione tra la più recente unità di modellamento fluviale e le più antiche, di origine glaciale (Carraro, 1992).

Il torrente Stura di Viù è caratterizzato attualmente da un alveo monocursale, da sinuoso a rettilineo, inciso nel substrato roccioso per gran parte del suo percorso e solo sporadicamente nei depositi alluvionali, che talora costituiscono delle ridotte isole fluvio-torrentizie a granulometria grossolana. La larghezza del fondovalle è assai variabile ma in genere risulta molto stretto (fino a poche decine di metri) soprattutto nei tratti: a monte di Crot (Usseglio), tra Trichera e Viù, e a valle della località Borgo (Germagnano) fino alla confluenza.

Gli affluenti principali del torrente Stura di Viù sono ubicati in sinistra idrografica, drenanti sotto-bacini di alcune decine di km² e sono il rio Arnas, il rio d'Ovarda ed il torrente Viana, tutti con asse vallivo orientato NW-SE; più modesti gli affluenti di sinistra tra i quali i principali sono il rio di Nanta ed il torrente Richiaglio. Tale assetto del reticolo idrografico riflette l'asimmetria dei versanti della valle: più corto e ripido il versante meridionale (destra idrografica), più lungo e meno pendente il settentrionale (sinistra idrografica).

Gli spartiacque principali del bacino della Stura di Viù si sviluppano a quote variabili, progressivamente crescenti da est verso ovest, e raggiungono talora valori relativamente elevati, oltre i 3 500 m di quota.

La dinamica dei versanti risulta particolarmente condizionata dalle caratteristiche lito-strutturali degli ammassi rocciosi che localmente denotano caratteristiche geomeccaniche assai scadenti e favorevoli all'instabilità.

Dall'analisi dei dati derivanti dall'archivio IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, Arpa Piemonte, 2004), i fenomeni di crollo risultano di gran lunga i principali processi di instabilità (oltre il 45% del totale dei fenomeni censiti) seguiti dai fenomeni complessi e di DGPV (oltre il 30%).

Particolarmente significativi risultano inoltre gli accumuli detritici a grossi blocchi diffusi sul versante destro nella bassa valle di Viù. Tali accumuli, di forma allungata e disposti all'interno degli impluvi, hanno origine nei settori medio alti dei versanti da un substrato sub-affiorante, molto fratturato e rilasciato (**figura 2.7.23**). La genesi e l'evoluzione di questi depositi, attribuita dal Capello (1963) a processi crionivali, è ancora controversa ed in corso di studio.

Figura 2.7.23 Corpi detritici allungati costituiti prevalentemente, in superficie, da grossi blocchi peridotitici (versante destro valle di Viù)



Dal punto di vista litologico, nella valle di Viù affiorano in modo prevalente i litotipi appartenenti alla Zona Piemontese dei Calcescisti con Pietre Verdi Auct., grande sistema multifalda che affiora con continuità in tutte le Alpi Occidentali. Sono inoltre presenti in minor misura alcuni litotipi appartenenti alla Zona Sesia-Lanzo, affioranti in una fascia larga pochi chilometri che attraversa ortogonalmente la valle in corrispondenza di Viù e che si chiude verso sud al Col del Lys (**figura 2.7.24**).

Figura 2.7.24 Stralcio dello Structural Model of Italy 1: 500 000 (CNR, Progetto finalizzato Geodinamica, 1990).

Legenda

Zona Sesia-Lanzo (Sistema Austroalpino delle Alpi Occidentali): 11b) ortogneiss metamorfosati in facies scisti verdi, derivanti da granitoidi tardo-ercinici (complesso di basamento di Arolla-Gneiss Minuti); 12a) para- e orto-scisti metamorfosati in facies eclogitica Eoalpina derivanti da para-gneiss di HT e da granitoidi tardo-ercinici; 12b) con meta-gabbri associati (Complesso dei Micascisti Eclogitici). Zona Piemontese (Unità oceaniche): 33a) coperture meta-sedimentarie sopra-oliolitiche pre-flysch; 33b) marmi e cherts radiolaritici, localmente manganesiferi; 33c) metabasalti; 33d) metagabbri ricchi in Mg e Ti da omogenei a listati; 34a) lherzoliti di mantello; 34b) serpentiniti antigoritiche; 34c) dicchi e filoni di gabbri e basalti metamorfosati in facies eclogitica; (Unità indifferenziate dei calcescisti): 35a) calcescisti indifferenziati. Falda Pennidica (Unità Pennidiche Superiori): 39a) micascisti indifferenziati e relitti minori di para-gneiss di HT (rocce di basamento); 41a) gneiss occhiadini e meta-granitoidi derivanti da corpi intrusivi tardo-ercinici (Gran Paradiso a nord e Dora-Maira a sud)



La natura composita dell'assetto strutturale e litostratigrafico della Zona Piemontese dei Calcescisti con Pietre Verdi di età mesozoica è stata riconosciuta a partire dagli anni '60 del XX secolo da numerosi autori in vari settori delle Alpi Occidentali interne, dal Vallese alle Alpi Graie e Cozie.

In particolare, nelle Alpi nord-occidentali, è stata distinta un'unità tettonica orientale ricca di ofioliti e caratterizzata da un assetto comparabile a quello di sezioni litosferiche oceaniche, e un'unità più occidentale, probabilmente composita, costituita soprattutto da metasedimenti carbonatici (calcescisti) e subordinatamente da ofioliti che rappresenterebbe l'originaria copertura di uno dei margini continentali del bacino oceanico ligure-piemontese. Più a sud, in corrispondenza della trasversale della bassa valle di Susa, la natura composita dell'assetto strutturale della Zona Piemontese appare ancora più evidente; qui, infatti, sono state riconosciute varie unità strutturali caratterizzate da assetti litostratigrafici differenti (Perotto et al., 1983 e rif. bibliografici).

La parte bassa della valle di Viù, dalla confluenza con la valle Stura di Lanzo fino a Porte (pochi chilometri a valle di Viù) è caratterizzata dalla presenza del Massiccio Ultrabasico di Lanzo, costituito da grandi volumi di peridotiti di origine mantellica, parzialmente serpentizzate lungo i loro margini e lungo le faglie maggiori, estremamente fresche e ben preservate ed intruse da numerosi dicchi gabbri e basaltici. I litotipi più caratteristici sono le lherzoliti a plagioclasio e, secondariamente, le pirosseniti, harzburgiti e duniti a spinello.

Il Massiccio Ultrabasico viene distinto in tre corpi principali (settentrionale, centrale e meridionale), nettamente suddivisi da zone di taglio milonitiche di estensione chilometrica costituite principalmente da serpentiniti antigoritiche. Il Massiccio Ultrabasico rappresenta uno degli affioramenti di peridotiti più estesi al mondo ed è stato interpretato come un massiccio ofiolitico derivante dalla litosfera oceanica della Tetide Ligure di età giurassica (Elter et al., 2005 e rif. bibliografici).

Dal punto di vista strutturale, nel Massiccio Ultrabásico di Lanzo si evidenziano strutture primarie originatesi all'interno del mantello, costituite dalle bande pirossenitiche che sono anche gli elementi strutturali più antichi riconoscibili sul terreno. Gli autori (Elter *et al.*, 2005) ritengono ragionevole spiegare che all'origine della foliazione a spinello e della lineazione mineralogica delle peridotiti a plagioclasio ci sia un evento deformativo che necessariamente richiese la presenza di un campo di deformazione persistente per lungo tempo nelle condizioni della facies a spinello. La lineazione mineralogica è resa evidente dai processi di alterazione e dilavamento avvenuti in superficie, che hanno asportato l'olivina, meno resistente, e lasciato gli spinelli che risultano sporgenti ed attribuiscono alla superficie della roccia una caratteristica rugosità (**figura 2.7.25**).

Figura 2.7.25 Blocco di peridotite in cui è evidente la lineazione mineralogica (linea tratteggiata)



Nell'alta valle di Viù sono state riconosciute (Perotto *et al.*, 1983) tre unità strutturali principali appartenenti alla Zona Piemontese e caratterizzate da associazioni litostratigrafiche differenti e definite "unità inferiore", "intermedia" e "superiore" in base alla loro attuale posizione tettonica.

L'unità inferiore è costituita principalmente da estesi corpi composti di metaofioliti (metabasalti, metagabbri, serpentiniti) e da metasedimenti (prevalenti calcescisti e marmi fillitici con intercalazioni di micascisti e quarziti micacee granatifere). Il contatto fra i metasedimenti e le principali masse metaofiolitiche è talora sottolineato da un orizzonte discontinuo in cui affiorano caratteristici metacherts mineralizzati a Mn (noduli di braunite e Mn-granato). L'unità intermedia è costituita da una sequenza di calcescisti con abbondanti intercalazioni di gneiss albitici associati a micascisti e subordinate intercalazioni di metabasiti.

L'unità superiore è costituita essenzialmente da una sequenza carbonatica con marmi a silicati e calcescisti e da subordinati litotipi ofiolitici presenti solo localmente nella parte basale dell'unità ove sembrano rappresentare delle scaglie di origine tettonica. I contatti fra queste unità mostrano delle caratteristiche differenti. Il contatto fra unità inferiore ed intermedia non è sempre individuabile con esattezza in quanto mette spesso a contatto litotipi simili (calcescisti); esso è tuttavia più facilmente riconoscibile dove è sottolineato da lenti poco potenti (probabili scaglie tettoniche) di marmi dolomitici, di serpentinoscisti oppure di metagabbri. Il contatto con l'unità superiore è viceversa più facilmente riconoscibile, in particolare ove è sottolineato da un livello decametrico di marmi dolomitici e di carnirole. Dal punto di vista strutturale, in letteratura si possono reperire informazioni di dettaglio solo per gli effetti della deformazione duttile (pieghe) mentre scarseggiano, o sono del tutto assenti, rilievi o considerazioni sulla deformazione di tipo fragile (faglie e fratture).

L'analisi strutturale di dettaglio ha permesso infatti il riconoscimento di almeno quattro fasi di deformazione duttile di età alpina (F1-F4). Le prime due fasi (F1, F2) sono caratterizzate da pieghe isoclinali anche a grande scala e possono essere correlate con le principali fasi di appilamento delle unità tettoniche (**figura 2.7.26**). Le fasi successive (F3, F4) sono invece responsabili di strutture plicative a carattere più blando che deformano l'edificio tettonico preesistente. Lo studio dei contatti tettonici fra le tre unità permette di suggerire che la giustapposizione delle unità inferiore ed intermedia ha preceduto la fase F2 che ripiega il contatto tra le due unità; viceversa la messa in posto dell'unità superiore appare successiva all'appilamento delle due unità sottostanti poiché il contatto basale non risulta piegato dalla fase F2 (Perotto et al., 1983).

Figura 2.7.26 Effetti della deformazione duttile (F1 e F2) nei calcescisti con livelli marmorei (SP 32, poco a valle del lago di Malciaussia, comune di Usseglio)



La Zona Sesia-Lanzo è costituita, in questo settore delle Alpi Occidentali, da gneiss albitici a fengite e biotite, indicati come “gneiss minuti” nel citato Foglio 55, “Susa”, della Carta Geologica d'Italia. Queste rocce, unitamente ai “micascisti eclogitici”, agli “gneiss-Sesia” e alle rocce della “2ª Zona Dioritico-Kinzigitica”, costituenti la stessa unità strutturale, sono state considerate come un frammento di crosta continentale pluri-deformato e trasformato dal metamorfismo regionale; questa unità affiora in un'area di forma ellittica, con asse maggiore lungo un centinaio di chilometri in direzione NE-SW, dalle valli di Lanzo all'Ossola. Il complesso degli “gneiss minuti” è costituito da rocce di origine prevalentemente eruttiva, di composizione granitoide, caratterizzate da associazioni mineralogiche ad albite, mica bianca, epidoto, clorite, attinoto e biotite. L'associazione di tali minerali è considerata caratteristica del secondo evento metamorfico alpino (“lepontino”), datato intorno a 38 milioni di anni (Dal Piaz et al., 1972; Hunziker, 1974). Più in dettaglio, nell'area qui considerata, questa unità è rappresentata da alternanze di gneiss albitici, micascisti quarzifici e livelli prasinitici (Nicolas, 1966). Il contatto tra la Zona Piemontese e la Zona Sesia-Lanzo è di natura tettonica, evidenziato da zone di taglio di estensione chilometrica ripiegate durante l'evento alpino eclogitico. Ciò è dimostrato anche dalla facies eclogitica di alta pressione delle associazioni nelle rocce metamorfiche trovate nel settore meridionale del Massiccio Ultrabásico (Kienast e Pognante, 1988). I rapporti tra queste unità sono particolarmente complicati tanto che quest'area ha assunto, nella letteratura geologica, la denominazione di “Zona a scaglie di Viù” per evidenziare la pressoché continua alternanza di litotipi diversi per composizione mineralogica, origine ed evoluzione geologica.

Per quanto riguarda l'assetto strutturale della Zona Sesia-Lanzo in valle di Viù, in letteratura non sono reperibili informazioni di dettaglio.

Ricerca storica

Luca paro - Arpa Piemonte

La ricerca storica sui processi di instabilità idrogeologica e sui relativi effetti al suolo risulta sempre molto complicata a causa della elevata dispersione delle informazioni. Infatti, le notizie relative ai dissesti che hanno interessato le vallate alpine, qualora disponibili, sono raccolte in numerosi documenti (religiosi, amministrativi, militari, tecnico-scientifici) e custoditi in innumerevoli archivi, molto spesso non ordinati e catalogati. Risulta pertanto che la ricerca storica sia molto dispendiosa (in termini di tempo e di energia) e, nella quasi totalità dei casi, incompleta. Anche nel caso della valle di Viù bisogna tenere in considerazione che il tempo dedicato alla ricerca e la quantità di informazioni reperite sono da ritenersi insufficienti per avere un quadro completo degli eventi storici documentati. Nella **tabella 2.7.8** si riporta pertanto, a puro titolo indicativo, una sintetica raccolta delle informazioni relative ai fenomeni gravitativi avvenuti in valle di Viù, ricavate presso alcuni archivi comunali della valle, della Provincia di Torino/CNR-IRPI e dell'Arpa Piemonte.

Tabella 2.7.8 Sintesi dell'analisi storica delle informazioni relative al dissesto lungo i versanti in valle di Viù

Comune	Località	Data	Descrizione
Germagnano	Viabilità principale	Febbraio 2007	In seguito all'ennesima caduta è stato eseguito un disaggio lungo il versante sinistro della SP 32 nel tratto compreso tra le progr. km 4 + 300 e km 4 + 600
Lemie	Saletta	1795	Enormi massi caduti presso l'abitato
Lemie	Viabilità principale	1820 circa	Caduti massi sulla strada tra Saletta e Chiandusseglio
Lemie	Saletta	21 Ottobre 1980	Minacciate tre abitazioni, massi arrestati pochi metri a ridosso di queste, schegge sino alla SP 32
Lemie	Capoluogo	13 Dicembre 1985	Minacce per edifici
Lemie	Viabilità secondaria	05 Novembre 1994	Danni alle strade comunali Villa Valossera, Chiandusseglio, Inversigni
Traves	Biò/Traves	2 Ottobre 1991	"Si è verificato un crollo di massi e un blocco si è arrestato sulla sede stradale... Risultano minacciati dal fenomeno i fabbricati di civile abitazione"
Usseglio	Cortevicio	1907	Grossi massi precipitano nei pressi della parrocchiale di Usseglio
Usseglio	Cortevicio	1908	Minacciata la parrocchiale di Usseglio
Usseglio	Balma	Ottobre 1839	Una frana (non precisata) si è staccata nei pressi delle case del Cugnè ed ha interessato la frazione Balma
Usseglio	Usseglio	16 Maggio 1926	"Straripamento del R.Venaus...una frana staccatasi dai fianchi dei monti circostanti venne ad ostruire l'alveo del torrente, obbligando le acque a riversarsi fuori dal loro corso normale..."
Usseglio	Cortevicio	14 Giugno 1957	"Tre scoscendimenti di terra e pietre abbattutisi sul paese", due hanno arrecato danni trascurabili mentre una ha distrutto una villetta posta poco lontano dal rio Chiò e poi ha investito una segheria
Usseglio	Cortevicio	24 Giugno 1989	Caduta massi da una parete subverticale parzialmente vegetata; rotolio, rimbalzo moderato di alcuni massi ed arresto in prossimità di alcune case di civile abitazione (demolite)
Usseglio	Margone/Malciaussia	03 Apr. 1991	"Esteso movimento franoso ubicato a monte abitato di Margone...Rotolamento enormi massi tuttora in atto". Interruzione SP Margone-Malciaussia in due punti
Usseglio	Quagliera, sede viabile a mezza costa	4 Ottobre 1997 (sopralluogo)	Frana complessa. Presenza di diverse sorgenti (nel corpo di frana). L'infrastruttura e' già stata colpita in precedenza. (Vecchia frana attiva)
Usseglio	Viabilità principale	Primavera 2005	Massi di 3÷5 m ³ cadono sulla SP 32 nel tratto tra Margone e Malciaussia
Viù	Viabilità principale	24 Settembre 1901	Interrotta per frane la rotabile di Viù
Viù	Fubina Germagnano-Viù	14 Giugno 1957	Piccole frane si sono abbattute sulla SP. Ostruzione della SP ed erosione delle acque del T.Fubina. Proposto intervento di "Consolidamento con gabbionate al piede del corpo stradale franato"
Viù	Viabilità secondaria	08 Novembre 1962	Isolate le fraz. Venera, Rocchiatera, Balma e Brendo in sinistra Stura per frane che hanno interrotto la viabilità
Viù	Cramoletti	3 Settembre 1965 (documento)	"Movimenti franosi interessanti solo il manto detritico.. accentuato richiamo esercitato verso il basso dal T.Viana. La falda franosa investe Cramoletti inf. Necessità di tenere sgombrare le case. Intervento di accurata regimazione delle acque al disopra del nucleo abitato, convenienza di costruire alcune briglie nel T.Viana"
Viù	Trichera	3 Novembre 1968	Frane, alcune di notevole entità. Strada interrotta per "cedimento"
Viù	Polpresa/Tornetti	3 Novembre 1968	Frana "immensa" massa di terreno staccatasi a circa 20 m dalla scarpata sovrastante la strada. Non coinvolta la SP
Viù	Oldri-Salvagnengo Germagnano-Viù	3 Novembre 1968	"Smottamenti di terreno". Cedimento muri laterali esistenti. Completamente dissestato il sedime dell'intera comunale"
Viù	Molar-Aires-Chiaberger-Crotti	3 Novembre 1968	"In località Case Piagni frana di notevoli dimensioni". Riduzione della sede viaria
Viù	Richiaglio case Murinera	3 Novembre 1968	"Frane verificatesi sull'intera comunale... e frana di notevole entità a Case Murinera. Completamente dissestato il sedime dell'intera comunale". Non coinvolta la SP
Viù	Bertesseno	1987	Frana di tipo rotazionale. Cedimento della sede viabile (SP 197) per circa 30 m
Viù	Polpresa	1991	Frana rotazionale in detrito. Strada ostruita per circa 30 m

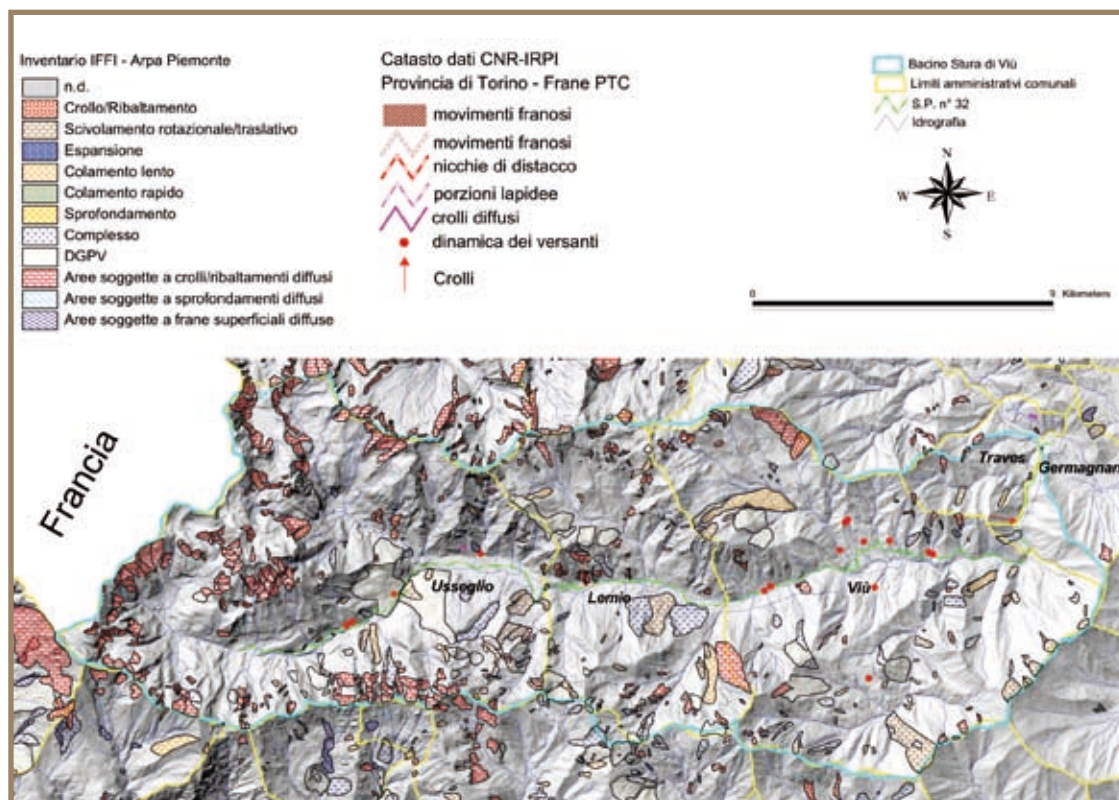


Figura 2.7.27 Lavori di dis-gaggio dei massi instabili effettuati nel febbraio 2007 lungo la SP 32 nel comune di Germagnano (per gentile concessione della Comunità Montana Valli di Lanzo)

si originano ripetuti distacchi di medie e piccole dimensioni (1-5 m³). Inoltre, la realizzazione o l'allargamento della strada stessa spesso avvengono attraverso tagli artificiali della roccia, eseguiti anche con l'esplosivo, con conseguente destabilizzazione degli ammassi rocciosi posti immediatamente a ridosso della strada. Tuttavia, se non si verificano danni importanti, i blocchi che cadono ripetutamente sulla strada vengono rimossi con poco sforzo (a mano o con l'aiuto di una pala meccanica) senza che ne rimanga traccia né sui manufatti né negli archivi. Ne è un tipico esempio la bassa valle di Viù, dove la strada provinciale è stretta e scavata a mezzacosta nella roccia alterata e allentata, elevata di alcune decine di metri rispetto al fondovalle. I distacchi da queste pareti, per lo più continue o parzialmente nascoste dalla vegetazione arborea, avvengono pressoché annualmente, in genere in primavera o in corrispondenza di precipitazioni intense. Per limitare i danni al transito veicolare, l'Amministrazione Provinciale di Torino, in concorso con la Comunità Montana, esegue dis-gaggi controllati dei blocchi pericolanti ed il taglio della vegetazione destabilizzante. Di questi lavori, però, non resta traccia alcuna negli archivi, se non qualche sporadica fotografia (**figura 2.7.27**).

Altre informazioni relative il quadro del dissesto possono essere reperite attraverso l'analisi dei dati territoriali raccolti nel sotto-sistema "Frane in Piemonte" (SIFraP) del Sistema Informativo Geologico di Arpa Piemonte (SIGeo). In **figura 2.7.28** sono sintetizzati i dati territoriali disponibili relativi al quadro del dissesto lungo i versanti della valle di Viù.

Figura 2.7.28 Quadro del dissesto derivante dal Progetto IFFI (Arpa Piemonte, 2004) e dal catasto Provincia di Torino-CNR/IRPI "Frane PTC" (http://www.provincia.torino.it/territorio/strat_strumenti/distr_dati/dbtrf) per la valle di Viù



In base ai dati derivanti dal progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, Arpa Piemonte, 2004) per la valle di Viù, risulta un'area totale in frana (somma delle aree delle frane poligonali cartografate) pari a 27.8 km² (11.5% dell'area totale del bacino), di cui:

- 12.8 km² di frane di crollo e di aree soggette a crolli (46.3% dell'area totale in frana nel bacino della valle di Viù);
- 8.9 km² di fenomeni complessi e di DGPV (31.9% dell'area totale in frana nel bacino della valle di Viù);
- 3.2 km² di scivolamenti rotazionali/traslattivi (11.4% dell'area totale in frana nel bacino della valle di Viù);
- 2.6 km² di colamenti lenti (9.4% dell'area totale in frana nel bacino della valle di Viù);
- il restante 1% è costituito da frane superficiali ad evoluzione rapida e da fenomeni di tipologia non definita.

Come si può notare dai dati sopra riportati, i fenomeni di crollo risultano di gran lunga i principali processi di instabilità, seguiti dai fenomeni complessi e DGPV (Deformazioni Gravitative Profonde di Versante, *Auct.*).

I fenomeni di crollo possono avvenire per distacchi continui di porzioni rocciose anche modeste (aree soggette a crolli) oppure per distacchi improvvisi di grandi volumi (crolli s.s.). I primi producono generalmente falde detritiche che si depositano alla base dei versanti rocciosi mentre i secondi creano in genere accumuli detritici isolati talora a forma conoidale. Naturalmente, nella maggior parte dei casi, i due tipi di processo ed i relativi accumuli coesistono e sono di difficile distinzione. Questi fenomeni sono ben riconoscibili nei settori altimetricamente più elevati dove la copertura vegetale non ne maschera i depositi e dove effettivamente i processi di degradazione dell'ammasso roccioso sono più intensi. Per questo motivo il 75% circa dei crolli e delle aree soggette a crollo sono ubicate oltre i 1 900 m di quota ed Usseglio, che comprende la zona di testata della valle, è il territorio comunale con la maggiore diffusione di questi fenomeni (70% dell'intero bacino).

Per quanto riguarda i fenomeni complessi e le DGPV sono fenomeni caratteristici dell'ambiente alpino piemontese e particolarmente diffusi nei contesti geologici analoghi a quelli della valle di Viù; infatti, in questa valle, si sviluppano esclusivamente nei complessi rocciosi costituiti da calcescisti e da serpentiniti.

I fenomeni complessi e le DGPV sono stati qui raggruppati in quanto spesso si trovano in stretta associazione, presentando talora caratteristiche comuni. In valle di Viù, i fenomeni complessi hanno un'area totale di poco superiore a quella delle DGPV (rispettivamente 4.7 e 4.2 km²). Le DGPV sono meno numerose ed hanno dimensioni medie maggiori rispetto ai fenomeni complessi (DGPV: 29 fenomeni cartografati con area media 0.14 km²; fenomeni complessi: 54 frane cartografate con area media 0.08 km²), anche se il fenomeno di dimensioni maggiori tra le due tipologie è un fenomeno complesso (scivolamento e colamento) ubicato sul versante destro della valle, nel comune di Lemie.

Individuare tali tipologie di fenomeni assume una particolare importanza in alcuni contesti morfologici e litostutturali in quanto alle deformazioni gravitative spesso sono associati fenomeni di dimensioni minori, tra i quali anche i fenomeni di crollo. Infatti, i processi di creep che interessano gli ammassi rocciosi portano ad una esasperazione del grado di allentamento dell'ammasso stesso che talora dà origine a fenomeni di collasso repentino in cui si ha distacco di singoli blocchi o a veri e propri fenomeni di crollo in massa. Nell'ambito di numerosi progetti condotti negli ultimi dieci anni da Arpa Piemonte è stata più volte evidenziata la stretta relazione tra le deformazioni gravitative ed i processi di dimensioni minori, quali i crolli, e come questi ultimi caratterizzino pesantemente l'analisi di pericolosità e di rischio (AA.VV., 1996; Bonnard *et al.*, 2004; Morelli e Paro, 2005; 2007).

Rilievi di terreno

Luca Paro - Arpa Piemonte

I rilievi di terreno sono stati condotti lungo l'asse viario principale della valle di Viù costituito dalla SP 32, a partire dalla progressiva km 37+590 (a monte della località Pian Bausano) fino alla progressiva km 73+00 (lago di Malciaussia).

Il rilevamento è iniziato nell'estate 2006 ed ha interessato inizialmente i settori altimetrici più elevati. Ciò per due motivi: uno legato alla maggiore probabilità di copertura nuvolosa e nevosa nella tarda estate/

autunno che impedisce le osservazioni dei versanti; l'altro legato alla chiusura al traffico da ottobre a maggio del tratto stradale a monte di Margone fino al lago di Malciaussia. Nell'autunno 2006 e nell'inverno 2006/2007 sono stati effettuati rilievi geo-strutturali di dettaglio nell'area di Usseglio nell'ambito di alcune tesi di laurea in Ingegneria Edile del Politecnico di Torino di cui Arpa Piemonte è stata correlatrice. Le finalità di tali tesi erano volte a validare la metodologia ed i dati PROVIALP nel contesto geologico-geomorfologico della medio-alta valle di Viù ed a confrontare alcuni metodi di rilievo a diversa scala. Nel tardo inverno/inizio primavera 2007 il rilievo speditivo ha interessato i versanti della media e bassa valle, ben visibili anche da distante in quanto totalmente privi di copertura nevosa e fogliare degli alberi. Nell'estate 2007, in seguito alle elaborazioni effettuate dal Politecnico di Torino sui dati raccolti durante la campagna di rilevamento, sono stati effettuati alcuni sopralluoghi congiunti di rilevatori ed elaboratori finalizzati a verificare e validare reciprocamente rilievi ed analisi numeriche.

Seguendo la metodologia adottata nel presente progetto sono state individuate 68 aree omogenee riprese da 77 stazioni fotografiche (delle quali 59 ubicate lungo la strada provinciale o in prossimità ad essa, sullo stesso versante dell'area omogenea ripresa, e 18 ubicate sul versante opposto rispetto all'area omogenea ripresa). Nelle **tabelle 2.7.9 e 2.7.10** sono sintetizzati alcuni risultati derivanti dal rilevamento.

Comune	Aree omogenee						LSP comune (m)	LSP area omogenea (m)	LSP area omogenea / LSP comune (%)
	tipo 1		tipo 2		tipo 3				
	n	area (m ²)	n	area (m ²)	n	area (m ²)			
Traves	0	0	0	0	0	0	0	0	
Germagnano	6	85 609	3	119 340	0	0	3 774	2 170	
Viù	14	41 371	5	77 485	11	171 905	12 247	4 387	
Lemie	4	12 731	3	868 895	0	0	6 888	4 660	
Usseglio	7	52 536	7	769 539	8	982 979	10 439	8 560	
TOTALI	31	192 247	18	1 835 259	19	1 154 884	33 349	19 777	

Tabella 2.7.9 Sintesi dei dati raccolti nel corso del rilevamento di terreno suddivisi per tipologia delle aree omogenee e per comune.

Legenda

n = numero di poligoni perimetrali; area (m²) = area totale dei poligoni perimetrati espressa in m²; LSP Comune = Lunghezza tratto SP 32 compreso nel comune, espressa in m; LSP area omogenea = Lunghezza tratto SP 32 compreso nelle aree omogenee, espressa in metri

Gruppo Litologico	Aree omogenee			
	n	n %	area (m ²)	area %
MUL	14	20.6	288 410	9.0
ZSL	5	7.4	27 987	0.9
ZP	49	72.1	2 875 813	90.1
TOTALI	68	100	3 192 210	100

Tabella 2.7.10 Sintesi dei dati raccolti nel corso del rilevamento di terreno suddivisi per aree omogenee e gruppi litologici.

Legenda

MUL = Massiccio Ultrabásico di Lanzo; ZSL = Zona Sesia-Lanzo; ZP = Zona Piemontese dei Calcescisti con pietre verdi; n = numero di poligoni perimetrati (non distinti per tipologia di area omogenea); n% = numero di poligoni perimetrati (non distinti per tipologia di area omogenea) espressi in % sul totale dei poligoni; area (m²) = area totale dei poligoni perimetrati espressa in m²; area% = area dei poligoni perimetrati espressa in % rispetto all'area totale

La delimitazione e la classificazione delle aree omogenee ha seguito i criteri della metodologia progettuale, applicata in modo differente a seconda dei contesti geologico-geomorfologici e vegetazionali. In particolare, nella bassa valle, la distinzione tra le aree di tipo 1 e le aree di altre tipologie è stata effettuata essenzialmente in base al grado di affioramento e visibilità dell'ammasso roccioso dal punto di osservazione; parziali modifiche e correzione sono state effettuate con l'ausilio delle foto aeree. In questo tratto della valle, la strada risulta tagliata artificialmente a mezza costa lungo i versanti; ciò ha messo a nudo le rocce interrompendo la continuità dei versanti costituiti da roccia subaffiorante e localmente ricoperti dalla vegetazione arboreo-arbustiva. In questo modo, sono state operate le seguenti scelte di distinzione:

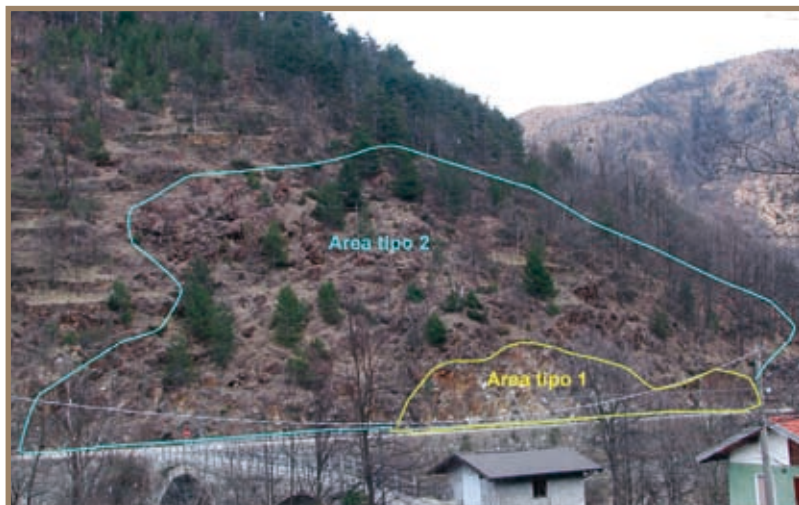


Figura 2.7.29 Esempio di delimitazione di aree omogenee di tipo 1 e di tipo 2 contigue, distinte in base al grado di affioramento e copertura arborea

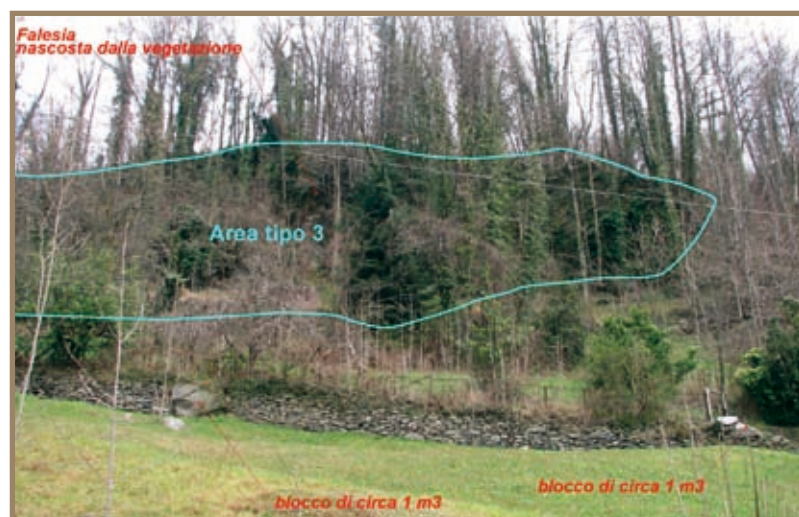


Figura 2.7.30 Esempio di delimitazione di area omogenea di tipo 3 posta qualche decina di metri al di sopra della strada provinciale. Al piede del versante si evidenziano indizi di instabilità ma a causa della scarsa visibilità non è possibile effettuare alcuna misura della parete da distante



Figura 2.7.31 Esempio di delimitazione di aree omogenee di tipo 2 e di tipo 3 contigue, distinte in base alla distanza ed alla visibilità del versante dal punto di osservazione

- i versanti a monte della strada tagliati artificialmente e costituiti da affioramenti rocciosi sono stati classificati come aree omogenee di tipo 1 (**figura 2.7.29**);
- i versanti a monte della strada e contigui/prossimi alle aree omogenee di tipo 1 in cui si osserva una certa continuità dell'ammasso roccioso, anche se subaffiorante o parzialmente nascosto dalla vegetazione, sono stati classificati come aree omogenee di tipo 2 (**figura 2.7.29**);
- i versanti a monte della strada e contigui/prossimi alle aree omogenee di tipo 1 e di tipo 2 in cui si percepisce una certa continuità dell'ammasso roccioso, anche se affiorante o subaffiorante ma in gran parte nascosto dalla vegetazione, sono stati classificati come aree omogenee di tipo 3 (**figura 2.7.30**);
- i versanti a monte della strada e contigui/prossimi alle aree omogenee di tipo 1, di tipo 2 e di tipo 3 in cui l'incertezza della delimitazione e della classificazione è troppo alta a causa della non visibilità del versante stesso, non sono stati né delimitati né classificati (**figura 2.7.30**).

Nella media e, soprattutto, nell'alta valle, l'approccio utilizzato per la distinzione tipologica delle aree omogenee ha seguito criteri leggermente differenti. In questi tratti vallivi diminuiscono sensibilmente le aree di tipo 1 in quanto diminuiscono i tagli stradali artificiali e gli affioramenti rocciosi diventano sporadici; aumentano la pendenza e l'energia di rilievo dei versanti che incombono sulla strada. Pertanto, nonostante le pareti rocciose siano ben riconoscibili in quanto prive di vegetazione (**figura 2.7.31**), le stesse sono difficilmente osservabili e misurabili in quanto i punti di osservazione risultano o troppo a ridosso, quando posti sullo stesso versante, o troppo distanti, quando posti sul versante opposto. I rilievi di terreno hanno permesso inoltre di tarare la delimitazione e la caratterizzazione delle aree omogenee di tipo 0 effettuate quasi esclusivamente utilizzando le foto aeree e le coperture digitali disponibili dei piani regolatori e dell'uso del suolo.

L'osservazione diretta ha permesso inoltre la formulazione di alcune considerazioni riguardo allo stato ed al grado di fratturazione degli ammassi rocciosi. In particolare è stato possibile osservare una netta distinzione del grado di alterazione, della densità di fratturazione e del grado di allentamento tra i diversi tipi di rocce che affiorano nella valle di Viù.



Figura 2.7.32 Tipico aspetto frantumato e allentato degli ammassi rocciosi peridotitici nella bassa valle di Viù

Il grado di fratturazione e di allentamento degli ammassi rocciosi peridotitici, localmente esaltato dall'azione deflagrante dell'esplosivo utilizzato per creare la strada stessa, ha comportato alcuni problemi nell'analisi strutturale. Infatti, la scarsa persistenza e la giacitura non equi-angolare delle discontinuità ha reso difficile, e talora impossibile, l'identificazione di sistemi e famiglie di giunti. In tali contesti, dove possibile, sono state effettuate notevoli semplificazioni cercando di raggruppare in famiglie giunti con immersione variabile anche di $30^\circ - 40^\circ$. Successivamente si è dovuto procedere ad una fase di correzione a causa dei notevoli problemi di interpretazione dell'assetto strutturale e dei cinematicismi. Dove l'operazione di creazione "forzata" delle famiglie risultava affetta da errori troppo elevati, si è preferito non procedere con le misure strutturali, indicando nel database la dicitura "ammasso roccioso frantumato".

Tutti questi fattori conducono ad un elevato grado di instabilità degli ammassi rocciosi che condiziona in modo importante la pericolosità lungo la viabilità principale nella bassa valle di Viù. Per questo motivo, nelle analisi numeriche, sono stati attribuiti valori di probabilità di distacco pari a 1 agli ammassi rocciosi "frantumati".

Le rocce appartenenti alla Zona a Calcescisti e Pietre Verdi presentano caratteristiche assai diverse da quelle precedentemente descritte. I sistemi di fratturazione sono facilmente identificabili e grazie alla loro persistenza, che in alcuni casi è pluri-chilometrica, sono osservabili per lunghi tratti lungo i versanti e, in alcuni settori, condizionano il modellamento morfologico della valle.

Figura 2.7.33 Associazione di diversi litotipi che evidenziano tre diversi stili deformativi: i calcescisti con scistosità pervasiva ed omogenea, i marmi ripiegati con foliazione decimetrica, le serpentiniti massicce



Le principali difficoltà riscontrate nel corso del rilevamento in questi contesti geologico-strutturali sono legate essenzialmente alle eterogeneità litologiche del Complesso dei Calcescisti. Infatti, questa unità è costituita da associazioni di rocce assai differenti nelle caratteristiche sia mineralogiche sia geomeccaniche. La deformazione fragile nelle rocce scistose (quali calcescisti, micascisti, serpentinoscisti) e nelle rocce massicce (quali marmi, gneiss, serpentiniti) assume caratteristiche molto differenti, pur trovandosi in stretto contatto. Infatti, a causa della diversa reologia dei materiali, la fratturazione si propaga in modo sensibilmente differente nei vari litotipi (figura 2.7.33). Ciò ha comportato l'introduzione di semplificazioni nella individuazione dei sistemi e delle famiglie di giunti, soprattutto nelle aree di dimensioni maggiori dove le associazioni di litotipi diversi sono più estese.



Figura 2.7.34 Serpentiniti tettonizzate con fratturazione pervasiva, tipica delle zone di taglio principali, affioranti in località Porte di Viù

Nella zona intermedia tra il Massiccio Ultrabasico di Lanzo e la Zona a Calcescisti e Pietre Verdi, in corrispondenza dell'abitato di Viù, affiorano le rocce appartenenti alla cosiddetta "Zona a scaglie di Viù", attribuita alla Zona Sesia-Lanzo. Le varie unità sono giustapposte le une alle altre attraverso importanti contatti tettonici ad alto angolo che nel corso della storia geologica hanno avuto cinematiche differenti. Questi contatti tettonici sono alla radice della pervasiva clastesi osservabile in modo particolare nelle serpentiniti in località Porte di Viù (**figura 2.7.34**). La fratturazione è caratterizzata da una fitta maglia (prevalentemente centimetrica) di giunti, mineralizzati spesso ad asbesto che talora rinsalda le fratture stesse; le fratture appartengono essenzialmente a due sistemi che, incrociandosi, definiscono degli elementi di forma romboidale. Queste rocce formano una fascia caratterizzata da una notevole continuità, che prende inizio nella parte inferiore del vallone del rio Richiaglio e si sviluppa sul versante sinistro della valle di Viù dove raggiunge la cresta spartiacque immediatamente a est della sommità del monte Bellacomba.

Il rilevamento di terreno ha consentito inoltre l'osservazione diretta delle opere di protezione realizzate lungo il tracciato della provinciale. Considerato il grado di fratturazione ed instabilità dei versanti, in generale sono state osservate modeste opere di protezione, la maggior parte delle quali di tipo attivo (**figura 2.7.35 a, b, c**). Si segnala la scarsa manutenzione delle stesse ed in particolare dei muretti a secco, alti fino ad 1.5 m, alcuni dei quali danneggiati in più punti (**figura 2.7.35 d**).



Infine, la campagna di rilevamento ha permesso di osservare gli effetti di alcuni crolli recenti avvenuti in più punti lungo la provinciale (**figura 2.7.36**).

Figura 2.7.35 Esempi di opere di protezione lungo la SP 32: a) galleria paramassi e paravalanghe in località Crot (Usseglio); b) reti zincate in aderenza a bassa resistenza (Germagnano); c) contraforte in cemento armato (Germagnano); d) lesioni ad un muretto a secco (Lemie)

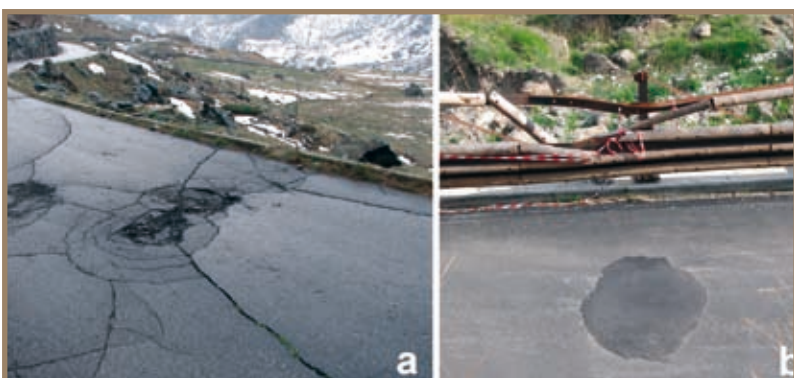


Figura 2.7.36 - a) Tracce recenti di impatti di blocchi crollati sulla sede stradale del vallone di Arnas (i blocchi hanno rimbalzato sulla strada proseguendo la loro caduta verso valle, fotografia marzo 2007); b) tracce di impatto di un blocco caduto sulla SP 32, in prossimità del lago di Malciaussia (Usseglio), che ha rimbalzato sull'asfalto (ripristinato) danneggiando il guard rail (fotografia settembre 2006)

Analisi cinematica tramite stereogrammi

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

In questo paragrafo è descritto l'iter seguito per l'individuazione dei potenziali cinematismi (analisi cinematica) all'interno delle aree omogenee in cui sono stati suddivisi i versanti analizzati in valle Viù di Lanzo. Al fine di illustrare la procedura seguita ed i risultati ottenuti, viene riportato un esempio di applicazione corrispondente ad un'area omogenea significativa; si rimanda al materiale contenuto nel DVD allegato al presente lavoro, per consultare i dati relativi all'intera valle.

A partire dai risultati del rilievo speditivo di terreno, per ciascuna area omogenea l'analisi cinematica consiste in:

1. rappresentazione stereografica equatoriale della giacitura media del fronte e delle discontinuità presenti;
2. individuazione e verifica dei potenziali cinematismi osservati in sito, cioè verifica che la giacitura delle discontinuità rispetti le condizioni cinematiche per l'instabilità illustrate al paragrafo 2.4.2 (figura 2.4.1);
3. individuazione di eventuali ulteriori cinematismi, possibili dal punto di vista geometrico ma non indicati dal rilievo.

L'analisi cinematica sugli stereogrammi viene condotta non solo per i valori medi di giacitura del fronte e delle discontinuità ma anche tenendo conto della variabilità della giacitura stessa, al fine di non trascurare la possibilità di formazione di un volume potenzialmente instabile per effetto di variazioni dei parametri geometrici. Solo nel caso in cui il rilievo abbia evidenziato un potenziale cinematismo riferito ad una variazione locale del fronte non sono state condotte ulteriori analisi cinematiche.

L'analisi cinematica condotta sulle aree omogenee di tipo 1 o 2 identificate nella valle di Viù ha dato come risultato 96 potenziali cinematismi, di cui 67 scivolamenti planari, 23 scivolamenti a cuneo, 3 ribaltamenti e 3 distacchi puri o aree disarticolate. 78 di questi cinematismi sono stati "segnalati" dal rilievo e 8 sono risultati dall'analisi degli stereogrammi (Occhiena, 2007).

A titolo di esempio si riporta in dettaglio il caso dell'area omogenea n° 66, situata in località Trichera; questa area infatti, oltre a presentare i tre tipi di cinematismo analizzati nel progetto, risulta particolarmente significativa dal punto di vista dell'aspetto geomorfologico. Nell'area infatti si può osservare una serie di affioramenti discontinui lungo il versante di pietre verdi e calcescisti. L'affioramento più significativo è rappresentato da una falesia alta una dozzina di metri e attrezzata per l'arrampicata. In tutta l'area sono

presenti numerosi blocchi di piccole e medie dimensioni e lungo il resto del versante sono osservabili anche blocchi di dimensioni considerevoli (alcune decine di metri cubi). La figura 2.7.37 mostra una porzione del versante rilevato all'interno dell'area 66.

In questa area l'angolo di immersione α del fronte può assumere valori compresi tra un minimo di 150° ed un massimo di 190° , con un valore medio di 170° , mentre l'angolo di inclinazione ψ varia tra 60° e 80° , con un valore medio di 70° . In fase di rilievo è stato segnalato anche un fronte locale sul quale si imposta un cinematismo per scivolamento planare coinvolgente la famiglia di piani B. Il valore medio dell'angolo di immersione del fronte locale è di 110° e può variare da un minimo di 90° ad un massimo di 130° . Il valore medio del suo angolo di inclinazione, invece, è di 60° ed assume valori compresi tra 45° e 75° . Sono state inoltre individuate e misurate in sito 5 famiglie di discontinuità; la tabella 2.7.11 riporta i valori medi e gli intervalli di variazione delle giaciture misurate.

Figura 2.7.37 Parete corrispondente all'area omogenea n° 66, sita in località Trichera

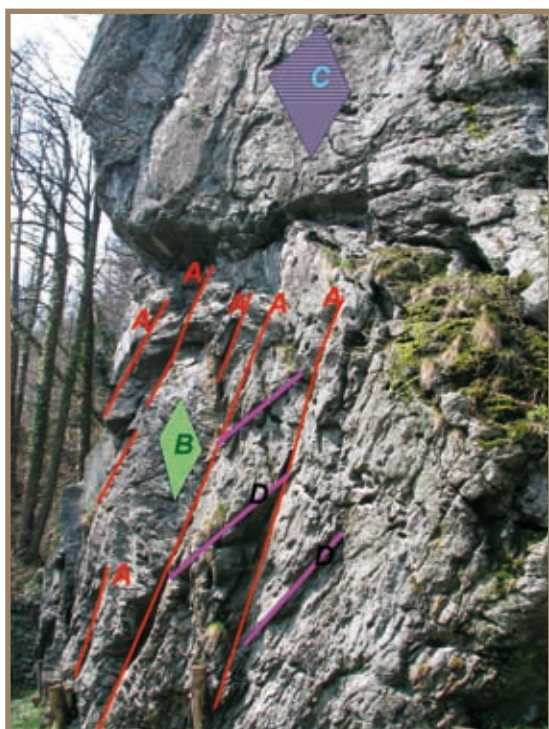


Tabella 2.7.11

Caratteristiche di giacitura delle famiglie di discontinuità rilevate nell'area omogenea n° 66

Famiglia	Immersione (α)		Inclinazione (ψ)	
	media	variabilità	media	variabilità
A	170°	± 20°	70°	± 10°
B	110°	± 20°	60°	± 15°
C	130°	± 20°	75°	± 15°
D	290°	± 20°	60°	± 15°
E	0°	± 15°	65	± 10°
fronte	170°	± 20°	70°	± 10°
Fronte locale	110°	± 20°	60°	± 15°

Figura 2.7.38 Vista laterale del versante in esame, con indicazione dei piani misurati



In **figura 2.7.38** sono stati evidenziati i piani di discontinuità misurati in sito in una porzione del versante esaminato. La vista è frontale rispetto al fronte locale, di taglio rispetto al fronte medio; è quindi possibile notare lo scivolamento planare che si imposta sulla famiglia A (parallela al fronte medio) con giunto di trazione la famiglia B e coinvolgente il fronte medio, e lo scivolamento planare sulla famiglia B coinvolgente il fronte locale.

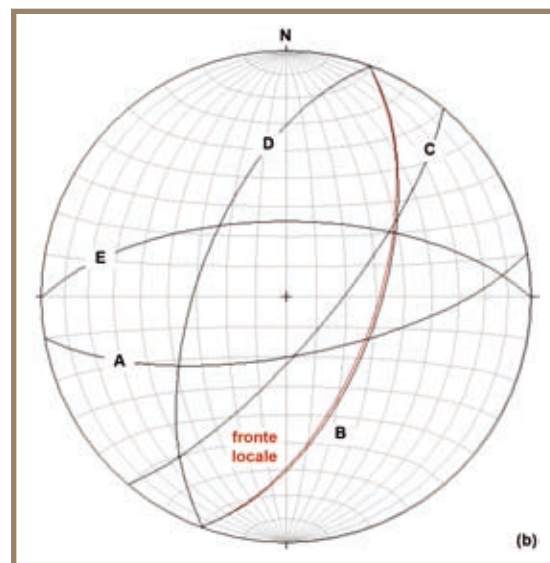
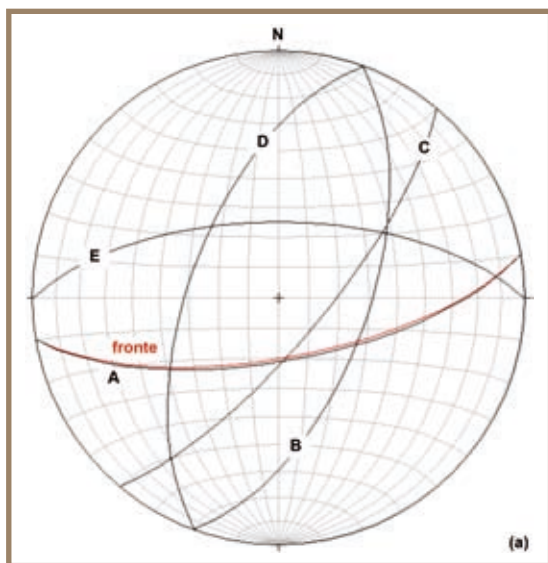
I valori medi delle giaciture dei piani di discontinuità e del fronte sono state inserite negli stereogrammi riportati nelle **figure 2.7.39 a e 2.7.39 b**, con riferimento al fronte medio ed al fronte locale rispettivamente.

Con la rappresentazione stereografica è stata condotta l'analisi cinematica. I potenziali cinematismi rilevati in sito risultano essere i seguenti:

- scivolamento planare sul piano A, con possibile giunto di trazione il piano B, riferito alla giacitura media del fronte. La direzione di scivolamento è pari alla giacitura del piano A;

Figura 2.7.39

Stereogrammi relativi all'area omogenea 66: (a) fronte medio, (b) fronte locale



- scivolamento planare sul piano B, con possibile giunto di trazione il piano D, riferito alla giacitura locale del fronte. La direzione di scivolamento è pari alla giacitura del piano B;
- ribaltamento di blocchi di forma prismatica con piano di base A e giunto E.

Dall'osservazione dello stereogramma è inoltre emerso un ulteriore cinematismo:

- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani D e C, riferito al fronte medio. La direzione media di scivolamento (retta di intersezione) ha immersione $\alpha = 214^\circ$ ed inclinazione $\psi = 22^\circ$.

Per quanto riguarda le altre aree omogenee individuate lungo la valle di Viù si rimanda alle schede contenute nel DVD allegato.

Analisi di stabilità

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

Al termine della fase di analisi cinematica, mediante l'applicazione dei programmi di calcolo meccanico-probabilistici PlaSMon (Pisani, 2005), Wintam (Major *et al.*, 1974) e Toppling Stones (Allodi e Castelli, 2007), è possibile determinare la probabilità di rottura per ogni cinematismo evidenziato. A tal fine è necessario (come illustrato nel paragrafo 2.4.4 e nei manuali di ciascun programma riportati nel DVD in allegato) compilare un file di *input* per ciascun cinematismo analizzato, all'interno del quale sono specificate le caratteristiche geometriche e meccaniche del cinematismo stesso e le relative distribuzioni di frequenza.

Non avendo a disposizione alcun dato sulle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso, in particolare i parametri di resistenza delle discontinuità in sito, si è deciso, sulla base di esperienze precedentemente sviluppate per altri siti, dei litotipi presenti e di indagini storiche (Occhiena, 2007), di considerare un angolo d'attrito del materiale roccioso $\varphi = 30^\circ$ ed una coesione $c = 0$. La scelta di considerare nulla la coesione è da considerarsi a favore di sicurezza, poiché si trascurano i possibili contributi di eventuali ponti di roccia presenti all'interno delle discontinuità. Nessuna variabilità statistica viene considerata nel progetto per questi parametri.

Andando ad analizzare una zona geografica relativamente ampia e un numero di cinematismi notevole, non si è potuto compiere alcuna considerazione sulla presenza dell'acqua all'interno delle discontinuità; per questo motivo si è scelto di condurre le simulazioni in condizioni drenate, ovvero in assenza di acqua in pressione.

Per quanto riguarda le dimensioni dei blocchi potenzialmente instabili, dove indicato vengono assunti i valori medi forniti dal rilievo di terreno; nel caso in cui il cinematismo non sia stato osservato in sito vengono invece considerate dimensioni unitarie (fittizie). È necessario notare che, a causa delle semplificazioni geometriche e meccaniche introdotte nel progetto (discontinuità piane, assenza di coesione e di forze esterne ecc.), nel caso di potenziali instabilità per scivolamento la geometria dei blocchi non influisce sui fattori di sicurezza ma solo sui volumi calcolati per ciascuna estrazione di Monte Carlo. Per questo motivo i volumi indicati nella **tabella 2.7.12** hanno una validità limitata nel caso in cui il cinematismo non sia stato rilevato. Nel caso di cinematismi per ribaltamento invece la geometria del blocco è fondamentale per il calcolo del fattore di sicurezza, motivo per cui vengono presi in conto unicamente quelli segnalati dal rilievo.

Gli unici parametri forniti in senso statistico sono quelli relativi alla giacitura dei piani coinvolti in ciascun cinematismo. Ad essi viene associata una distribuzione di frequenza uniforme corrispondente all'intervallo di variazione fornito dal rilievo speditivo. Questo significa che qualsiasi valore compreso tra il minimo ed il massimo valore della distribuzione ha la stessa probabilità di essere estratto nel corso delle simulazioni di Monte Carlo. Questa forte semplificazione è legata al grado di dettaglio con cui vengono forniti i dati dal rilievo di terreno, come specificato al paragrafo 2.4.4.

Per ciascun cinematismo sono state effettuate 1 000 estrazioni di Monte Carlo. I risultati delle analisi svolte sono schematizzati nella **tabella 2.7.12**, in termini di fattore di sicurezza (F_S) minimo, medio e massimo, volume minimo e massimo (con le limitazioni specificate sopra), numero di casi staticamente e cinematicamente possibili (si veda il paragrafo 2.4.3), probabilità di rottura (P_f) calcolata con riferimento ai soli casi possibili e probabilità di rottura (P_f) calcolata con riferimento alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo. Si ricorda che nelle successive fasi del progetto PROVIALP si fa riferimento a quest'ultimo valore di P_f al fine di tenere conto nel risultato probabilistico del fatto che alcune combinazioni dei parametri non portino a definire volumi potenzialmente instabili all'interno dell'area omogenea.

Cinematismo		F_S (-)			Volume (m ³)		Casi possibili	P_f -possibili (%)	P_f (%)
tipo	discontinuità	min	med	max	min	max			
planare	A-B (f.m.)	0.10	0.25	0.33	1.26*10 ⁻⁴	1.88*10 ⁻¹	375	100	37.50
planare	B-D (f.l.)	0.16	0.41	0.58	2.63*10 ⁻⁴	0.34	375	100	37.50
ribaltamento	A-E	0.21	0.27	0.38	4.47	10.23	305	100	30.50
cuneo	C-D	0.59	5.22	49.57	5.74*10 ⁻⁵	7.01	686	1.90	1.30

Tabella 2.7.12 Risultati delle analisi svolte per l'area omogenea n°66

In figura 2.7.40 si riportano infine gli istogrammi rappresentanti la distribuzione relativa dei fattori di sicurezza campionati per ciascun cinematismo analizzato.

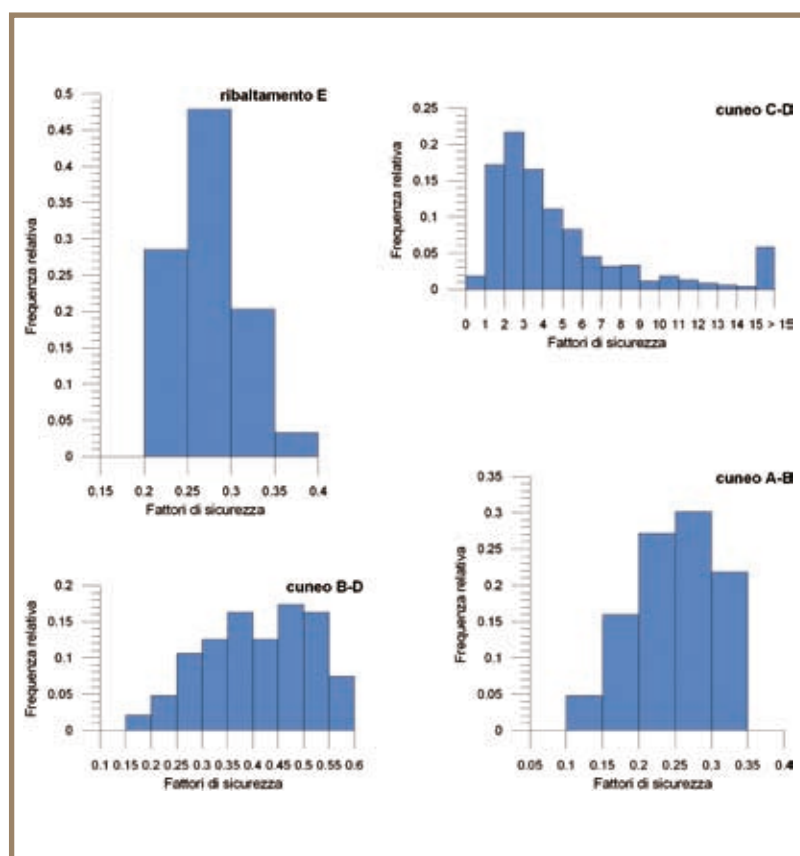


Figura 2.7.40 Istogrammi di frequenza relativa dei fattori di sicurezza calcolati nell' area omogenea n°66

Dall'analisi dei risultati emerge che:

- per lo scivolamento planare coinvolgente i piani A e B e la giacitura media del fronte, tutti i 375 casi possibili campionati sono risultati instabili ($F_S < 1$), con valore medio di $F_S = 0.25$. P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili risulta perciò pari al 100%, mentre essa si riduce al 37.50% se rapportata alla totalità delle estrazioni di Monte Carlo effettuate;
- analoghe considerazioni si applicano allo scivolamento planare coinvolgente i piani B e D e la giacitura locale del fronte: tutti i 375 casi possibili campionati sono risultati instabili ($F_S < 1$), con valore medio di $F_S = 0.41$. P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili risulta perciò pari al 100%, mentre essa si riduce al 37.50% se rapportata alla totalità delle estrazioni di Monte Carlo effettuate;
- per il ribaltamento di blocchi formati dai piani A ed E, i cinematismi possibili sono risultati 305, tutti instabili. Anche in questo caso, perciò, P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili risulta pari al 100%, mentre essa si riduce al 37.50% se rapportata alla totalità delle estrazioni di Monte Carlo effettuate;
- per lo scivolamento a cuneo coinvolgente i piani D e C e la giacitura media del fronte, a causa della bassa inclinazione della retta d'intersezione, dei 686 casi possibili campionati, solo 13 sono risultati instabili, pari al 1.90%, che corrisponde a P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili. Rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo si ottiene P_f ridotta al 1.30%. In questo caso i fattori di sicurezza calcolati sono risultati piuttosto alti, ed in alcuni casi il cinematismo è stato considerato staticamente impossibile ($F_S > 50$). Il valore medio di F_S calcolato è pari a 5.22.

In sintesi nell'ambito dei cinematismi presenti all'interno di quest'area omogenea è stato calcolato:

- F_S minimo pari a 0.10, calcolato per lo scivolamento planare sul piano A rispetto al fronte medio;
- F_S massimo pari a 49.572, calcolato per il cuneo formato dai piani D e C rispetto al fronte medio (si

- ricorda che il codice WINTAM considera staticamente impossibili i cinematismi a cuneo con $F_S > 50$;
- P_f minima pari a 1.30%, calcolata per il cuneo formato dai piani D e C;
 - P_f massima pari a 37.50%, calcolata per entrambi gli scivolamenti planari.

Si rimanda al file contenuto nel DVD allegato per la consultazione della tabella generale recante i risultati delle analisi estese a tutti i cinematismi rilevati nell'intera valle di Viù.

Analisi di *run out*

Luca Mallen - Arpa Piemonte

Ultimate le analisi di stabilità e stimata una probabilità di rottura per ogni cinematismo identificato, si è proceduto alle analisi di *run out*.

Mediante l'utilizzo del software ROTOMAP GIS® è stata simulata una serie di crolli aventi origine dalle aree omogenee individuate durante i rilievi speditivi di terreno.

L'applicativo prevede l'inserimento di una serie di parametri di *input* relativi principalmente al modello digitale di terreno utilizzato, ai coefficienti di restituzione normale, tangenziale e al coefficiente di attrito, nonché agli angoli limite di urto, rimbalzo e decollo, al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari.

Il DTM utilizzato è a maglia 10 m e rappresenta un buon compromesso tra l'esigenza di avere un modello digitale che descriva nel modo più accurato possibile la morfologia dei versanti e la capacità di calcolo delle macchine che devono elaborare i dati, trattandosi di un'analisi arealmente molto estesa.

I coefficienti di restituzione utilizzati sono stati inizialmente ricavati dalla letteratura e successivamente adattati ai dati a nostra disposizione mediante operazioni di *back analysis* e sulla base di esperienze fatte in passato con studi simili in zone alpine.

Per quanto riguarda gli angoli limite di decollo, urto e rimbalzo si è optato per utilizzare una terna di angoli compresa nel range proposto dalla letteratura, ovvero tra 9° e 12° (valori peraltro già impostati come *default* negli esempi contenuti all'interno della guida dell'applicativo).

Per la scelta dei parametri relativi al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari infine, si è optato per la simulazione del distacco di un masso per ogni cella appartenente ad una determinata area omogenea, senza deviazioni angolari, dal momento che le aree omogenee di partenza sono spesso arealmente piuttosto estese, e quindi in grado di garantire la variabilità necessaria per una corretta stima dei valori energetici.

Ultimate le elaborazioni, l'applicativo restituisce una serie di grid relativi all'energia cinetica (media e massima), ai punti di arresto dei massi, alle altezze di volo e all'indice di suscettibilità.

Dalle elaborazioni svolte, in primo luogo si evidenzia come la SP 32, che corre lungo il fondovalle, sia fortemente interessata da potenziali fenomeni di crollo. L'analisi dei punti di arresto infatti, mostra come dalla maggior parte delle aree omogenee di distacco (caratterizzate da indice di distacco $I_D > 0$) si potrebbero staccare dei blocchi in grado di raggiungere ed attraversare la sede stradale. Fa eccezione il tratto compreso tra gli abitati di Usseglio e Piazzette, in cui il fondovalle si apre e la strada si trova ad una maggiore distanza dai versanti.

È importante ricordare che le zone del fondovalle prive di copertura dell'indice di suscettibilità possono avere significati diversi ed opposti. Esse possono indicare per esempio zone sottostanti aree omogenee di tipo 1 o 2 che non hanno dato evidenza di potenziali instabilità ($I_D = 0$), oppure zone sottostanti aree di tipo 3, riconosciute come potenzialmente instabili ma per le quali non è stato possibile condurre alcun rilievo di terreno, o ancora zone del versante su cui non è stato possibile avere alcuna informazione (per esempio perché coperte da vegetazione o troppo lontane dal punto di osservazione).

Al fine di evitare errori di interpretazione nella lettura delle carte prodotte, sono state perciò indicate sempre le aree omogenee di potenziale distacco, specificando la loro tipologia. Se esse non sono presenti o se si tratta di aree di tipo 3, nessuna considerazione può essere fatta sulla suscettibilità del fondovalle e della strada.

Per quanto riguarda la distribuzione dell'energia cinetica massima, i valori più alti si riscontrano in prossimità dell'abitato di Saletta ($> 2\ 800$ J/kg), e provengono dall'area 76. Valori piuttosto elevati ($> 2\ 000$ J/kg) provengono inoltre dalle aree 69, 75, 77 e 80, nella zona compresa tra gli abitati di Usseglio e Lemie (**figura 2.7.41**).

Figura 2.7.41 Distribuzione dell'energia cinetica massima relativa all'area omogenea 76. In rosso i valori energetici più alti

Per ciò che concerne infine l'indice di suscettività I_s , il parametro maggiormente significativo in quanto tiene conto del numero di cinematismi possibili in ogni area di distacco, della loro probabilità di rottura e delle volumetrie dei massi coinvolti, è possibile notare come questo assuma i valori più elevati lungo il tratto rilevato ubicato tra gli abitati di Usseglio e Lemie, facendo registrare i valori maggiori in corrispondenza del

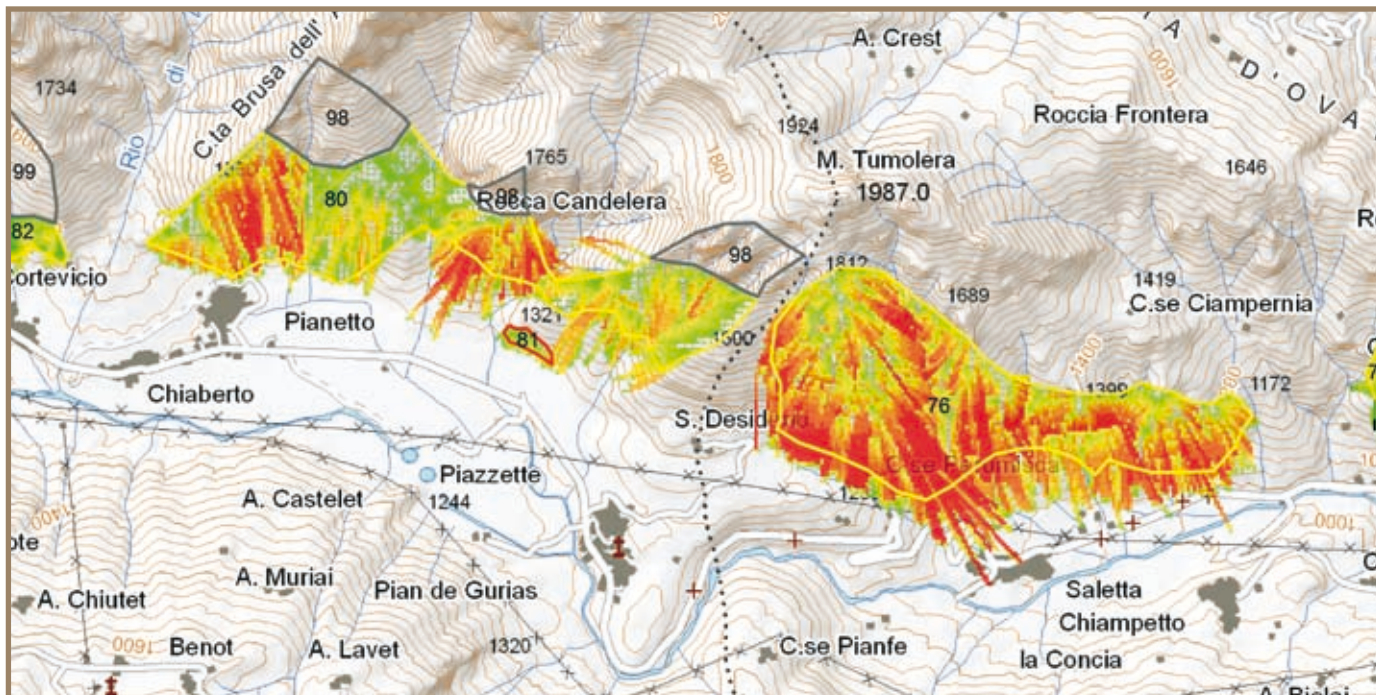


Figura 2.7.42 Distribuzione dell'indice di suscettività relativo alle aree omogenee ubicate in prossimità dell'abitato di Lemie. In rosso i valori più alti

settori di versante sottostanti le aree omogenee 69, 76 e 80, mentre nella parte bassa della valle assume valori tendenzialmente più modesti (figura 2.7.42).

Nella valle di Viù, le distribuzioni dell'energia massima e della suscettività sembrano evidenziare una correlazione molto marcata, in quanto ad alti valori della prima corrispondono sempre valori elevati della seconda.



2.7.4 VALLE SUSA

Inquadramento geografico e geologico

Claudia Borgarello - Arpa Piemonte

I siti in esame ricadono all'interno dell'alta valle di Susa, il settore altimetricamente più elevato del bacino della Dora Riparia che va dall'attuale spartiacque alpino fino alla piana di Oulx-Salbertrand (**figura 2.7.43**).

L'orientazione più frequente e persistente degli elementi idrografici e orografici è la direzione NE-SW; l'elevato grado di incisione di numerosi tratti della valle testimonia il forte approfondimento erosionale registrato soprattutto lungo le suddette direttrici: questo fenomeno esercita un importante controllo anche sull'andamento dell'attuale spartiacque alpino, che proprio nel settore segusino si incunea profondamente verso ovest, cioè verso l'esterno della catena.

Chiarissime sono le tracce del modellamento glaciale pleistocenico legate all'ultima fase di massima espansione in cui il ghiaccio della valle di Susa ha raggiunto lo sbocco in pianura. L'evoluzione morfologica post-glaciale è caratterizzata da imponenti manifestazioni legate alla dinamica fluviale e torrentizia, al dilavamento dei versanti e alla gravità. Gli ampi settori di fondo valle tra cui la piana di Oulx-Salbertrand

rappresentano i settori di maggiore sedimentazione da parte dei corsi d'acqua principali, i cui depositi si interdigitano con gli imponenti conoidi alimentati dai bacini tributari.

Dal punto di vista geologico, le aree in esame ricadono all'interno del nuovo Foglio Geologico Bardonecchia a scala 1:50 000 (eccezion fatta per il sito di Cesana che si trova sul Foglio Cesana Torinese, non ancora disponibile). È possibile, perciò, dare, dei vari siti, un'adeguata descrizione geologica che influenza anche la risposta dei vari versanti all'azione gravitativa e glaciale cui sono stati sottoposti nel tempo (**figura 2.7.44**).

Siti di Baume e Portetta (comune di Oulx)

I siti sono localizzati in sinistra orografica della Dora Riparia, oltrepassato il ponte sulla stessa in corrispondenza del centro di Oulx. Si tratta di una frazione isolata (Baume) posta immediatamente sopra la SS 24 e di una cascina isolata (Cascina Protetta) posta circa 0.5 km più a monte.



Fig.2.7.43 Rappresentazione geografica dei siti indagati nell'alta valle di Susa (figura non in scala)

Sono localizzati a valle di una parete impostata nella copertura mesozoica del Massiccio d'Ambin. Si tratta di quarziti (Quarziti del Rio Segurét) di colore bianco-verdastro e ad alterazione bianco-giallastra che presentano un fabric massiccio ed una composizione prevalentemente quarzosa con sporadica mica. La grana della roccia è fine ed è omogenea, la mica chiara si concentra soprattutto lungo i piani delimitanti le bancate. Lo spessore di questi metasedimenti è molto variabile sebbene la potenza maggiore (circa 250 m) si riscontri proprio nei pressi di Baume manifestata da bancate molto regolari. Al di sopra delle quarziti affiora una lunga e stretta fascia di marmi (Marmi di Exilles) potenti pochi metri e costituiti da marmi grigi a patina chiara in livelli di potenza metrica contenenti localmente livelli di micascisti quarzosi.

In corrispondenza della cima della cresta è presente un sovrascorrimento a direzione NE-SW e immergente verso NW probabilmente responsabile dell'elevato grado di fratturazione della roccia.

Sito del Melezet (Bardonecchia)

Il sito è rappresentato dalla parete che si sviluppa in sinistra orografica lungo la valle Stretta in corrispondenza della frazione Melezet.

Figura 2.7.44 Geologia dei siti della valle di Susa - Estratti da Carta Geologica d'Italia a scala 1:50 000 (siti A e B) e da Carta Geologica d'Italia a scala 1:100 000 (sito C). La legenda si riferisce solo alle scritte presenti nel riquadro rosso.

Legenda

QSE (rosa): quarziti massicce, listate; MEX (verde): marmi grigi con livelli di breccie ad elementi di marmi, dolomie e subordinati micascisti; UIDa1: depositi eterogenei ed eterometrici organizzati in accumuli gravitativi. B: sito del Melezet (Bardonecchia) - Legenda: DCB: dolomie stratificate grigie; CLW: successione carbonatico-scistosa indifferenziata; CBL: calcari nodulari e dolomie, filladi e scisti calcarei; UIDa: depositi eterogenei organizzati in detrito di falda. C: sito di Cesana - Legenda: t2-4 (rosa): dolomie chiare con livelli argillosi; σ (verde): serpentine



La parete in esame è costituita principalmente dalle Dolomie dello Chaberton, unità di margine continentale rappresentata da una successione ciclica di banchi di spessore da decimetrico a metrico di dolomie grigio scure alla base e di dolomie chiare all'apice. Frequentemente i banchi sono separati da sottili interstrati pelitici grigi o neri. Nella parte alta della successione questi possono formare livelli potenti alcuni centimetri e riempire anche fratture da disseccamento formate al tetto dei banchi dolomitici. Sono frequenti anche locali corpi di breccie. Nella parte più a nord la parete è costituita da un'alternanza di argilloscisti più o meno carbonatici, calcari talora nodulari e dolomie che segnano il passaggio al Complesso di Les Arbours costituito da un complesso di calcescisti al cui interno, nella zona in esame, sono state rinvenute breccie a cemento carbonatico a clasti calcareo-dolomitici e silicei (quarziti, micascisti) in corpi lenticolari potenti 2-3 m.

Sito di Cesana

Il sito è rappresentato dalla parete che si sviluppa a monte dei due tornanti che conducono alle gallerie sotto lo Chaberton e al confine francese. Attualmente l'area è sede di un cantiere dell'ANAS per la costruzione di una variante stradale che permetta il superamento della stretta valliva che sale alla frontiera. La parete in esame è costituita da dolomie chiare, da bianche a giallognole a grana fine, strutturate in grossi banchi con sottili interstrati argillosi varicolori associate a calcari cristallini tabulari a volte micacei. La zona è sede di sistemi di fratture di importanza regionale ad andamento circa N-S.

Ricerca storica

Claudia Borgarello - Arpa Piemonte

Le testimonianze storiche e le evidenze morfologiche indicano che nel territorio della valle di Susa il proble-

Comune	Località	Data	Descrizione
Cesana			Non sono state evidenziate informazioni che si riferissero nel dettaglio all'area in esame. La zona nel suo complesso (tra l'uscita del paese e il comune di Claviere) è stata spesso coinvolta in fenomeni di vario tipo a causa della presenza del passaggio litologico e tettonico tra il complesso dei Calcescisti e le dolomie e calcari mesozoici
Bardonecchia	Melezet	10 ottobre 1970	Crollo di alcuni blocchi dalle pareti del Rottas. Si tratta di dolomie e calcari dolomitici al cui interno sono presenti livelli argilloso-scistosi potenti circa 40 cm su cui poggiano i suddetti banchi. Una parte dei blocchi, per un volume complessivo di 8-9 m ³ , è scivolata lungo la parete arrestandosi ai suoi piedi in equilibrio instabile; altri blocchi, seguendo traiettorie diverse, si sono arrestati poco più a valle, mentre alcuni blocchi, con volume variabile tra 0.5-1 m ³ , nel rotolamento hanno acquistato velocità e, dopo aver abbattuto alberi anche con diametro di 0.35 m, sono giunti in prossimità della strada. Un paio di blocchi, deviati dalla linea di massima pendenza, hanno scavalcato la strada nel punto in cui questa si presenta sopraelevata di un metro. La forma prevalente dei blocchi giunti sul fondovalle è poliedrica, cubica, talora prismatica appiattita. Si consiglia di eliminare o vincolare i massi in equilibrio precario e di realizzare un vallo per proteggere la strada
Bardonecchia	Melezet	6 giugno 1991	Distacco di alcuni massi del volume di circa 0.5 m ³ dalla parete lungo il versante sinistro di fronte all'Hotel Imperia. I massi, rotolando, hanno raggiunto la sede stradale e l'area verde dell'albergo. Esiste un pericolo imminente per l'albergo in quanto i crolli in questo settore sono di frequenza pressoché annuale. Esiste un progetto per la costruzione di due valli e di una rete paramassi

Tabella 2.7.13

Sintesi dell'analisi storica delle informazioni relative al dissesto lungo i versanti in valle di Susa

ma della pericolosità da caduta massi costituisce una situazione d'incombente rischio per le infrastrutture e i numerosi insediamenti presenti. Data l'estensione della valle, la ricerca è stata limitata ai comuni al cui interno si collocano le aree di interesse.

Per la raccolta dei dati storici si è utilizzata principalmente la Banca Dati di Arpa Piemonte che censisce le informazioni sugli effetti morfologici e sui danni, indotti da fenomeni di instabilità naturale nei comuni oggetto di interesse.

Rilievi di terreno

Claudia Borgarello - Arpa Piemonte

Poiché i siti esaminati sono tutti molto distanti tra loro, non è stato possibile fare un confronto generale delle caratteristiche strutturali degli ammassi rocciosi esaminati. Ciascun sito fa, dunque, storia a sé e verranno descritti esclusivamente la parete che lo costituisce e l'immediato intorno.

Siti di Baume e Portetta (Oulx)

La parete presenta un assetto strutturale molto disarticolato che ha portato all'individuazione di 7 sistemi di discontinuità principali. Il litotipo prevalente (marmi) e l'assetto strutturale (presenza di un sovrascorriente di importanza regionale) sono le cause primarie della fratturazione, agevolata dall'elevata inclinazione del versante e dalla presenza di fratture fortemente aperte e dilavate dal loro riempimento.

I cinematismi rilevati sono principalmente a cuneo, di dimensioni medie inferiori a 5 m³. Data la natura litologica della parete, non si esclude che l'innesco di alcuni cinematismi possa portare ad un maggiore coinvolgimento in volume della massa rocciosa.

Sito del Melezet (Bardonecchia)

La parete presenta un aspetto strutturale diversificato a seconda che si consideri la parte bassa della stessa, in corrispondenza del termine del nuovo vallo che è stato realizzato, oppure la parte alta al di sopra della vegetazione. La prima porzione di parete presenta un aspetto abbastanza omogeneo caratterizzato da due sistemi che immergono verso WNW a formare bancate potenti anche 1 m, raramente intervallati da sistemi che immergono nella direzione opposta. La porzione più a monte appare, invece, più disarticolata con la presenza di 6 famiglie di discontinuità che originano principalmente scivolamenti a cuneo. La persistenza, più regolare nel tratto meridionale (3-5 m), si presenta con valori maggiormente dispersi nella parte settentrionale, grazie anche alla morfologia ondulata del versante e alla presenza della vegetazione.

Segni di un crollo recente (2000) sono ben visibili lungo la parte centrale della parete (**figura 2.7.45**)



Figura 2.7.45 Esempio di parete in cui sono evidenziati alcuni dei piani di discontinuità rilevati. Al centro della figura è visibile la nicchia del crollo avvenuto nel 2000 nonché i piani di frattura ancora freschi

Analisi cinematica tramite stereogrammi

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

In questo paragrafo è descritto l'iter seguito per l'individuazione dei potenziali cinematismi (analisi cinematica) all'interno delle aree omogenee di tipo 1 o di tipo 2 in cui sono stati suddivisi i versanti analizzati in valle di Susa. Al fine di illustrare la procedura seguita ed i risultati ottenuti, viene riportato un esempio corrispondente ad un'area omogenea significativa; si rimanda al materiale contenuto nel DVD allegato al presente lavoro, per consultare i dati relativi all'intera valle.

A partire dai risultati del rilievo speditivo di terreno, per ciascuna area omogenea l'analisi cinematica consiste in:

1. rappresentazione stereografica equatoriale della giacitura media del fronte e delle discontinuità presenti;
2. individuazione e verifica dei potenziali cinematismi osservati in sito, cioè verifica che la giacitura delle discontinuità rispetti le condizioni cinematiche per l'instabilità illustrate al paragrafo 2.4.2 (figura 2.4.1);
3. individuazione di eventuali ulteriori cinematismi, possibili dal punto di vista geometrico ma non indicati dal rilievo.

Nel caso delle 4 aree omogenee analizzate in valle di Susa, mediante il rilievo speditivo di terreno sono stati rilevati 17 potenziali cinematismi, di cui 2 scivolamenti planari e 15 scivolamenti a cuneo. In seguito all'analisi cinematica condotta sulle rappresentazioni stereografiche, si sono verificati i cinematismi osservati in sito e si è aggiunto un potenziale scivolamento planare che non era stato rilevato. Le successive analisi di stabilità sono state condotte, per ciascuna area omogenea, sia sui cinematismi osservati in sito sia su quelli individuati

Figura 2.7.46 Parete corrispondente all'area omogenea n° 4, sita in località Melezet



Sito di Cesana

La parete presenta un aspetto molto disarticolato, evidenziato dalla presenza di numerosi cunei e diedri in equilibrio precario e da fratture beanti visibili anche da una certa distanza. L'analisi strutturale ha evidenziato la presenza di 5 sistemi di discontinuità che isolano blocchi di dimensioni anche superiori ai 10 m³. La quasi completa verticalità della parete favorisce i distacchi di blocchi di varie dimensioni che si convogliano in canali ben evidenti che d'inverno rappresentano vie preferenziali per lo sviluppo di valanghe.

Segni di crolli recenti sono ben visibili nelle parti alte di questi canali.

sullo stereogramma, distinguendo gli uni dagli altri ma assegnando lo stesso peso ai risultati. In totale dunque si sono analizzati 18 cinematismi costituiti da 3 scivolamenti planari e 15 scivolamenti a cuneo. A titolo di esempio si riporta in dettaglio il caso dell'area omogenea n° 4, situata in località Melezet. Si tratta di un versante di tipo massivo, formato da rocce intrusive acide, con grado di fratturazione medio e grado di alterazione debole, aventi elevata resistenza.

La figura 2.7.46 mostra una vista panoramica del versante rilevato.

In questa area omogenea l'angolo di immersione (α) del fronte può assumere valori compresi tra un minimo di 80° ed un massimo di 120°, con un valore medio di 100°, mentre l'angolo di inclinazione (ψ)

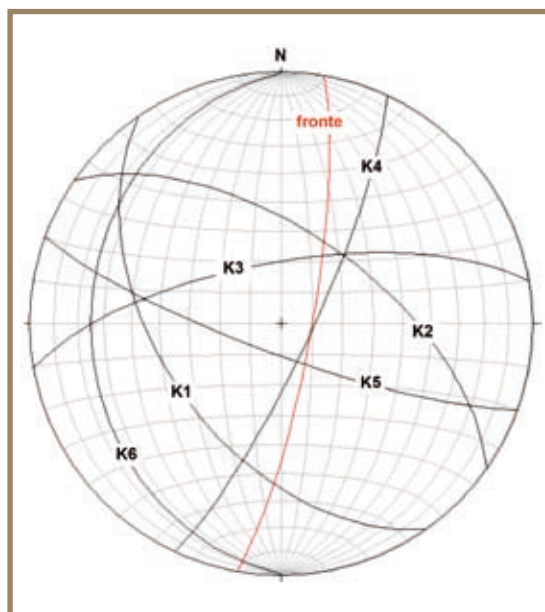
varia tra 60° e 90° , con un valore medio di 80° . Sono state inoltre individuate e misurate in sito 6 famiglie di discontinuità; la **tabella 2.7.14** riporta i valori medi e gli intervalli di variazione delle giaciture misurate. I valori medi delle giaciture dei piani di discontinuità e del fronte sono stati inseriti nello stereogramma riportato in **figura 2.7.47** e con la rappresentazione stereografica è stata condotta l'analisi cinematica.

Tabella 2.7.14 Caratteristiche di giacitura delle famiglie di discontinuità rilevate nell'area omogenea n° 4

Famiglia	Immersione (α)		Inclinazione (ψ)	
	media	variabilità	media	variabilità
K1	235°	$\pm 5^\circ$	50°	$\pm 5^\circ$
K2	35°	$\pm 5^\circ$	60°	$\pm 5^\circ$
K3	350°	$\pm 10^\circ$	70°	$\pm 10^\circ$
K4	115°	$\pm 5^\circ$	80°	$\pm 5^\circ$
K5	200°	$\pm 10^\circ$	80°	$\pm 10^\circ$
K6	270°	$\pm 10^\circ$	25°	$\pm 10^\circ$
fronte	100°	$\pm 20^\circ$	80°	$-20^\circ; + 10^\circ$

I potenziali cinematismi rilevati in sito risultano essere i seguenti:

Figura 2.7.47 Stereogramma relativo all'area omogenea n° 4



- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K2 e K5, con direzione media di scivolamento (retta di intersezione) pari a $\alpha = 113^\circ$, $\psi = 19^\circ$;
- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K2 e K4, con direzione media pari a $\alpha = 43^\circ$, $\psi = 49^\circ$;
- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K3 e K4, con direzione media pari a $\alpha = 41^\circ$, $\psi = 60^\circ$;
- scivolamento planare sul piano K4, con direzione di scivolamento pari alla giacitura del piano.

Dall'osservazione dello stereogramma non sono emersi ulteriori cinematismi.

Per quanto riguarda i dettagli delle altre aree omogenee rilevate in valle di Susa, si rimanda alle schede contenute nel DVD allegato.

Analisi di stabilità

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

Al termine della fase di analisi cinematica, mediante l'applicazione dei programmi di calcolo meccanico-probabilistici PlaSMon (Pisani, 2005), Wintam (Major *et al.*, 1974) e Toppling Stones (Allodi e Castelli, 2007), è possibile determinare la probabilità di rottura per ogni cinematismo evidenziato. A tal fine è necessario (come illustrato nel paragrafo 2.4.4 e nei manuali di ciascun programma riportati nel DVD in allegato) compilare un file di *input* per ciascuno, all'interno del quale sono specificati i valori medi delle caratteristiche geometriche e meccaniche del cinematismo stesso e le relative distribuzioni di frequenza.

Non avendo a disposizione alcun dato sulle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso, in particolare i parametri di resistenza delle discontinuità in sito, sulla base dei litotipi presenti e di esperienze precedentemente sviluppate per altri siti simili a quello della valle di Susa, si sono considerati su tutte le superfici di discontinuità un angolo d'attrito costante $\phi = 30^\circ$ e una coesione $c = 0$. Nessuna variabilità statistica viene considerata nel progetto per questi parametri. La scelta di assumere coesione nulla è da considerarsi a favore di sicurezza, poiché si trascura il contributo alla stabilità di eventuali ponti di roccia presenti all'interno delle discontinuità.

Non disponendo di informazioni in proposito, non si è potuto inoltre fare alcuna considerazione sulla presen-

za dell'acqua all'interno delle discontinuità; per questo motivo si è scelto di compiere tutte le simulazioni in condizioni drenate, ovvero in assenza di acqua in pressione.

Per quanto riguarda le dimensioni dei blocchi potenzialmente instabili, dove indicato vengono assunti i valori medi forniti dal rilievo di terreno; nel caso in cui il cinematismo non sia stato osservato in sito vengono invece considerate dimensioni unitarie (fittizie). È necessario notare che, a causa delle semplificazioni geometriche e meccaniche introdotte nel progetto (discontinuità piane, assenza di coesione e di forze esterne ecc.), nel caso di potenziali instabilità per scivolamento, come quelle analizzate nella valle di Susa, la geometria dei blocchi non influisce sui fattori di sicurezza ma solo sui volumi calcolati per ciascuna estrazione di Monte Carlo. Per questo motivo i volumi indicati nella **tabella 2.7.11** hanno una validità limitata nel caso in cui il cinematismo non sia stato rilevato.

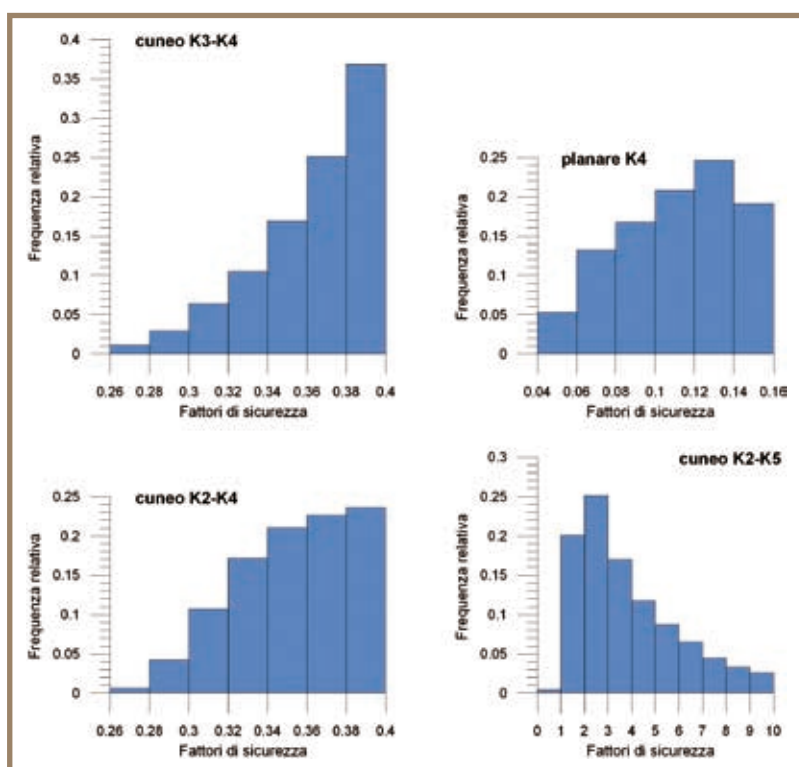
Gli unici parametri forniti in senso statistico sono quelli relativi alla giacitura dei piani coinvolti in ciascun cinematismo. Ad essi viene associata una distribuzione di frequenza uniforme corrispondente all'intervallo di variazione fornito dal rilievo speditivo. Questo significa che qualsiasi valore compreso tra il minimo ed il massimo valore della distribuzione ha la stessa probabilità di essere estratto nel corso delle simulazioni di Monte Carlo. Questa forte semplificazione è legata al grado di dettaglio con cui vengono forniti i dati dal rilievo di terreno, come specificato al paragrafo 2.4.4.

Nel caso della valle di Susa, dato l'esiguo numero di cinematismi considerati e al fine di ottimizzare i risultati, le analisi probabilistiche sono state condotte con riferimento a 10 000 estrazioni di Monte Carlo. I risultati ottenuti per l'area omogenea 4 sono schematizzati, a titolo di esempio, nella **tabella 2.7.15**, in

Tabella 2.7.15 Risultati delle analisi svolte per l'area omogenea n°4

Cinematismo	F_s (-)	Volume (m ³)		Casi possibili	P_f possibili (%)	P_f (%)			
		min	max						
cuneo	K2-K5	1.700	6.133	49.154	0.164	2 598.545	9 952	0	0
cuneo	K2-K4	0.271	0.375	0.499	2.9*10 ⁻⁷	3 526.01	5 589	100	55.89
cuneo	K3-K4	0.262	0.707	1.311	2*10 ⁻⁹	3 527.107	5 689	92.72	52.75
planare	K4	0.0506	0.111	0.155	1.2*10 ⁻⁴	1.14	2 066	100	20.66

Figura 2.7.48 Istogrammi di frequenza relativa dei fattori di sicurezza calcolati nell'area omogenea n°4



termini di fattore di sicurezza (F_s) minimo, medio e massimo, volume minimo e massimo (con le limitazioni specificate sopra per quanto riguarda i cinematismi risultanti unicamente dall'analisi dello stereogramma),

numero di casi staticamente e cinematicamente possibili (si veda il paragrafo 2.4.3), probabilità di rottura (P_f) calcolata con riferimento ai soli casi possibili e probabilità di rottura calcolata con riferimento alle 10 000 estrazioni di Monte Carlo. Si ricorda che nelle successive fasi del progetto PROVIALP si fa riferimento a quest'ultimo valore di P_f al fine di tenere conto nel risultato probabilistico del fatto che alcune combinazioni dei parametri non portino a definire volumi potenzialmente instabili all'interno dell'area omogenea.

In **figura 2.7.48** si riportano infine gli istogrammi rappresentanti la distribuzione relativa dei fattori di sicurezza campionati per ciascun cinematismo analizzato nell'area omogenea n° 4.

Dall'analisi dei risultati emerge che:

- per lo scivolamento planare su K4, tutti i 2 066 casi possibili campionati sono risultati instabili ($F_s < 1$), con valore medio di $F_s = 0.111$. P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possi

- bili risulta perciò pari al 100%, mentre essa si riduce al 20.66% se rapportata alla totalità delle estrazioni di Monte Carlo effettuate;
- per lo scivolamento a cuneo K2-K5, a causa della bassa inclinazione della retta di intersezione, dei 9 952 casi possibili campionati nessuno è risultato instabile, per cui la P_f risulta nulla con riferimento sia ai soli cinematismi possibili, sia alle 10 000 estrazioni di Monte Carlo. I fattori di sicurezza calcolati sono risultati piuttosto alti, con un valore medio pari a 6.133. Tale cinematismo è stato perciò escluso dalle successive analisi;
 - per lo scivolamento a cuneo K2-K4, tutti i 5 589 casi possibili campionati sono risultati instabili ($F_S < 1$), con valore medio di $F_S = 0.375$. P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili risulta perciò pari al 100%, mentre essa si riduce al 55.89% se rapportata alla totalità delle estrazioni di Monte Carlo effettuate;
 - per lo scivolamento a cuneo K3-K4, dei 5 689 casi possibili campionati, 5 275 sono risultati instabili, pari al 92.72%, che corrisponde a P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili. Rapportando il numero di casi instabili alle 10 000 estrazioni di Monte Carlo si ottiene invece P_f ridotta al 92.72%. Il valore medio di F_S è risultato 0.707.

In sintesi per i cinematismi presenti all'interno dell'area omogenea n° 4 è stato calcolato:

- F_S minimo pari a 0.0506, corrispondente allo scivolamento planare su K4;
- F_S massimo pari a 1.31, corrispondente al cuneo formato dai piani K3 e K4;
- P_f minima pari a 20.66%, corrispondente allo scivolamento planare su K4;
- P_f massima pari a 55.89%, corrispondente al cuneo formato dai piani K2 e K4.

Si rimanda al file contenuto nel DVD allegato per la consultazione della tabella generale recante i risultati delle analisi estese a tutti i cinematismi rilevati nella valle di Susa.

Analisi di run out

Luca Mallen - Arpa Piemonte

Ultimate le analisi di stabilità e stimata una probabilità di rottura per ogni cinematismo identificato, si è proceduto alle analisi di *run out*.

Mediante l'utilizzo del software ROTOMAP GIS® è stata simulata una serie di crolli aventi origine dalle aree omogenee individuate durante i rilievi speditivi di terreno.

L'applicativo prevede l'inserimento di una serie di parametri di *input* relativi principalmente al modello digitale di terreno utilizzato, ai coefficienti di restituzione normale, tangenziale e al coefficiente di attrito, nonché agli angoli limite di urto, rimbalzo e decollo, al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari.

Il DTM utilizzato è a maglia 10 m e rappresenta un buon compromesso tra l'esigenza di avere un modello digitale che descriva nel modo più accurato possibile la morfologia dei versanti e la capacità di calcolo delle macchine che devono elaborare i dati, trattandosi di un'analisi arealmente molto estesa.

I coefficienti di restituzione utilizzati sono stati inizialmente ricavati dalla letteratura e successivamente adattati ai dati a nostra disposizione mediante operazioni di *back analysis* e sulla base di esperienze fatte in passato con studi simili in zone alpine.

Per quanto riguarda gli angoli limite di decollo, urto e rimbalzo si è optato per utilizzare una terna di angoli compresa nel range proposto dalla letteratura, ovvero tra 9° e 12° (valori peraltro già impostati come *default* negli esempi contenuti all'interno della guida dell'applicativo).

Per la scelta dei parametri relativi al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari infine, si è optato per la simulazione del distacco di un masso per ogni cella appartenente ad una determinata area omogenea, senza deviazioni angolari, dal momento che le aree omogenee di partenza sono spesso arealmente piuttosto estese, e quindi in grado di garantire la variabilità necessaria per una corretta stima dei valori energetici.

Ultimate le elaborazioni, l'applicativo restituisce una serie di grid relativi all'energia cinetica (media e massima), ai punti di arresto dei massi, alle altezze di volo e all'indice di suscettività.

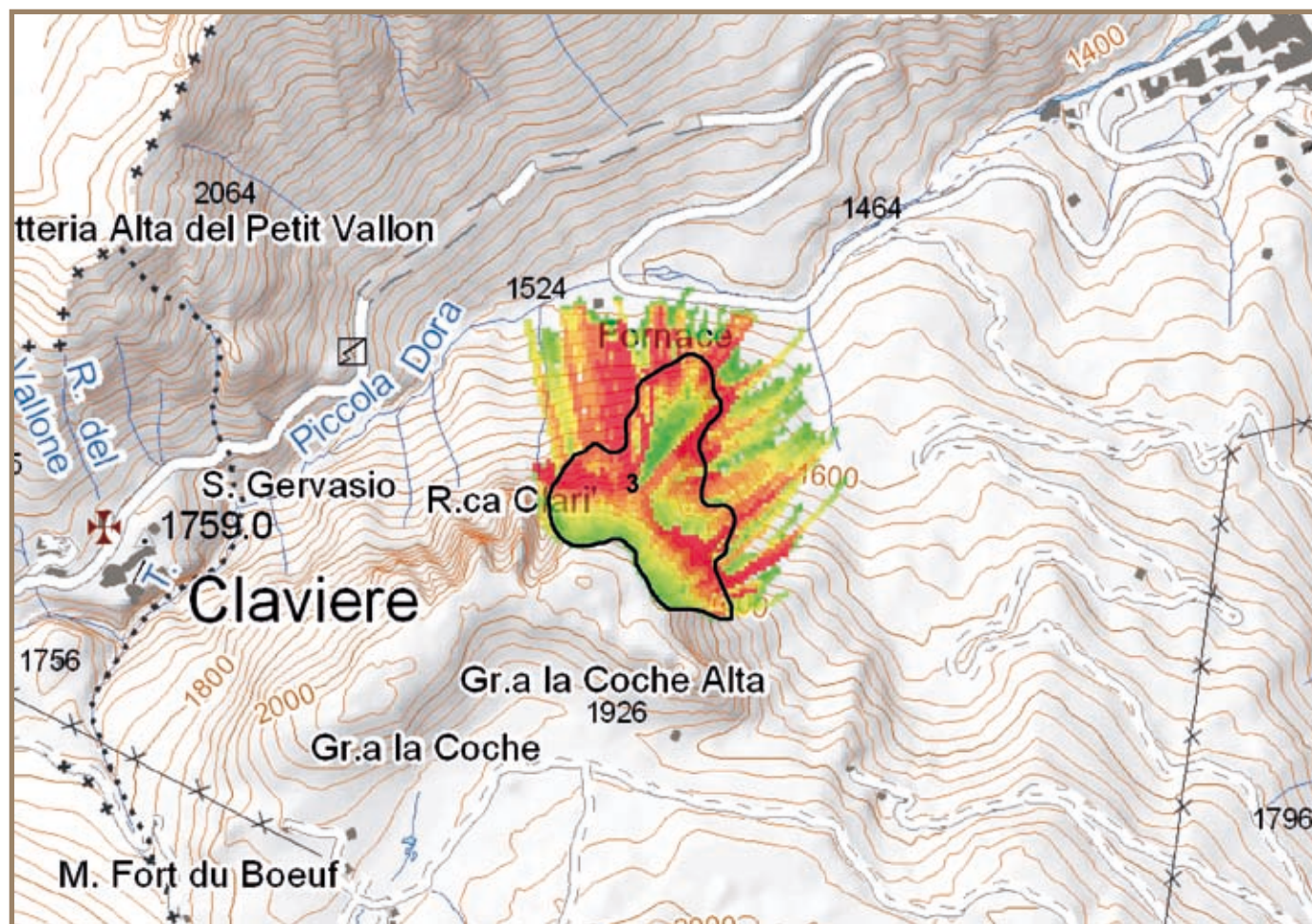
Dalle elaborazioni svolte, in primo luogo si evidenzia come tutte le aree omogenee studiate in questo settore di valle (aventi cioè caratteristiche di idoneità per un'analisi di terreno speditiva e probabilità di rottura > 0), diano luogo a crolli in grado di interessare la rete viaria.

Infatti, i punti di arresto relativi alle aree omogenee 1 e 2 raggiungono la SS 335, quelli relativi all'area omogenea 3 la SS 24 e quelli relativi all'area 4 la strada che da Bardonecchia porta al Pian del Colle. A questo proposito è necessario notare che le zone del fondovalle prive di copertura dell'indice di suscettività possono avere significati diversi ed opposti. Esse possono indicare per esempio zone sottostanti aree omogenee di tipo 1 o 2 che non hanno dato evidenza di potenziali instabilità ($I_D = 0$), oppure zone sottostanti aree di tipo 3, riconosciute come potenzialmente instabili ma per le quali non è stato possibile condurre alcun rilievo di terreno, o ancora zone del versante su cui non è stato possibile avere alcuna informazione (per esempio perché coperte da vegetazione o troppo lontane dal punto di osservazione).

Al fine di evitare errori di interpretazione nella lettura delle carte prodotte, sono state perciò indicate sempre le aree omogenee di potenziale distacco, specificando la loro tipologia. Se esse non sono presenti o se si tratta di aree di tipo 3, nessuna considerazione può essere fatta sulla suscettività del fondovalle e della strada.

Per quanto riguarda la distribuzione dell'energia cinetica massima, i valori più alti si riscontrano poco più a monte di Cesana Torinese (> 2 900 J/kg) provengono dall'area omogenea n° 3 (figura 2.7.49).

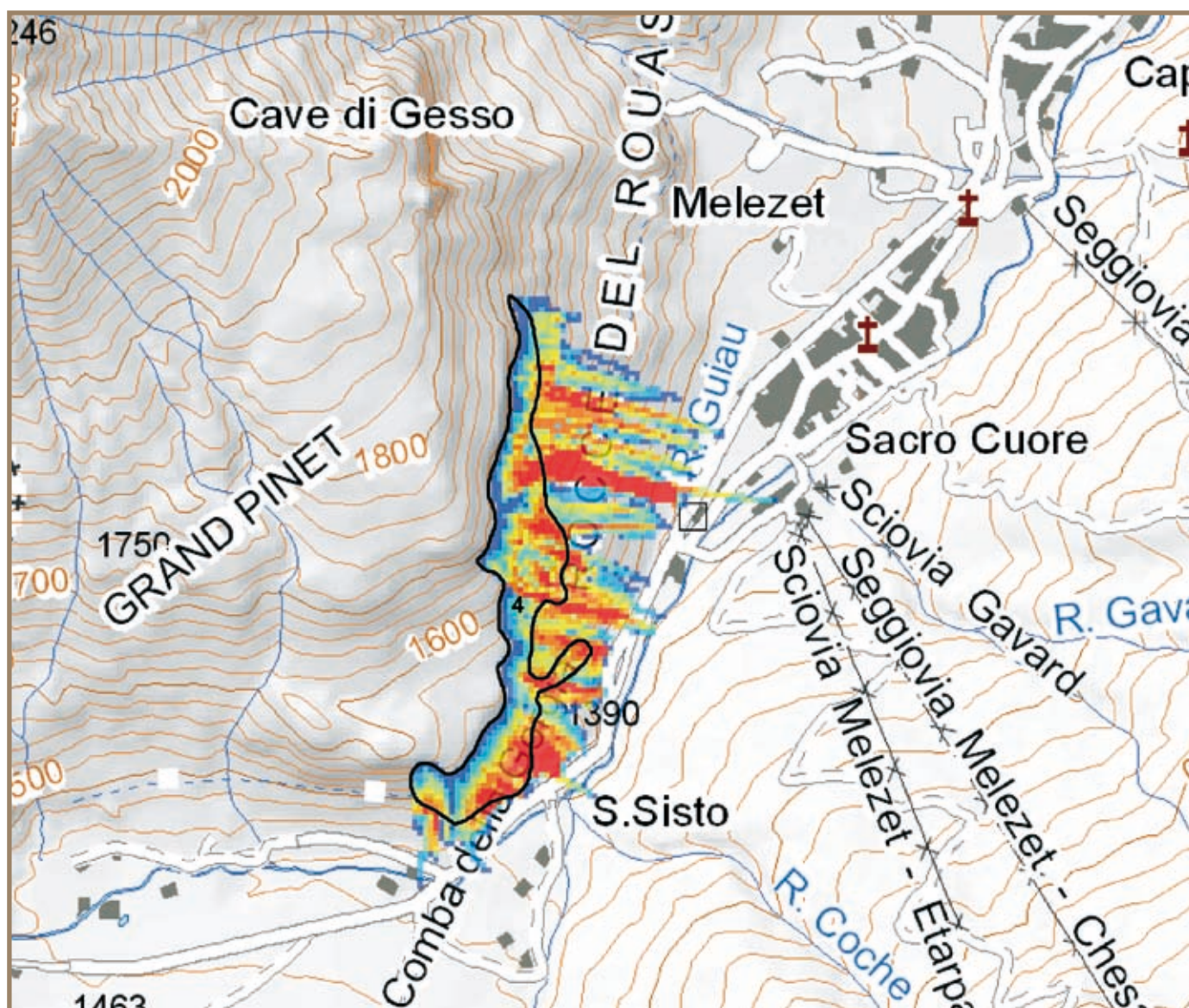
Figura 2.7.49 Distribuzione dell'energia cinetica massima relativa all'area omogenea n° 3. In rosso i valori energetici più alti



Per ciò che concerne infine l'indice di suscettività, il parametro maggiormente significativo in quanto tiene conto sia della probabilità di rottura che delle volumetrie dei massi coinvolti, è possibile notare come questo raggiunga i valori massimi nel tratto di versante immediatamente a monte della frazione Melezet (area omogenea n°4, figura 2.7.50).

Figura 2.7.50 Distribuzione dell'indice di suscettività relativo all'area omogenea n°4. In rosso i valori più alti

Nella porzione studiata della valle di Susa, la distribuzione dell'energia massima e della suscettività sembrano evidenziare una discreta correlazione, in quanto ad alti valori della prima tendenzialmente corrispondono valori elevati della seconda.



2.7.5 VALLE GERMANASCA

Inquadramento geografico e geologico

Luca Lanteri - Arpa Piemonte

La valle Germanasca è situata nelle Alpi Cozie, in provincia di Torino (figura 2.7.51); ne fanno parte, da monte verso valle, i comuni di Prali, Massello, Salza di Pinerolo, Perrero e Pomaretto. Il bacino del torrente Germanasca è caratterizzato da una forma genericamente triangolare ed ha estensione di circa 200 km²; confina verso nord con la valle Chisone, verso sud con la valle Pellice e ad ovest con le valli Troncea e Argentera. L'alta valle è suddivisa in diversi valloni secondari (Massello, Salza, Rodoretto e Prali); dal più meridionale di questi nasce il torrente Germanasca, tributario di destra del torrente Chisone, che percorre l'intera valle fino a Perosa Argentina, con uno sviluppo di circa 18 km.

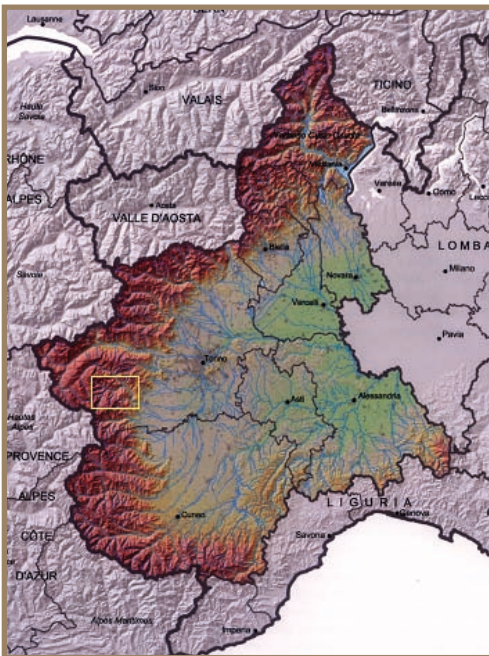


Figura 2.7.51 Localizzazione geografica del bacino della valle Germanasca

La parte medio-bassa del bacino è impostata in rocce appartenenti all'Unità Dora-Maira, porzione di crosta continentale attribuita ai Massicci Cristallini Interni del Dominio Pennidico delle Alpi occidentali, che si estende dal versante sinistro della valle di Susa fino alla valle Maira. L'Unità Dora-Maira, presenta un assetto litostratigrafico assai complesso ed al suo interno si possono distinguere un basamento polimetamorfico di età pre-carbonifera, tettonicamente sovrapposto a successioni monometamorfiche di età presunta carbonifero-permiana (Sandrone et al., 1993). Superiormente a questi due complessi si trovano le successioni autoctone o parautoctone (di età mesozoica) di metasedimenti carbonatico-pelitici, localmente affioranti lungo il margine esterno del Dora-Maira (Pognante, 1980). Più in particolare, Borghi et al. (1985) distinguono, su base litologica, due unità principali tra loro sovrapposte:

- una unità monometamorfica ad affinità brianzonese (affiorante nella parte bassa della valle, da Pomaretto a Perrero) a cui appartengono il Complesso di Pinerolo (micascisti, gneiss minuti gneiss conglomeratici con origine detritica e caratteristica presenza di pigmento grafitico) ed il Complesso di Faetto (micascisti e gneiss minuti con generale assenza di pigmento grafitico). Quest'ultimo costituisce probabilmente la prosecuzione del Complesso di Pinerolo, con il quale non mostra alcuna riconoscibile discontinuità;
- una unità polimetamorfica ad affinità piemontese (affiorante tra Perrero e Massello nel tratto intermedio della valle, e sul versante orografico destro nella parte alta) a cui appartiene il Complesso del Dora Maira, costituito da micascisti a granato e cloritoide con subordinati gneiss minuti e intercalazioni di marmi e metabasiti. Associati ai marmi sono presenti vari orizzonti mineralizzati a talco ancora oggi coltivati.

Nella parte altimetricamente più elevata del bacino, ed in particolare in sinistra orografica, affiorano litotipi ascrivibili alla Zona Piemontese dei Calcescisti con Pietre Verdi, in continuità con l'unità sottostante mediante un importante contatto tettonico (Figura 2.7.52). Tale zona corrisponde ad un grande sistema multifalda, che separa in modo continuo le unità Austroalpine dalle sottostanti falde Pennidiche. A livello paleogeografico viene interpretata come il prodotto della deformazione e del metamorfismo del substrato e dei sedimenti del bacino oceanico piemontese, impostatosi a partire dal Giurassico tra la zolla Paleoeuropea e quella Adriatica. La Zona Piemontese è costituita da metasedimenti di rocce mesozoiche e da metaofioliti, in prevalenza di calcescisti con subordinate prasiniti ed anfiboliti.

L'intero settore compreso tra la valle Pellice e la valle Sangone rappresenta, già dal XVII secolo, un importante centro per l'estrazione del talco; sebbene molte delle vecchie miniere siano state abbandonate, ancor oggi la valle Germanasca rimane l'unica valle in cui è ancora presente un'importante attività estrattiva. Qui, il talco si trova in prossimità della zona di contatto tra l'Unità del Dora Maira e La Zona Piemontese dei Calcescisti con Pietre Verdi in genere associata con marmi, micascisti, gneiss e rare metabasiti (Borghi et al., 1985; Borghi e

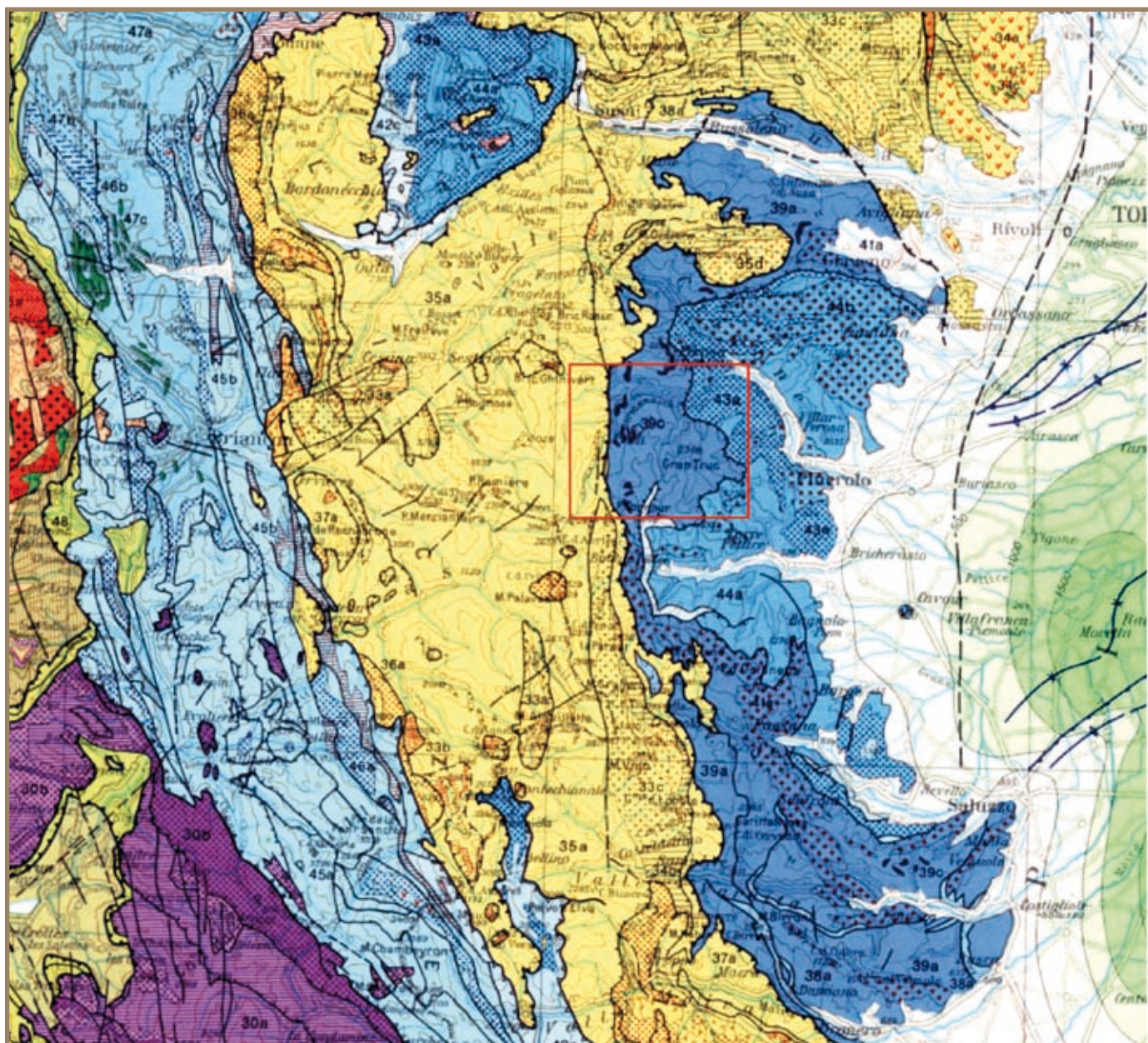


Figura 2.7.52 Stralcio dello Structural Model of Italy scala 1 : 500 000 (CNR, Progetto finalizzato Geodinamica, 1990).

Legenda

Zona Piemontese (Unità indifferenziate dei calcescisti): 35a) calcescisti indifferenziati. Falda Pennidica (Unità Pennidiche Superiori): 39a) micascisti indifferenziati e relitti minori di para-gneiss di HT (rocce di basamento) 39c) marmi associati. Falda Pennidica (Unità Pennidiche Medie): 43a) Scisti metamorfici Carbonifero-Permiani con metaconglomerati e livelli di carboniosi; 44a) micascisti e relitti di para-gneiss di HT con relitti di metabasiti (rocce di basamento). Il box rosso identifica l'area di rilevamento

Sandrone, 1990). La miniera di talco di Fontane è tuttora la più importante in Italia ed una delle più importanti in Europa per l'eccellente qualità del talco estratto, utilizzato principalmente in campo farmaceutico e cosmetico (Cian et al., 1984; Sandrone et al., 1990). In valle, oltre al talco viene cavato anche il Marmo Bianco; attualmente l'unica cava rimasta attiva è quella di Maiera, situata sul fianco destro della valle, a quota 1 930 m.

È importante ricordare che la valle Germanasca è compresa all'interno della più importante zona sismica delle Alpi Occidentali, definita "Zona sismica del Pinerolese", in quanto i maggiori terremoti di cui si abbia notizia storica in Piemonte e le più recenti scosse sismiche rilevate per via strumentale sono concentrati nell'area pedemontana di Pinerolo e nelle valli limitrofe (Provincia di Torino et al., 2004). Il Distretto Sismico del Pinerolese è interessato da una sismicità a bassa magnitudo ($M_I < 4$) con eventi storici di maggiore magnitudo verificatisi a Cumiana ($M_I = 4.8$) nel 1980 e a Prarostino ($M_I = 5.5$) nel 1808.

Ricerca storica

Luca Lanteri - Arpa Piemonte

La ricostruzione del quadro preliminare dei fenomeni di crollo avvenuti in epoca storica di cui si è mantenuta memoria è stata effettuata basandosi principalmente sull'analisi dei seguenti archivi:

- sottosistema "Frane in Piemonte" (SIFraP) del Sistema Informativo Geologico di Arpa Piemonte (SIGeo);
- banca dati della Provincia di Torino: i dati sono stati forniti dal CNR-IRPI (Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nel bacino Padano) nell'ambito dello "Studio della Pianificazione per la messa in sicurezza della viabilità provinciale a difesa dalle catastrofi idrogeologiche", aggiornati al 2001;
- archivio comunale del comune di Perrero;
- archivio della Comunità Montana Valli Chisone e Germanasca.

Da tale analisi emerge senza dubbio un quadro incompleto, che rappresenta una stima parziale dei fenomeni che hanno interessato la valle. Tuttavia, una ricerca di dettaglio delle informazioni di carattere storico richiederebbe una meticolosa analisi di un elevato numero di archivi locali, lavoro che esula dagli scopi del progetto. Inoltre, per molti dei fenomeni di minor rilevanza non viene mantenuta traccia se non nella memoria degli abitanti della valle, che infatti riferiscono il verificarsi di frequenti crolli di piccoli blocchi sulla strada provinciale. L'Amministrazione Provinciale si occupa della rimozione dei blocchi e dell'organizzazione di frequenti campagne di disaggio dei blocchi instabili presenti nelle pareti direttamente prospicienti la strada. Nella **tabella 2.7.12** sono state riportate le principali informazioni relative ai fenomeni di crollo avvenuti in valle Germanasca.

Tabella 2.7.16 Sintesi dell'analisi storica relativa al dissesto lungo i versanti in valle Germanasca

Sebbene insufficiente, il quadro delle informazioni raccolto evidenzia che la caduta massi rappresenta un importante fattore di rischio per le infrastrutture ed i frequentatori della valle. Una situazione particolarmente

Comune	Località	Data	Descrizione
Massello	Gorgia/Ponte Rabbioso-Massello	3 settembre 1949	"Improvvisa ingente frana. Il cedimento della enorme massa di lastroni di pietra si è verificato in un punto dove la strada corre ai piedi di un imponente costone. Strada interrotta"
Massello	Ocietta/Perrero-Massello	14 settembre 1954	"Frana". "muro esistente pericolante"
Massello	Ocietta/Perrero-Massello	2 febbraio 1955	"Frane"
Massello	Vallone Vallone-Campo la Salza		Crollo di roccia. Litotipo microgneiss volume di circa 0.2 m ³
Perrero	Pomeifrè	11 novembre 1911	Frana nei pressi della fraz. Pomeifrè: ostruita la rotabile per il capoluogo
Perrero	Pomeifrè	18-19 marzo 1912	Frana in loc. Pomeifrè: ostruita la strada per il capoluogo. nella notte tra il 18 e il 19/03/1912 il terreno ripetutamente franava e grossi massi di pietra giunsero sulla strada..."
Perrero	Perrero / Perrero-Prali	21 novembre 1958	Frana in gneiss minuti alterati e dislocati. Danni muri e sede stradale
Perrero	Chiotti inf. / Perrero-Prali	23 ottobre 1978	Frana in sinistra del torrente Germanasca coinvolgente la strada provinciale incassata artificialmente tra il torrente e una parete di roccia più o meno competente, strapiombante e alta 10 m circa. Piani di scistosità con giaciture a franapoggio. Ostruzione sede stradale per caduta di notevole terriccio
Perrero	Pomeifrè, SP Perrero-Prali km 11+200	15 gennaio 1996	Frana per crollo interrompe la strada provinciale Prali-Perrero. Distacco dalla parete rocciosa di un cuneo scivolato lungo l'intersezione di due superfici di discontinuità principali. Il cuneo, crollato sul sottostante detrito ha mobilizzato parte del detrito stesso (volume tot: 10 000 m ³). Il materiale franato in parte si è depositato in corrispondenza della strada, in parte ha raggiunto il sottostante torrente Germanasca. Asportato un tratto della provinciale, Prali isolata. Volume del cuneo roccioso: 5 000 m ³ , volume complessivo della frana circa 10 000 m ³ , la traccia principale del detrito mobilizzato ha uno sviluppo di 150X40 ed una pendenza di circa 45°
Perrero	Ponte Raut, Versante Destro	Ottobre 1996	Pericolo di caduta massi con rischio di sfondamento della soletta del canale IDREG e conseguente pericolo che l'acqua del canale si riversi sulla sottostante provinciale
Perrero	Perrero-Prali	1996	Crollo massi 10*8*8 (circa 650 m ³). Parziale asportazione tratto stradale

Comune	Località	Data	Descrizione
Perrero	Pomeifrè	13-16 ottobre 2000	Crollo di cresta rocciosa, stabilizzatosi in corrispondenza a cengia sottostante. Pericolo potenziale per l'accesso all'imbocco della miniera Luzenac
Perrero	Sabbione	13-16 ottobre 2000	Crollo di blocchi a partire dal ciglio di una parete rocciosa sovrastante la strada provinciale, con interruzione temporanea della viabilità
Perrero	Trosseri /Perrero-Prali		Frana coinvolgente 4-5 ha di terreno e alcuni fabbricati in gneiss minuti, micascisti talora eclogitici, giacitura variabile per ripiegamenti localmente intensi e dislocazioni. Frana di tipo complesso
Perrero	Chiotti inf./Chiotti-Ponte Raut		Crollo piccoli massi dalla parete subverticale a monte della strada provinciale, litotipo prevalente scisti grafitici
Pomaretto	Lausa	13 aprile 1932	Una frana ostruisce il corso del Germanasca presso la località Lausa di Pomaretto. Distrutto un tratto del canale dell'impianto idroelettrico della Soc. Gutermann
Pomaretto	Concentrico	1987	Pericolo di caduta massi da uno sperone roccioso sovrastante alcune case di civile abitazione nel concentrico di Pomaretto. Minacciate case di civile abitazione
Pomaretto	Concentrico	13-16 ottobre 2000	Crollo di un masso di circa 10 m ³ , arrestatosi dietro l'edificio di via Carlo Alberto n. 4
Prali	Arnaud	24-25 aprile 1926	Una frana abbatte tre edifici e causa due vittime ad Arnaud. 2 vittime; distrutti 3 edifici della frazione Arnaud
Prali	Strada Ponte Crosetto-Borgata Villa.	aprile 1928	Frana a valle del ponte di Villa (1 km) lungo un tratto di 90 m gravi frane di grossi blocchi di roccia. Persiste grave pericolo. Litotipo prevalente gneiss minuti. Danni alle opere murarie con ostruzione della strada provinciale
Prali	Crosetto Perrero-Prali	aprile-maggio 1928	Frana a valle del ponte Crosetto, caduta grossi blocchi. Litotipo prevalente gneiss minuti. Danni alle opere murarie con ostruzione della strada provinciale
Prali	Indritto dei Marmi Crosetto-Ghigo	30 aprile 1930	Frana di grossi blocchi (verificatasi a 1 km a valle di Villa di Prali). Presenza di massi accumulati sul ripido versante a monte della strada. Litotipo prevalente gneiss minuti con ripiegamenti e dislocazioni. Interruzione transito sulla strada provinciale, danneggiato per più di 60 m il muro di controriva in malta di cemento. Il muraglione di sostegno a secco e' stato spinto a valle con distacco e cedimento della carreggiata
Prali	Prali-Indritto dei Marmi	novembre 1932	Frana in gneiss minuti, ripiegamenti e dislocazioni. Interruzione traffico per 2 km. Crollo del muro di sostegno per 30 m
Prali	Perrero-Prali	14 giugno 1957	Franamento della falda soprastante la strada. Litotipo prevalente gneiss minuto. Presenza di massi e materiale alluvionale in equilibrio instabile, pendio molto ripido Ingombro del piano viabile per 12 m, crollo di 9 m di muro di controriva alto 4.2 m, asportazione di 9 m di parapetto in muratura sul ciglio stradale a valle
Prali	Indritti dei Marmi Perrero-Prali/Ghigo	14 giugno 1957	Frana. Ostruzione strada provinciale in località Indritti dei Marmi (poco a valle delle frazioni Villa di Prali)
Prali	Gianna Perrero-Prali/Ghigo	14 giugno 1957	Frana. Ostruzione strada provinciale dopo la frazione Gianna
Prali	Perrero-Prali	18 novembre 1958	Frana proveniente dallo "smottamento di terriccio mescolato a grossi massi". Litotipo prevalente gneiss minuto. Completa ostruzione della strada provinciale per 12-15 m, cedimento del muro di controriva alto 10 m e già lesionato nel 1957
Prali	SP 169 Perrero-Prali, km 8.250	07-08 novembre 1962	INTERROTTA LA PERRERO-PRALI. Dopo giorni di piogge... Prali isolata da una frana. Frana che ha divelto 40 m della strada provinciale
Prali	SP 169 Perrero-Prali	17 novembre 1974	Un crollo lungo la strada Perrero-Prali provoca una vittima. Ucciso un automobilista che transitava.
Prali	Resio Pomaifre'-Miniera Fontane	1986	Crollo massi. Strada asportata
Prali	Diritti dai Marmi Ponte-Rivet-Prali	9 novembre 1997	Crollo massi (circa 1 m ³). Distrutto cordolo in cls
Prali	Inverso di Crosetto (a valle di Crosetto)		Fenomeno di crollo
Prali	Rodoretto bivio Fontane-Rodoretto		Crollo massi, microgneiss con pieghe pigmatitiche, fratture a franapoggio (stalattiti di ghiaccio)
Salza di Pinerolo	Fontane-Meynieri	19-20 maggio 1977	"alluvione frane smottamenti". "Strada carrabile collegante la frazione Fontane con la borgata Meynieri: per l'intera lunghezza di 6 km ostruita da frane e interrotta da smottamenti di notevole entità, dal crollo di 3 ponti"
Salza di Pinerolo	Milano Milano-Didiero		Crollo di roccia da parete subverticale altezza massima 10 m, tratto lungo circa 50 m

interessante è quella del settore compreso tra il ponte della Rabbiosa e il ponte di imbocco al piazzale delle miniere di talco, in località Pomeifrè. Già nel 1912 l'Eco del Chisone del 23 marzo riportava: "... Una colossale frana, nel novembre 1911, ostruiva la rotabile nei pressi della frazione Pomeifrè... In detto luogo nella notte tra il 18 e il 19 marzo 1912 il terreno ripetutamente franava e grossi massi di pietra giunsero sulla strada...". Il 15 gennaio 1996 una frana per crollo, con volume stimato di circa 5 000, ha interrotto la SP Prali-Perrero. Diversi cunei instabili erano già stati riconosciuti dallo studio effettuato dalla "Trento Disgaggi" eseguito alcuni anni prima (**figura 2.7.53**). Nell'ottobre del 2000, in seguito all'evento alluvionale che ha colpito il Piemonte, sempre nei pressi della località Pomeifrè, è avvenuto un crollo della cresta rocciosa, stabilizzatosi in corrispondenza della cengia sottostante, con potenziale pericolo per l'accesso all'imbocco della miniera Luzenac.

Figura 2.7.53 a) Località Pomeifrè. Grosso monolite instabile con volume stimato circa 5 000 m³, rilevato nel 1988 da "Trento Disgaggi", su cui era stato stimato un coefficiente di sicurezza pari a 1.01 (foto: Trento Disgaggi, 1998); b) nel medesimo settore è ora visibile la zona di distacco del crollo avvenuto il 15 gennaio 1996 (fotografia luglio 2006)



Sempre in questo tratto di valle, nel novembre 1974, un crollo lungo la strada provinciale ha provocato la morte di un automobilista. Attualmente è stato predisposto dal CNR-IRPI di Torino un sistema di monitoraggio che utilizza una stazione totale topografica per il controllo di alcuni blocchi instabili puntuali e metodi geofisici per il monitoraggio di tutta la parete rocciosa (Lollino et al., 2004).

Rilievi di terreno

Luca Lanteri - Arpa Piemonte

Lungo tutto il tratto della SP 169 della valle Germanasca, che porta dall'imbocco della valle fino all'abitato di Prali, sono state individuate 61 aree omogenee: per 28 di queste è stato possibile effettuare le misure direttamente su una porzione di affioramento (aree di tipo 1), in 10 casi l'analisi è avvenuta mediante rilevamento a distanza (aree di tipo 2) ed infine per 23 aree, a causa dell'eccessiva distanza, della difficoltà di avvicinamento alla parete o per la fitta vegetazione presente, non è stato possibile effettuare alcun tipo di misura (aree di tipo 3).

Le caratteristiche morfologiche della valle rendono particolarmente difficoltosa l'analisi delle pareti; il tracciato della strada provinciale corre infatti per un primo tratto lungo il fondovalle, in alcuni punti stretto ed incassato, per poi elevarsi lungo il versante fino ad un centinaio di metri di quota rispetto al letto del torrente Germanasca, ma mantenendosi comunque in genere a ridosso delle principali pareti rocciose. La quasi generale assenza di strade secondarie sul versante opposto, nonché la presenza di una fitta vegetazione

lungo tutta la valle, rendono spesso difficile trovare buoni punti di osservazione che permettano una visibilità ottimale della parete. Al fine di limitare al massimo l'effetto di mascheramento da parte della vegetazione il rilevamento della porzione medio-bassa della valle si è concentrato nei mesi invernali (gennaio–febbraio 2007); nella parte altimetricamente più elevata della valle si è preferito effettuare il rilevamento nei mesi estivi (giugno–settembre 2006), evitando così che un'eventuale copertura nevosa limitasse la visibilità delle pareti e rendesse difficoltosa l'accessibilità delle strade secondarie (figura 2.7.54).



Figura 2.7.54 Confronto tra rilievo estivo ed invernale in zone vegetate. a) foto del luglio 2006; b) foto del gennaio 2007. Nella stessa area è presente un fenomeno di ribaltamento di dimensioni rilevanti, che durante la prima analisi (avvenuta in periodo estivo) non era stato identificato, perché dalla strada provinciale risultava completamente coperto dalla fitta vegetazione. Il fenomeno è posto una trentina di metri più a monte rispetto al livello della strada provinciale

Proprio a causa delle caratteristiche morfologiche della valle è stato spesso necessario individuare, per ogni singola area, diversi punti di rilievo che hanno permesso di ricostruire l'assetto geo-strutturale di dettaglio dell'ammasso roccioso.

Quando possibile è stato effettuato almeno un punto di ripresa panoramico che permettesse di avere una visione d'insieme della parete, anche se spesso i punti di ripresa accessibili sono risultati troppo distanti per effettuare qualsiasi tipo di misurazione: in questi casi le misure effettuate direttamente sulla porzione di parete raggiungibile dalla strada provinciale sono state utilizzate per caratterizzare l'intera parete rocciosa.

Le misure così ottenute risultano più affidabili dal punto di vista dell'orientazione delle discontinuità, ma sicuramente carenti per quanto riguarda l'identificazione dei sistemi più significativi a scala dell'intera parete. È probabile inoltre che, proprio a causa dell'impossibilità di avere una visione dell'intera parete esaminata, alcuni cinematismi potenziali, anche di dimensioni rilevanti, siano stati sottostimati o che addirittura non siano stati identificati.

Le aree rilevate hanno in genere una estensione planimetrica limitata (compresa tra 400 m² e 0.15 km²), con pareti che hanno sviluppo verticale da qualche decina di metri fino a raggiungere 200 m circa. Le pareti di dimensioni maggiori si concentrano nella parte mediana e superiore della valle, mentre nella parte inferiore sono presenti pareti di modeste dimensioni, che tuttavia possono dare origine a crolli rilevanti, anche perché poste in genere a ridosso della strada provinciale.

L'analisi dei dati strutturali permette di riconoscere 10 differenti famiglie di discontinuità principali numerate da K1 ÷ K11: le famiglie sono state denominate in ordine decrescente in base alla loro frequenza e distribuzione areale¹. Le discontinuità appartenenti alle famiglie da K1 ÷ K7 sono state rilevate lungo tutta la valle, mentre nel caso delle altre famiglie (K9 ÷ K11) si tratta di sistemi con rilevanza locale, rinvenute su singole aree e spesso solo in porzioni limitate della parete analizzata. Il sistema K1 è impostato lungo la scistosità principale e mostra una distribuzione sostanzialmente omogenea, con immersione media verso W di circa 20-30°. Si distingue poi un sistema di discontinuità a medio angolo (K2) con direzione N110°-130°SW ed un sistema coniugato (K4) immergente a NE; con frequenza minore si ritrovano una serie di sistemi a più alto angolo (K3, K5 e K6) con direzioni rispettivamente NNE-SSW, E-W e N-S ad alto angolo. È infine presente un sistema subverticale (K7) con direzione media N60 (**figura 2.7.55**).

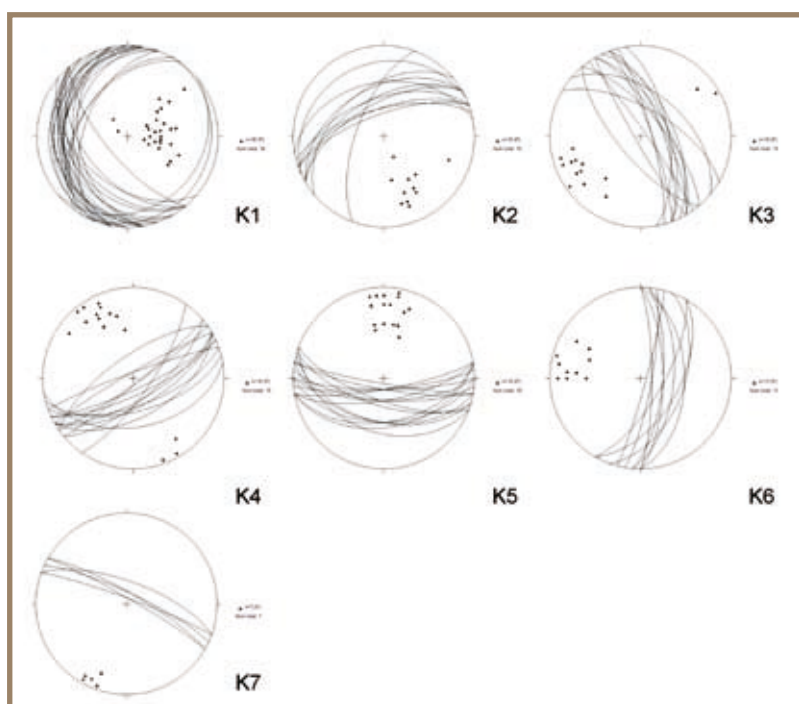


Figura 2.7.55 Proiezioni stereografiche (emisfero inferiore, proiezione equiareale) delle principali famiglie di discontinuità rilevate nella valle (K1-K7)

La distribuzione delle famiglie di discontinuità all'interno dei diversi domini litologici è risultata sostanzialmente omogenea, sebbene all'interno dell'Unità ad affinità Piemontese si evidenzia una maggior dispersione delle misure di orientazione dei giunti. In generale, l'ammasso roccioso presenta un elevato grado di fratturazione, risultato della complessa storia evolutiva dell'area in esame. Per oltre il 30% dei casi l'ammasso roccioso è stato classificato come "disarticolato" o "frantumato", sebbene in genere anche le aree classificate come "fratturate" presentino anch'esse, localmente, un elevato grado di fratturazione. La differenza più evidente tra i due domini si riscontra però nella tipologia di fratturazione: nelle unità ad affinità Brianzonese le aree analizzate hanno generalmente una fratturazione di tipo più regolare (oltre l'85% di affioramenti sono stati classificati come "bloccosi" o "tabulari"), mentre nelle unità ad affinità Piemontese più della metà delle aree analizzate presentano una fratturazione decisamente "irregolare". Più in particolare, aree con fratturazione fortemente irregolare si concentrano in due settori di valle: quello compreso tra il bivio per il vallone di Massello e l'imbocco delle miniere di Talco e quello in prossimità della località Rodoretto.

Entrambe le zone presentano un notevole grado di complessità strutturale, con caratteri probabilmente influenzati dalla presenza dell'importante contatto tettonico tra le unità del Dora Maira e quelle dei Calcescisti con Pietre Verdi. In tali zone la caratterizzazione con metodi speditivi è risultata particolarmente difficoltosa e spesso poco significativa. Le principali difficoltà riscontrate sono state: l'eccessiva variabilità dell'orientazione delle strutture, la difficoltà di raggruppare le discontinuità in famiglie che

¹ La famiglia K8 non è presente perché è stata accorpata in seguito con un'altra famiglia.

Il confronto con i principali lineamenti telerilevati (Perrone, 2006) evidenzia una buona corrispondenza tra i principali sistemi a più alto angolo riconosciuti sul terreno e l'orientazione dei lineamenti emersi dall'analisi di immagini da satellite. In particolare nel lavoro di Perrone vengono riconosciuti 4 sistemi di lineamenti nell'area compresa tra la bassa valle di Susa e la valle Pellice. Il sistema Ln₁ (con orientazione NS), maggiormente concentrato nella zona di contatto tra l'Unità del Dora Maira e la Zona Piemontese, presenta una buona corrispondenza con l'orientazione delle discontinuità K6; tale sistema è ben evidenziato anche dall'andamento del torrente Germanasca nel settore di testata della valle. I sistemi K5 (circa S-E), K7 (WNW-ESE) e K4 (WSW-ENE) sono riconducibili rispettivamente ai sistemi Ln₃, Ln₄ ed Ln₂ riconosciuti da Perrone (2006). L'orientazione del sistema Ln₃ è ben evidenziato dall'andamento pressoché rettilineo dei valloni secondari di Salza e Massello, mentre Ln₄ ed Ln₂ sembrano condizionare l'andamento di diversi rii secondari.

Figura 2.7.56 Ammasso roccioso con fratturazione irregolare. In alcuni casi, a causa dell'eccessiva variabilità della fratturazione, non è stato possibile identificare famiglie di giunti con caratteristiche accomunabili



Tabella 2.7.17 Riepilogo delle tipologie di cinematismi identificati da rilevamento di terreno

Tipologia cinematismo	n° di casi riscontrati
Cuneo	20
Planare	26
Ribaltamento	7
Distacco puro	5
Distacco da ammasso disarticolato	2

Completivamente in tutta la valle sono stati rilevati 60 cinematismi, prevalentemente di tipo planare o

per scivolamento a cuneo, e in quantità minore per ribaltamento o per distacco puro o da ammasso

roccioso disarticolato (tabella 2.7.17). Sebbene in genere le volumetrie dei fenomeni identificati siano spesso modeste (con valori medi dei blocchi di circa 0,5 m³) in alcuni casi sono stati rilevati alcuni blocchi instabili di dimensioni considerevoli con volumi stimati che superano le decine di migliaia di metri cubi, come nel caso degli speroni rocciosi presenti nelle aree n° 29 e n° 50.

In concomitanza con il rilevamento delle aree omogenee sono state censite le principali opere di protezione lungo il tracciato della strada provinciale. Nel periodo di rilevamento è stato inoltre possibile osservare direttamente alcune campagne di disaggancio di blocchi instabili e la realizzazione di diversi interventi di protezione per caduta massi, quali la messa in posa di reti paramassi e di reti a contatto e la chiodatura di blocchi (figura 2.7.57).

Per concludere, nel caso della valle Germanasca, la metodologia di rilevamento utilizzata ha permesso di descrivere in modo efficace le condizioni dell'ammasso roccioso nel caso delle pareti rocciose con fratturazione regolare, caratterizzate da famiglie di discontinuità distribuite in modo sostanzialmente omogeneo all'interno dell'area analizzata, mentre ha mostrato alcuni limiti nel caso la parete presenti una fratturazione fortemente irregolare, con discontinuità poco regolari sia come orientazione sia come distribuzione lungo la parete. In questo secondo caso il raggruppamento di discontinuità all'interno di famiglie con caratteristiche omogenee sull'intera parete porta ad una eccessiva semplificazione del reale assetto strutturale della parete; d'altro canto una descrizione più significativa dal punto di vista dell'omogeneità strutturale richiede la definizione di aree omogenee di dimensioni troppo limitate rispetto al carattere speditivo del metodo.

Tutte le informazioni raccolte durante il rilevamento di terreno sono state utilizzate per implementare ed aggiornare il Sottosistema Frane del Sistema Informativo Geologico e la Banca Dati Geotecnica Rocce di Arpa Piemonte.



Figura 2.7.57 Alcuni degli interventi di sistemazione realizzati nel periodo successivo al 2006. a) strada per località Rodoretto, foto luglio 2006; b e d) SP 169 dopo l'abitato di Perrero, foto febbraio 2007

Completivamente in tutta la valle sono stati rilevati 60 cinematismi, prevalentemente di tipo planare o per scivolamento a cuneo, e in quantità minore per ribaltamento o per distacco puro o da ammasso roccioso disarticolato (tabella 2.7.17). Sebbene in genere le volumetrie dei fenomeni identificati siano spesso modeste (con valori medi dei blocchi di circa 0,5 m³) in alcuni casi sono stati rilevati alcuni blocchi instabili di dimensioni considerevoli con volumi stimati che superano le decine di migliaia di metri cubi, come nel caso degli speroni rocciosi presenti nelle aree n° 29 e n° 50.

Analisi cinematica tramite stereogrammi

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

In questo paragrafo è descritto l'iter seguito per l'individuazione dei potenziali cinematismi (analisi cinematica) all'interno delle aree omogenee di tipo 1 o di tipo 2 in cui sono stati suddivisi i versanti analizzati in valle Germanasca. Al fine di illustrare la procedura seguita ed i risultati ottenuti, viene riportato un esempio corrispondente ad un'area omogenea significativa; si rimanda al materiale contenuto nel DVD allegato al presente lavoro, per consultare i dati relativi all'intera valle.

A partire dai risultati del rilievo speditivo di terreno, per ciascuna area omogenea l'analisi cinematica consiste in:

1. rappresentazione stereografica equatoriale della giacitura media del fronte e delle discontinuità presenti;
2. individuazione e verifica dei potenziali cinematismi osservati in sito, cioè verifica che la giacitura delle discontinuità rispetti le condizioni cinematiche per l'instabilità illustrate al paragrafo 2.4.2 (**figura 2.4.1**);
3. individuazione di eventuali ulteriori cinematismi, possibili dal punto di vista geometrico ma non indicati dal rilievo.

Nel caso della valle Germanasca, mediante il rilievo speditivo di terreno si è osservata una situazione strutturale delle pareti in generale piuttosto complessa, che dà luogo a numerose condizioni di potenziale instabilità. Nella prima fase (in sito) sono stati infatti rilevati 60 potenziali cinematismi, di cui 26 scivolamenti planari, 20 scivolamenti a cuneo, 7 ribaltamenti e 7 distacchi puri o da ammassi disarticolati. In seguito all'analisi cinematica condotta sulle rappresentazioni stereografiche, si è arrivati a definire un totale di 91 cinematismi, di cui 30 scivolamenti planari, 47 scivolamenti a cuneo, 5 ribaltamenti e 9 distacchi di vario tipo. Dei 91 cinematismi analizzati, dunque, 31 derivano unicamente dall'analisi delle rappresentazioni stereografiche.

Tra le aree omogenee in cui è stata suddivisa l'intera valle compaiono alcune aree in cui non si sono condotte analisi ed il valore della probabilità di rottura è stato assegnato a priori. Si tratta in particolare di due aree in cui sono già state realizzate opere di protezione (reti paramassi) e di due aree che si presentano molto disarticolate, tanto da rendere impossibile una schematizzazione della situazione strutturale mediante la suddivisione delle discontinuità presenti in famiglie. Per le prime due aree, (la n° 25 e la n° 28), si è scelto di non eseguire analisi di stabilità e di considerarle stabili grazie alla presenza delle reti; per le altre due (la n° 29 e la n° 48), si è scelto di assegnare una probabilità di rottura pari al 100%, senza effettuare analisi di stabilità, a causa delle limitazioni del metodo di calcolo e dei dati di ingresso (si veda il paragrafo 2.4.2). Come è già stato sottolineato per altre valli, l'analisi mediante stereogrammi evidenzia il fatto che il rilievo a grande scala tende a sottostimare il numero di possibili cinematismi, essendo influenzato dalla posizione del punto di osservazione rispetto al fronte e da altri fattori quali la presenza di vegetazione o di neve, la luce e le condizioni atmosferiche. Per questi motivi le analisi di stabilità sono state condotte per ciascuna area omogenea sia sui cinematismi osservati in sito sia su quelli individuati sullo stereogramma, distinguendo gli uni dagli altri ma assegnando lo stesso peso ai risultati.

A titolo di esempio si riporta in dettaglio il caso dell'area omogenea n° 10, situata in località Comba Scura. L'area in esame è difficilmente accessibile e non risulta visibile direttamente dalla strada provinciale a causa della fitta vegetazione; l'analisi è stata quindi effettuata portandosi direttamente a ridosso della parete rocciosa (area tipo 1). L'area è situata all'interno di una unità monometamorfica ad affinità Brianzonese e più in particolare al Complesso di Pinerolo; dal punto di vista litologico essa è costituita da gneiss conglomeratici con origine detritica e presenza di pigmento grafítico. La parete presenta condizioni di fratturazione molto variabili, con grado fratturazione che va da rilasciato a localmente disarticolato. All'interno di questi litotipi la fratturazione si sviluppa in genere con caratteristiche abbastanza regolari, isolando blocchi di forma prismatica che in alcuni casi raggiungono dimensioni di diverse decine di metri cubi. In tutta l'area sottostante la parete si osservano numerosi blocchi di piccole e medie dimensioni, che in alcuni casi arrivano a lambire la strada provinciale.

La **figura 2.7.58** mostra una vista panoramica del versante costituente l'area n° 10, mentre nella **figura 2.7.59** è riportato un particolare della parete rilevata.

In questa area omogenea l'angolo di immersione (α) del fronte può assumere valori compresi tra un mini-

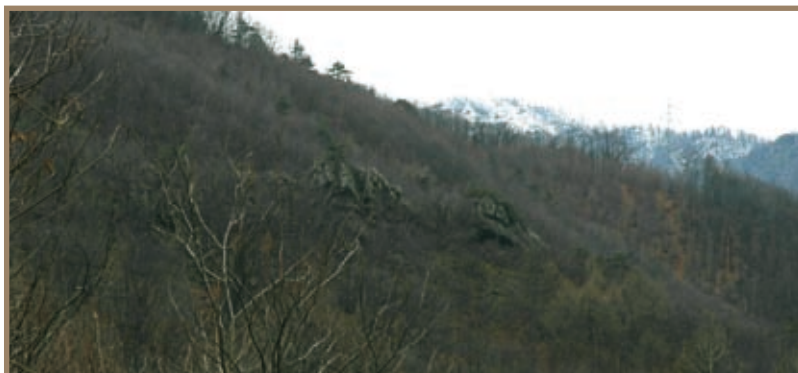


Figura 2.7.58 Immagine panoramica dell'area omogenea n° 10, sita in località Comba Scura



Figura 2.7.59 Particolare della parete rilevata nell'area omogenea n° 10

mo di 210° ed un massimo di 230°, con un valore medio di 220°, mentre l'angolo di inclinazione (ψ) varia tra 50° e 70°, con un valore medio di 60°. In fase di rilievo è stato segnalato anche un fronte locale sul quale si imposta un cinematismo per scioglimento planare coinvolgente la famiglia di piani K2. Il valore medio dell'angolo di immersione del fronte locale è di 320° ed il valore medio del suo angolo di inclinazione è di 70°. Nessuna variabilità è stata considerata in questo caso per i parametri di giacitura.

Sono state inoltre individuate e misurate in sito 5 famiglie di discontinuità; la **tabella 2.7.18** riporta i valori medi e gli intervalli di variazione delle giaciture misurate.

I valori medi delle giaciture dei piani di discontinuità e del fronte sono stati inseriti negli stereogrammi riportati nelle **figure 2.7.60 a e 2.7.60 b**, con riferimento al fronte medio ed al fronte locale rispettivamente; con tali rappresentazioni stereografiche è stata condotta l'analisi cinematica.

Famiglia	Immersione (α)		Inclinazione (ψ)	
	media	variabilità	media	variabilità
K1	280°	± 10°	25°	± 10°
K2	320°	± 10°	45°	± 15°
K3	75°	± 10°	80°	± 10°
K4	340°	± 10°	85°	± 10°
K7	30°	± 10°	80°	± 10°
fronte	340°	± 10°	70°	± 10°
fronte locale	320°	-	70°	-

Tabella 2.7.18

Caratteristiche di giacitura delle famiglie di discontinuità rilevate nell'area omogenea n° 10

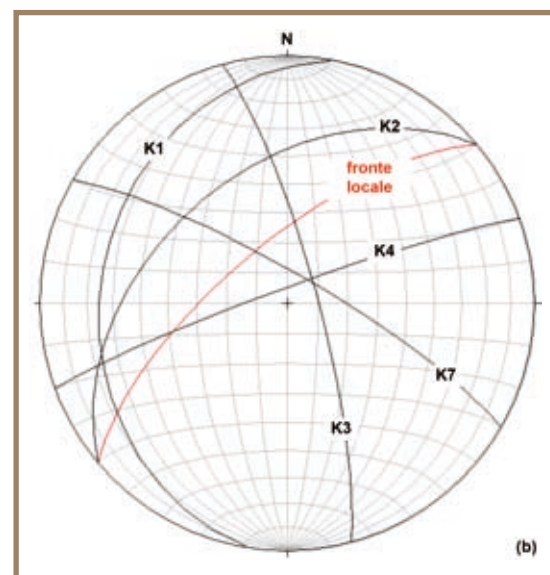
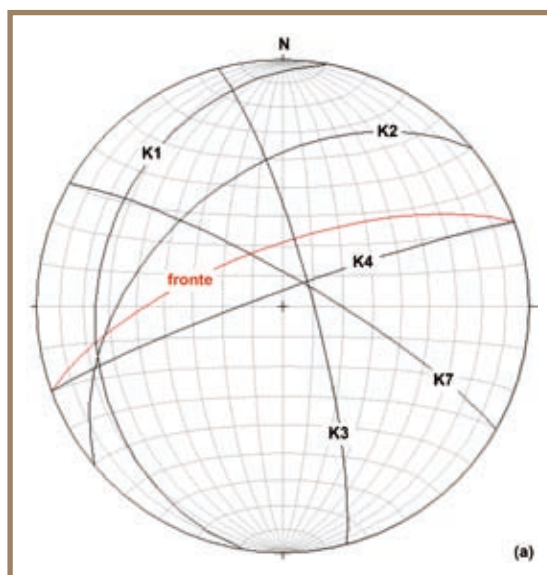


Figura 2.7.60

Stereogrammi relativi all'area omogenea 10: a) fronte medio, b) fronte locale

I potenziali cinematismi rilevati in sito risultano essere i seguenti:

- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K2 e K3, con giunto di trazione K4 e direzione media di scivolamento (retta di intersezione) pari a $\alpha = 340^\circ$, $\psi = 40^\circ$;
- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K2 e K7, con direzione media pari a $\alpha = 310^\circ$, $\psi = 44^\circ$;
- scivolamento planare sul piano K2, con direzione di scivolamento pari alla giacitura del piano e possibili giunti i piani K3 e K4. Questo cinematismo viene riferito al fronte locale.

Dall'osservazione dello stereogramma sono inoltre emersi due ulteriori scivolamenti a cuneo: il primo formato dall'intersezione tra i piani K1 e K3, con direzione media pari a $\alpha = 346^\circ$, $\psi = 10^\circ$, il secondo formato dall'intersezione tra i piani K1 e K7, con direzione media pari a $\alpha = 304^\circ$, $\psi = 22^\circ$.

Per quanto riguarda le altre aree omogenee individuate lungo la valle Germanasca, si rimanda alle schede contenute nel DVD allegato.

Analisi di stabilità

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

Al termine della fase di analisi cinematica, mediante l'applicazione dei programmi di calcolo meccanico-probabilistici PlaSMon (Pisani, 2005), Wintam (Major *et al.*, 1974) e Toppling Stones (Allodi e Castelli, 2007), è possibile determinare la probabilità di rottura per ogni cinematismo evidenziato. A tal fine è necessario (come illustrato nel paragrafo 2.4.4 e nei manuali di ciascun programma riportati nel DVD in allegato) compilare un file di *input* per ciascuno, all'interno del quale sono specificati i valori medi delle caratteristiche geometriche e meccaniche del cinematismo stesso e le relative distribuzioni di frequenza.

Non avendo a disposizione alcun dato sulle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso, in particolare i parametri di resistenza delle discontinuità in sito, sulla base dei litotipi presenti e di esperienze precedentemente sviluppate per altri siti simili a quello della valle Germanasca, si sono considerati su tutte le superfici di discontinuità un angolo d'attrito costante $\phi = 30^\circ$ e una coesione $c = 0$. Nessuna variabilità statistica viene considerata nel progetto per questi parametri. La scelta di assumere coesione nulla è da considerarsi a favore di sicurezza, poiché si trascura il contributo alla stabilità di eventuali ponti di roccia presenti all'interno delle discontinuità.

Andando ad analizzare una zona geografica relativamente ampia e un numero di cinematismi notevole, non si è potuto inoltre fare alcuna considerazione sulla presenza dell'acqua all'interno delle discontinuità; per questo motivo si è scelto di compiere tutte le simulazioni in condizioni drenate, ovvero in assenza di acqua in pressione.

Per quanto riguarda le dimensioni dei blocchi potenzialmente instabili, dove indicato vengono assunti i valori medi forniti dal rilievo di terreno; nel caso in cui il cinematismo non sia stato osservato in sito vengono invece considerate dimensioni unitarie (fittizie). È necessario notare che, a causa delle semplificazioni geometriche e meccaniche introdotte nel progetto (discontinuità piane, assenza di coesione e di forze esterne, ecc.), nel caso di potenziali instabilità per scivolamento, come quelle analizzate nella valle Germanasca, la geometria dei blocchi non influisce sui fattori di sicurezza ma solo sui volumi calcolati per ciascuna estrazione di Monte Carlo. Per questo motivo i volumi indicati nella **tabella 2.7.19** hanno una validità limitata nel caso in cui il cinematismo non sia stato rilevato.

Gli unici parametri forniti in senso statistico sono quelli relativi alla giacitura dei piani coinvolti in ciascun cinematismo. Ad essi viene associata una distribuzione di frequenza uniforme corrispondente all'intervallo di variazione fornito dal rilievo speditivo. Questo significa che qualsiasi valore compreso tra il minimo ed il massimo valore della distribuzione ha la stessa probabilità di essere estratto nel corso delle simulazioni di Monte Carlo. Questa forte semplificazione è legata al grado di dettaglio con cui vengono forniti i dati dal rilievo di terreno, come specificato al paragrafo 2.4.4.

Per ciascun cinematismo sono state effettuate 1 000 estrazioni di Monte Carlo. I risultati delle analisi svolte sono schematizzati nella **tabella 2.7.19**, in termini di fattore di sicurezza (F_S) minimo, medio e massimo, volume minimo e massimo (con le limitazioni specificate sopra per quanto riguarda i cinematismi risultanti unicamente dall'analisi dello stereogramma), numero di casi staticamente e cinematicamente possibili (si

Cinematismo		$F_S (-)$			Volume (m ³)		Casi possibili	P_f possibili (%)	P_f (%)
tipo	discontinuità	min	med	max	min	max			
cuneo	K2	0.44	1.02	1.82	$7.32 \cdot 10^{-2}$	93.69	892	48.65	43.40
cuneo	K2-K7	0.34	0.66	1.19	$8.53 \cdot 10^{-4}$	43.63	990	92.32	91.40
cuneo	K1-K3	1.92	5.25	23.27	11.12	552.35	1 000	0	0
cuneo	K1-K7	0.89	1.68	3.2	1.095	73.44	1 000	1.50	1.50
planare	K2-K3	0.33	0.61	0.99	$5.39 \cdot 10^{-3}$	0.380	497	100	49.70

Tabella 2.7.19 Risultati delle analisi svolte per l'area omogenea n° 10

veda il paragrafo 2.4.3), probabilità di rottura (P_f) calcolata con riferimento ai soli casi possibili e probabilità di rottura calcolata con riferimento alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo. Si ricorda che nelle successive fasi del progetto PROVIALP si fa riferimento a quest'ultimo valore di P_f al fine di tenere conto nel risultato probabilistico del fatto che alcune combinazioni dei parametri non portino a definire volumi potenzialmente instabili all'interno dell'area omogenea.

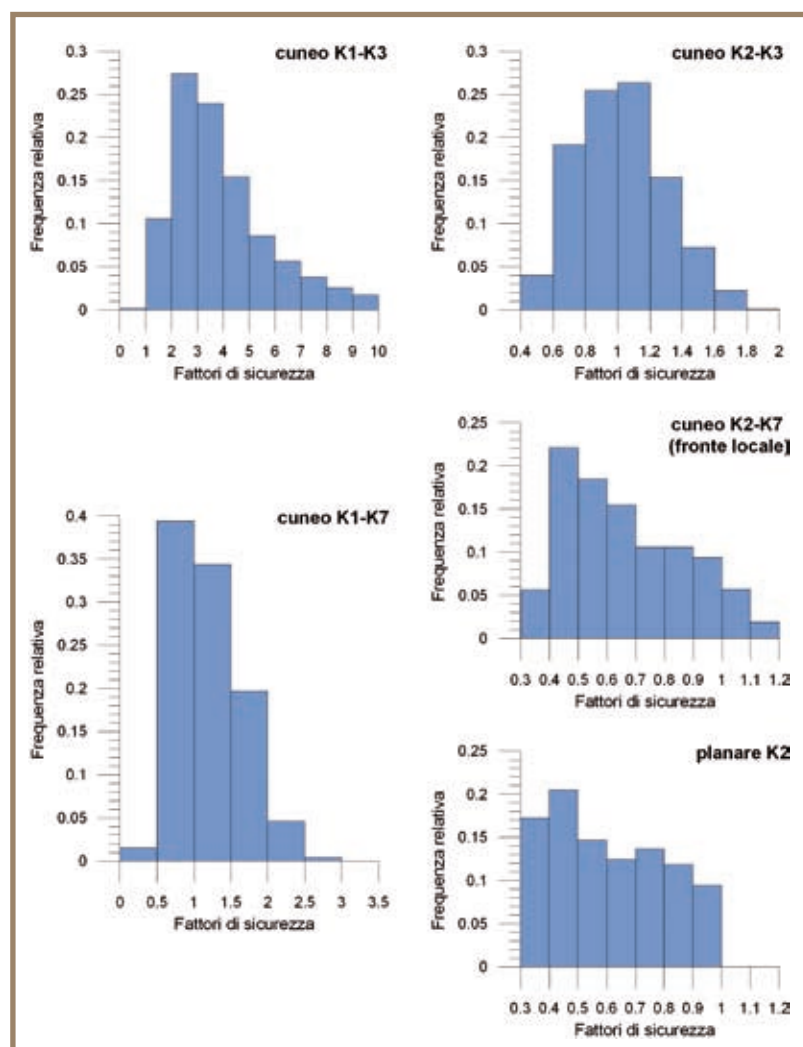


Figura 2.7.61 Istogrammi di frequenza relativa dei fattori di sicurezza calcolati nell'area omogenea n° 10

risultato instabile, per cui la P_f risulta pari a 0% sia con riferimento ai soli cinematismi possibili, sia rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo. In questo caso i fattori di sicurezza calcolati sono risultati alti, ed il valore medio di F_S calcolato è pari a 5.25. Tale cinematismo è stato perciò escluso dalle successive analisi;

- per lo scivolamento a cuneo K1-K7, tutti i casi campionati sono risultati possibili ma solo 15 sono risultati instabili. P_f è perciò pari a 1.50%, sia con riferimento ai soli cinematismi possibili, sia rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo. Il valore medio di F_S è pari a 1.68.

In figura 2.7.61 si riportano infine gli istogrammi rappresentanti la distribuzione relativa dei fattori di sicurezza campionati per ciascun cinematismo analizzato.

Dall'analisi dei risultati emerge che:

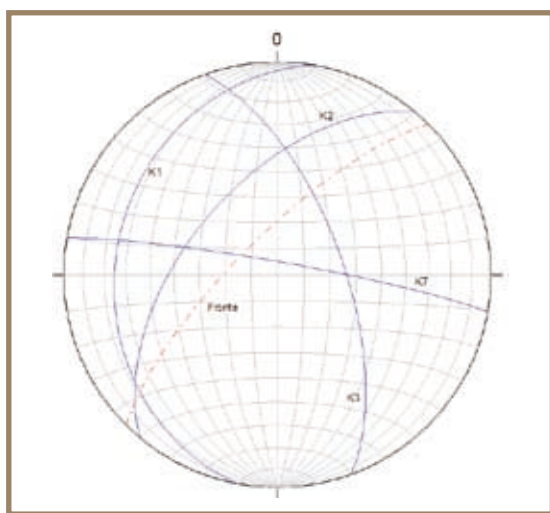
- per lo scivolamento planare su K2, tutti i 497 casi possibili campionati sono risultati instabili ($F_S < 1$), con valore medio di $F_S = 0.61$. P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili risulta perciò pari al 100%, mentre essa si riduce al 49.70% se rapportata alla totalità delle estrazioni di Monte Carlo effettuate;
- per lo scivolamento a cuneo K2-K3, degli 892 casi possibili campionati 434 sono risultati instabili, pari al 48.65%, che corrisponde a P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili. Rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo si ottiene invece P_f di 43.40%. Il valore medio di F_S è risultato 1.02;
- per lo scivolamento a cuneo K2-K7, dei 990 casi possibili campionati, 914 sono risultati instabili, pari al 92.32%, che corrisponde a P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili. Rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo si ottiene invece P_f ridotta al 91.40%. Il valore medio di F_S è risultato 0.66;
- per lo scivolamento a cuneo K1-K3, a causa della bassa inclinazione della retta d'intersezione, dei 1 000 casi possibili campionati, nessuno è

In sintesi per i cinematismi presenti all'interno dell'area omogenea n° 43 è stato calcolato:

- F_S minimo pari a 0.33, corrispondente allo scivolamento planare su K2;
- F_S massimo pari a 23.27, corrispondente al cuneo formato dai piani K1 e K3;
- Pf minima pari a 1.5%, corrispondente al cuneo formato dai piani K1 e K7;
- Pf massima pari a 91.4%, corrispondente al cuneo formato dai piani K2 e K7.

Si rimanda al file contenuto nel DVD allegato per la consultazione della tabella generale recante i risultati delle analisi estese a tutti i cinematismi rilevati nell'intera valle Germanasca.

Figura 2.7.62
Stereogramma delle discontinuità rilevate nell'area omogenea su cui si è verificato il crollo, proiezione equiareale sull'emisfero inferiore



lungo il versante fortemente acclive, con ampiezza del fronte alla base di circa 20 m. Il crollo è avvenuto per scivolamento planare su un fronte con orientazione media $315/75^\circ$, lungo un sistema di fratture circa parallelo al versante (**figura 2.7.62**). Probabilmente, il materiale detritico presente lungo il versante è scivolato al di sopra del substrato roccioso per la mancanza del supporto rappresentato dal blocco crollato nella notte.



Figura 2.7.63 Interventi di sistemazione realizzati nel mese di luglio 2007. La foto è stata scattata durante la realizzazione degli interventi

Nel corso del rilievo eseguito nell'estate precedente, la porzione di parete visibile (fino a circa 2-3 m dal piano della strada) era stata classificata come tipo 1 e su di essa erano state effettuate le misure. La zona da cui si è distaccato il crollo, posta immediatamente al di sopra della zona rilevata, risultava mascherata dalla vegetazione ed era quindi stata indicata come area di tipo 3. In seguito al crollo dell'estate 2007 l'area di tipo 1 è stata estesa verso l'alto di alcune decine di metri.

Confronto con un dissesto recente

Luca Lanteri - Arpa Piemonte

Domenica 10 giugno 2007, verso mezzanotte, un piccolo masso di dimensioni di circa $0.5-1 \text{ m}^3$ è caduto sulla SP 169 al km 13.2 ed è stato rimosso nella notte alle ore 3.00 circa. Nella mattinata seguente, nello stesso punto, si è verificato un crollo di materiale detritico a grossi blocchi misto a terra, vegetazione ed alcuni alberi ad alto fusto, per un volume complessivo di $200-300 \text{ m}^3$. Parte del materiale, rimosso dalla sede stradale nel corso della mattinata, è caduto nell'alveo del Germanasca. Il materiale si è distaccato da un'altezza di circa 15 m rispetto alla sede stradale, formando una nicchia larga circa 5-8 m ed è successivamente scivolato

lungo il versante fortemente acclive, con ampiezza del fronte alla base di circa 20 m. Il crollo è avvenuto per scivolamento planare su un fronte con orientazione media $315/75^\circ$, lungo un sistema di fratture circa parallelo al versante (**figura 2.7.62**). Probabilmente, il materiale detritico presente lungo il versante è scivolato al di sopra del substrato roccioso per la mancanza del supporto rappresentato dal blocco crollato nella notte.

Sulla parete in cui è avvenuto il distacco è ancora visibile un grosso blocco ancorato con 4 chiodi. Le cause del crollo sono da ricondursi alle intense piogge dei giorni precedenti, congiuntamente alla presenza di giunti con orientazione sfavorevole per la stabilità ed alle scadenti condizioni geomeccaniche dell'ammasso roccioso, che si presenta fortemente fratturato e rilasciato. Sono osservabili giunti con aperture da centimetriche a decimetriche, nonché la presenza di alcuni blocchi di grosse dimensioni isolati dalle fratture stesse. La frana, pur avendo interrotto la strada provinciale non ha creato particolari danni: sono stati riportati unicamente un lieve danneggiamento del manto stradale e del *guard-rail*. In seguito al crollo sono stati realizzati alcuni interventi per la protezione della strada provinciale: il disaggancio dei principali massi instabili, la chiodatura di alcuni blocchi, la stesura di una rete in aderenza e la messa in posa di una rete di protezione (**figura 2.7.63**).

L'analisi su questa porzione di versante, effettuata con la metodologia PROVIALP, ha messo in evidenza diversi cinematismi potenziali. Come indicato nella **tabella 2.7.20** sono stati verificati cinque potenziali cinematismi: quattro di questi per scivolamento di tipo a cuneo e uno per scivolamento planare. Due cinematismi presentano probabilità estremamente basse (inferiori al 25%) a causa del basso angolo formato dalla linea di intersezione tra i piani individuati; in un caso la probabilità è maggiore ma comunque contenuta (pari a circa il 42%), mentre per due casi si raggiungono probabilità di distacco elevate. In particolare, per gli scivolamenti che si sviluppano lungo il piano K2, come nel caso del fenomeno avvenuto nel giugno 2007, era stata calcolata una probabilità pari all' 84,8%.

I_D AREA	I_D CINEM	tipo	fronte	casi impossibili	casi possibili	casi instabili	P_f (possibili) (%)	P_f (tutti) (%)
64	84	planare	medio	152	848	848	100	84.8
	85	cuneo	medio	0	1000	253	25.3	25.3
	86	cuneo	medio	0	1000	0	0	0
	87	cuneo	medio	6	994	994	100	99.4
	88	cuneo	medio	36	964	422	43.78	42.2

Tabella 2.7.20 Tabella riepilogativa delle probabilità di distacco dei cinematismi identificati per l'area omogenea in esame.

Legenda

P_f (possibili) = rapporto tra il numero di casi in cui il fattore di sicurezza è risultato inferiore all'unità ed il numero di casi cinematicamente e staticamente possibili; P_f (tutti) = rapporto tra il numero di casi in cui il fattore di sicurezza è risultato inferiore all'unità ed il numero totale dei casi

I risultati emersi dall'analisi mostrano quindi una buona corrispondenza con il caso osservato per quanto riguarda la definizione della probabilità di distacco; è però da sottolineare che il distacco è avvenuto in un'area su cui non era stato possibile eseguire direttamente alcuna misura, a causa della vegetazione presente (**figura 2.7.64**). La caratterizzazione strutturale dell'ammasso roccioso è stata effettuata in un'area immediatamente adiacente. Il piano su cui è avvenuto lo scivolamento corrisponde effettivamente ad uno dei piani identificati durante il rilievo speditivo. Può quindi risultare utile, per le aree non direttamente rilevabili, effettuare una prima valutazione sulla probabilità di distacco utilizzando le misure raccolte nelle aree limitrofe.



Figura 2.7.64 a) area in cui è avvenuto il crollo, foto scattata nell'estate 2006; b) la stessa zona il giorno immediatamente successivo al crollo

Analisi di run out

Luca Mallen - Arpa Piemonte

Ultimate le analisi di stabilità e stimata una probabilità di rottura per ogni cinematismo identificato, si è proceduto alle analisi di *run out*. Mediante l'utilizzo del software ROTOMAP GIS© è stata simulata una serie di crolli aventi origine dalle aree omogenee individuate durante i rilievi speditivi di terreno.

L'applicativo prevede l'inserimento di una serie di parametri di *input* relativi principalmente al modello digitale di terreno utilizzato, ai coefficienti di restituzione normale, tangenziale e al coefficiente di attrito, nonché agli angoli limite di urto, rimbalzo e decollo, al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari.

Il DTM utilizzato è a maglia 10 m e rappresenta un buon compromesso tra l'esigenza di avere un modello digitale che descriva nel modo più accurato possibile la morfologia dei versanti e la capacità di calcolo delle macchine che devono elaborare i dati, trattandosi di un'analisi arealmente molto estesa.

I coefficienti di restituzione utilizzati sono stati inizialmente ricavati dalla letteratura e successivamente adattati ai dati a nostra disposizione mediante operazioni di *back analysis* e sulla base di esperienze fatte in passato con studi simili in zone alpine. Per quanto riguarda gli angoli limite di decollo, urto e rimbalzo si è optato per utilizzare una terna di angoli compresa nel *range* proposto dalla letteratura, ovvero tra 9° e 12° (valori peraltro già impostati come *default* negli esempi contenuti all'interno della guida dell'applicativo). Per la scelta dei parametri relativi al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari infine, si è optato per la simulazione del distacco di un masso per ogni cella appartenente ad una determinata area omogenea, senza deviazioni angolari, dal momento che le aree omogenee di partenza sono spesso arealmente piuttosto estese, e quindi in grado di garantire la variabilità necessaria per una corretta stima dei valori energetici.

Ultimate le elaborazioni, l'applicativo restituisce una serie di grid relativi all'energia cinetica (media e massima), ai punti di arresto dei massi, alle altezze di volo e all'indice di suscettività.

Dalle elaborazioni svolte, in primo luogo si evidenzia come la SP 169, che corre lungo il fondovalle, sia fortemente interessata da potenziali fenomeni di crollo. L'analisi dei punti di arresto, infatti, mostra come dalla maggior parte delle aree omogenee oggetto di studio (aventi cioè caratteristiche d'idoneità per un'analisi di terreno speditiva associate a una probabilità di rottura > 0) si potrebbero staccare dei blocchi in grado di raggiungere ed attraversare la sede stradale.

A questo proposito è necessario notare che le zone del fondovalle prive di copertura dell'indice di suscettività possono avere significati diversi ed opposti. Esse possono indicare per esempio zone sottostanti aree omogenee di tipo 1 o 2 che non hanno dato evidenza di potenziali instabilità ($I_D = 0$), oppure zone sottostanti aree di tipo 3, riconosciute come potenzialmente instabili ma per le quali non è stato possibile condurre alcun rilievo di terreno, o ancora zone del versante su cui non è stato possibile avere alcuna informazione (per esempio perché coperte da vegetazione o troppo lontane dal punto di osservazione).

Al fine di evitare errori di interpretazione nella lettura delle carte prodotte, sono state perciò indicate sempre le aree omogenee di potenziale distacco, specificando la loro tipologia. Se esse non sono presenti o se si tratta di aree di tipo 3, nessuna considerazione può essere fatta sulla suscettività del fondovalle e della strada. Per quanto riguarda la distribuzione dell'energia cinetica massima, va osservato innanzitutto come i valori siano ovunque piuttosto bassi ($< 2\ 000$ J/kg). I picchi massimi si riscontrano tra gli abitati di Perrero e Prali (tra 1 200 e 1 900 J/kg), e provengono dalle aree 29, 33, 48, 49 e 50, mentre nel resto del settore di valle studiato si mantengono costantemente al di sotto di 1 000 J/kg (**figura 2.7.65**).

Per ciò che concerne infine l'indice di suscettività, il parametro maggiormente significativo in quanto tiene conto sia della probabilità di rottura che delle volumetrie dei massi coinvolti, è possibile notare come questo assuma i valori più elevati lungo il tratto ubicato tra gli abitati di Perrero e Prali, nel settore di versante sottostante l'area omogenea n° 29, mentre in tutte le restanti zone assume valori tendenzialmente più modesti (**figura 2.7.66**).

Nella valle Germanasca, la distribuzione dell'energia massima e della suscettività sembrano evidenziare una correlazione abbastanza netta, in quanto ad alti valori della prima corrispondono sempre valori elevati della seconda.

Unica eccezione l'area omogenea n° 12, che presenta alti valori di energia associati ad una bassa suscettività. Ciò è spiegabile considerando che i cinematismi evidenziati durante i rilievi speditivi di terreno in quest'area risultano associati ad una modesta volumetria dei blocchi coinvolti, che limita il valore di tale indice.

Figura 2.7.65 Distribuzione dell'energia cinetica massima relativa alle aree omogenee n° 29 e n° 49. In rosso i valori energetici più alti

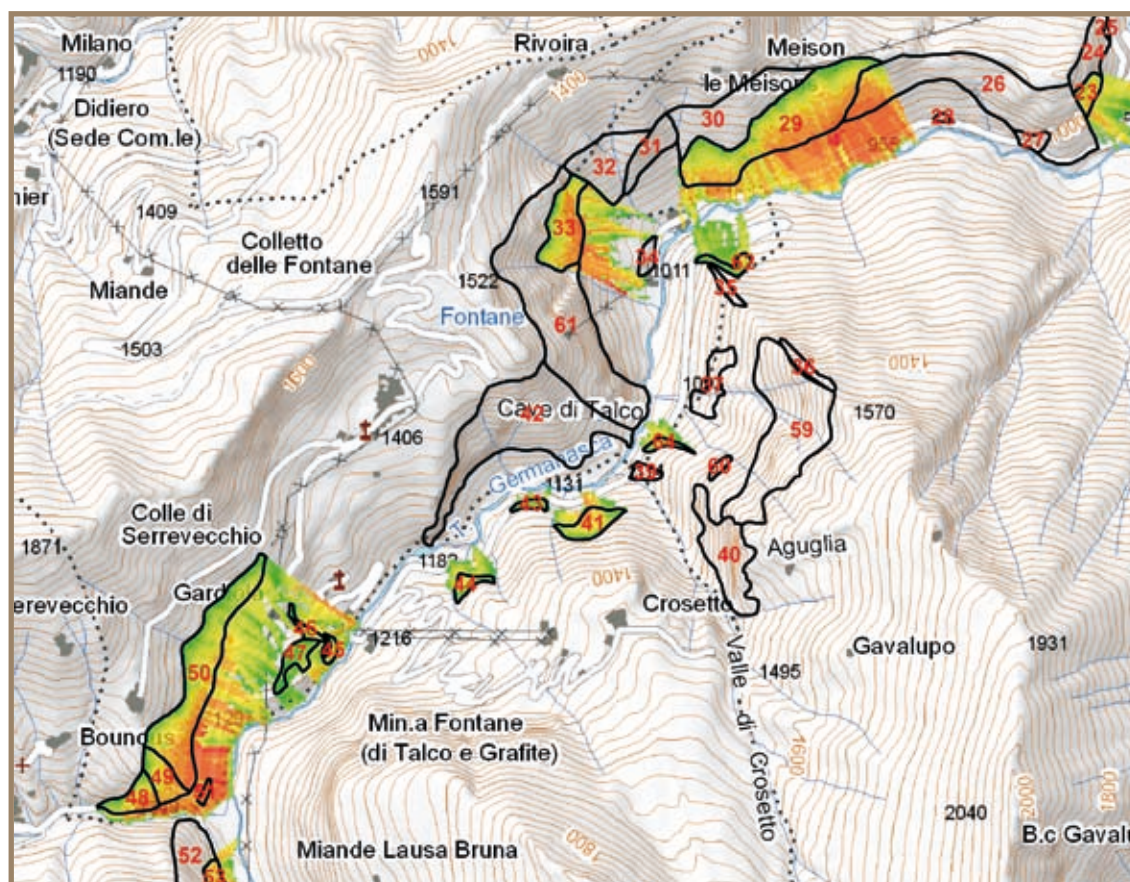
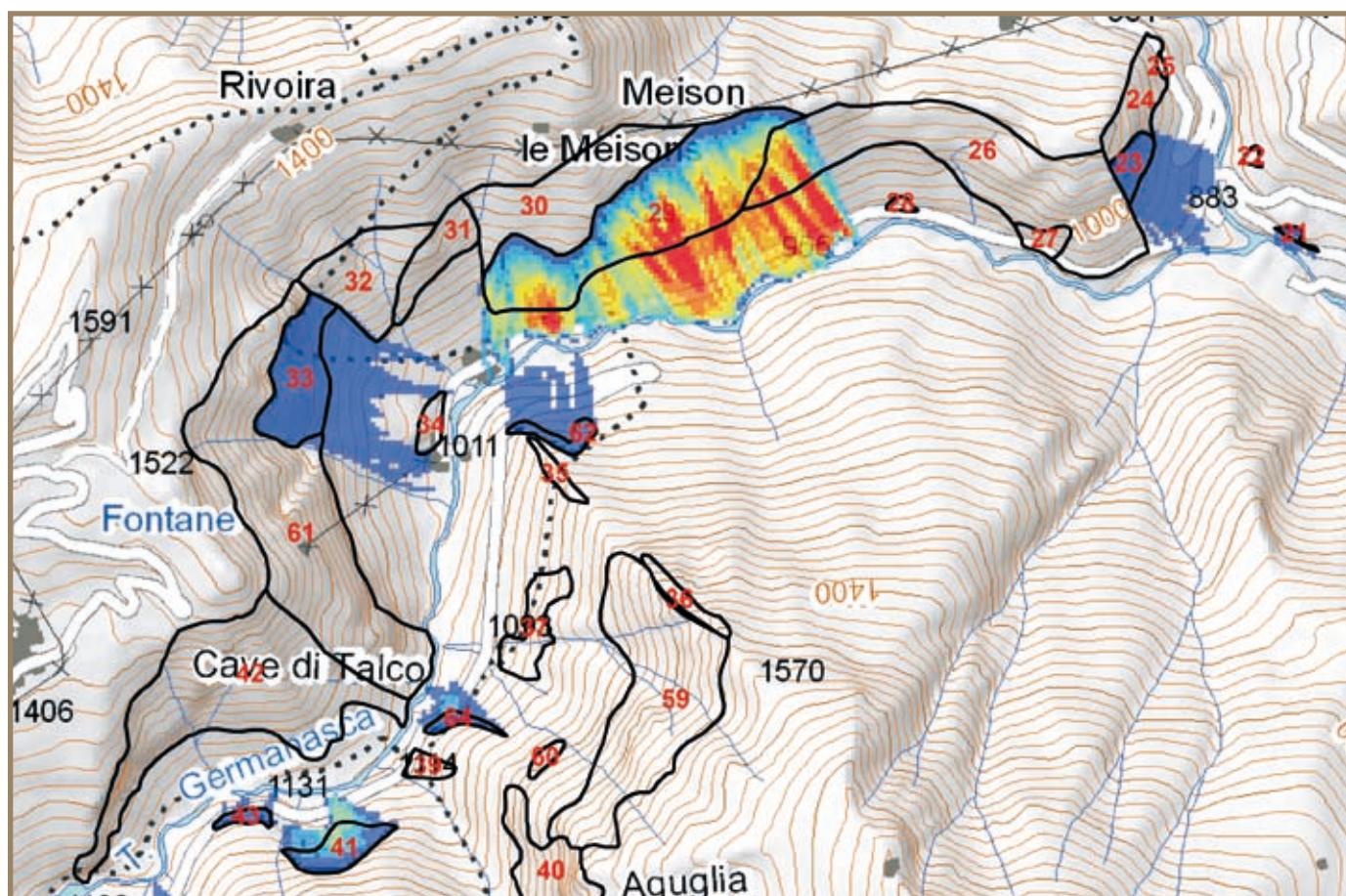


Figura 2.7.66 Distribuzione dell'indice di suscettività relativo all'area omogenea n° 29. In rosso i valori più alti



2.7.6 VALLE TANARO

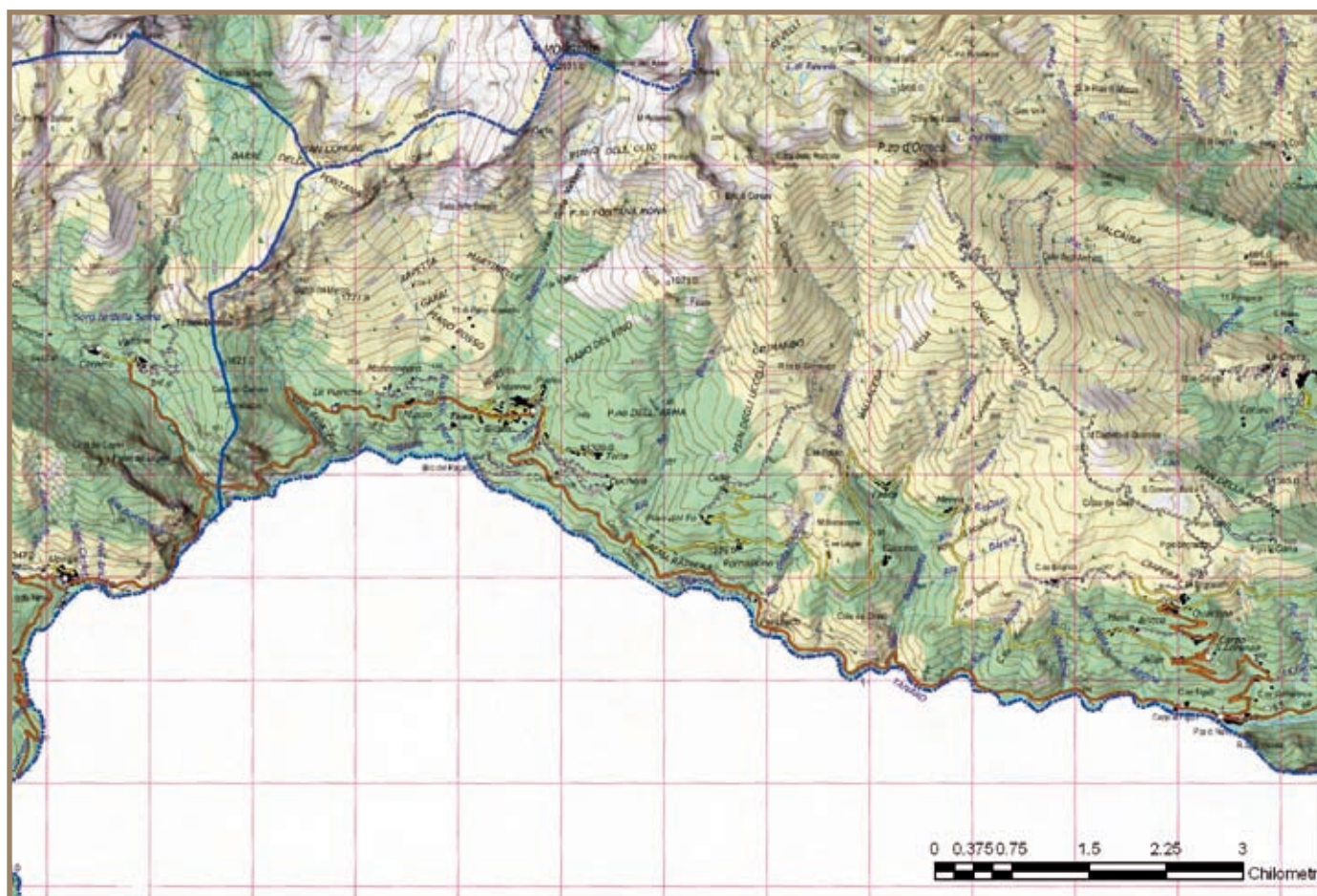
Inquadramento geografico e geologico

Daniele Bormioli, Luca Bertino - Arpa Piemonte

La valle Tanaro, incisa dal corso d'acqua omonimo, principale affluente di destra del Po, è la valle più meridionale del cuneese e, considerato lo sviluppo di circa 50 km del tratto montano, anche la più lunga delle Alpi Liguri. Fittamente boscosa nella parte meno elevata, lascia gradualmente spazio agli estesi alti pascoli della testata chiusi ai lati da cime rocciose, essenzialmente di natura calcareo-dolomitica, tra le più elevate di questo settore alpino. Caratteristica peculiare del settore, conseguente alla natura calcarea del substrato, è l'impressionante sistema di grotte che, con uno sviluppo complessivo di circa 150 km, fa di questa zona una delle principali aree carsiche dell'Italia.

Il settore alto della valle a sviluppo est-ovest, direttamente interessato dal presente studio, è completamente compreso entro i comuni di Ormea e di Briga Alta (**figura 2.7.67**). La dorsale montuosa occidentale che va dalla cima Missun (2 355 m) alla punta Marguareis (2 652 m) passando per il monte Bertrand (2 402 m) e la cima di Pertega (2 404 m) definisce il confine con il versante sinistro idrografico della francese valle Roja mentre il crinale determinato dalla punta Marguareis (2 652 m), dalla cima delle Saline (2 614 m), dal monte Mongioie (2 631 m) e dal Pizzo d'Ormea (2 476 m) costituisce il limite naturale con le vallate monregalesi del Corsaglia, dell'Ellero e del Pesio; verso meridione il corso d'acqua, che a monte della diramazione della valle Tanarello assume la denominazione di torrente Negrone, stabilisce il limite con il territorio della provincia di Imperia.

Figura 2.7.67
Inquadramento geografico dell'alta valle Tanaro



L'arteria stradale in relazione alla quale è stato svolto lo studio relativo alle problematiche di dissesto per crollo è rappresentata dalla SP 154 che, con uno sviluppo di circa 31 km, mette in comunicazione gli abitati di Ponte di Nava e Upega. La strada, che nel suo sviluppo offre splendidi scorci sui massicci calcarei

delle Alpi Liguri, si svolge fino a Viozene in salita prevalentemente tra boschi, poi in piano, tra imponenti pareti rocciose, in corrispondenza delle quali la strada si fa stretta e spesso priva di protezione verso valle, in particolar modo nel tratto che attraversa la Gola delle Fascette (**figura 2.7.68**); oltre la gola, passando attraverso appezzamenti prativi, in breve si raggiunge l'abitato di Upega.



Figura 2.7.68 La SP 154 in corrispondenza della Gola delle Fascette sovrastata da a) area omogenea n°1, b) area omogenea n°3



delle Fuse, puntando in direzione sud-ovest, si abbandona la fascia permo-carbonifera a favore della successione mesozoica Brianzonese che risulta esposta in modo ottimale fino al termine della Gola delle Fascette; i litotipi in affioramento sono rappresentati da conglomerati formati da clasti quarzosi (Verrucano), quarziti del Trias inferiore (Quarziti di Ponte di Nava), dolomie chiare che verso l'alto assumono colorazione scura (Dolomie di San Pietro dei Monti), calcari scuri del Dogger (Calcari del Rio di Nava) e calcari bianchi e rosati del Malm (Calcari di Val Tanarello) (**figura 2.7.69**).

In data antecedente al 1960 circa l'arteria stradale in esame terminava qualche chilometro a monte dell'abitato di Viozene a causa dell'esistenza della barriera naturale rappresentata dalla Gola delle Fascette, delimitata da pareti rocciose pressochè verticali. In seguito ad un accordo stipulato tra i comuni di Ormea e di Briga Alta e passando attraverso un iter progettuale piuttosto complesso durato almeno 30 anni, venne realizzato il collegamento tra Viozene e Upega; dei lavori di tracciamento della strada attraverso la Gola delle Fascette, attuati mediante massiccio impiego di esplosivo, si fece carico la Provincia di Cuneo così come della successiva manutenzione.

A livello geologico l'intero settore in esame è compreso entro l'Unità di Ormea (Vanossi, 1965; 1972; 1974), la più esterna e profonda delle falde Brianzonesi attualmente affioranti in superficie. La struttura è relativamente semplice: in sintesi, i litotipi appartenenti a questa unità formano il fianco superiore e la cerniera di una piega pluri-chilometrica coricata verso sud, accompagnata da pieghe minori a tutte le scale (Società Geologica Italiana, 1991).

Da Ponte di Nava, procedendo in direzione ovest verso la testata della valle, si corre parallelamente alla direzione degli strati e della grande piega; fino a 3 km oltre l'abitato di Viozene si attraversano terreni appartenenti al tegumento permo-carbonifero rappresentati da peliti (Peliti di Case Valmarecca), conglomerati cataclasati del Verrucano associati a vulcaniti e piroclastiti fini (Membro di Case Pollaio), ignimbriti riolitiche (Porfiroidi del Melogno), metapeliti quarzo-sericitico-cloritiche (Scisti di Viola).

Poco oltre l'intersezione della strada con la Valle

Figura 2.7.69 Geologia della valle Tanaro (estratto dalla Carta Geologica d'Italia a scala 1:100 000)

Legenda

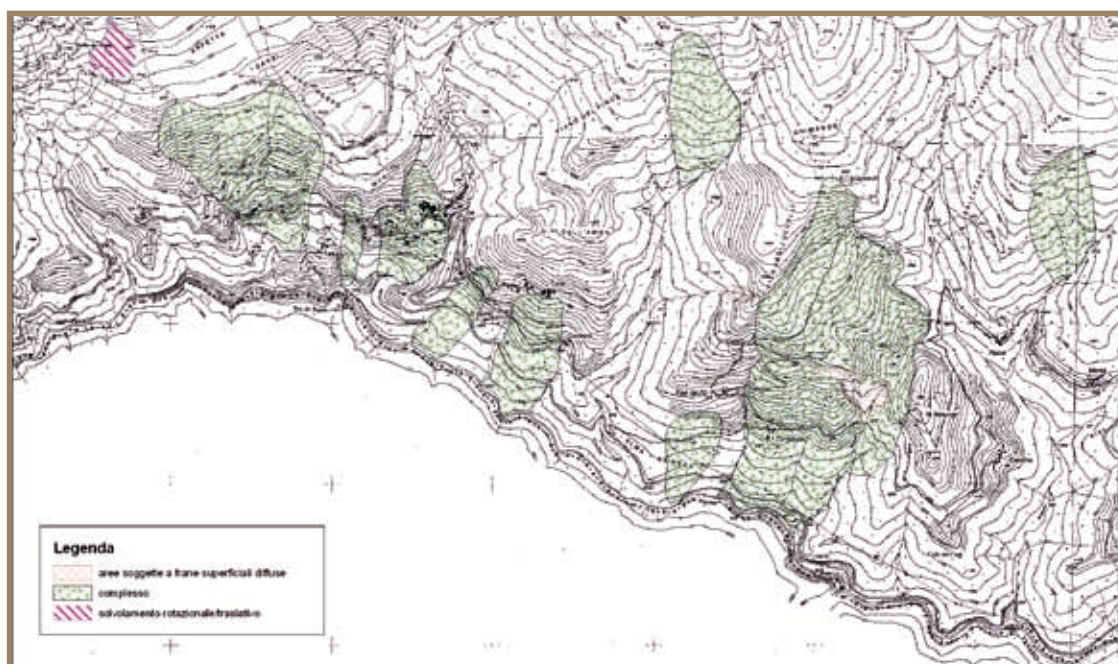
pr (verdolino) arenosisti (Flysch), Eocene; Cr (verde) calcari marnosi e calcari scistosi, Cretaceo; Gl (azzurro) calcari marmorei e tabulari senza fossili, Giurassico; Tm (rosa) calcari grigiastri dolomitici compatti o brecciati, Triassico; Tl (viola) quarziti bianche e verdicce e scisti quarziticci, Triassico; ω (marrone) porfidi quarziferi di tipi svariatissimi, Permiano; Csc (grigi) scisti sericitici grigi, Carbonifero



Dal punto di vista geomorfologico le forme del territorio in oggetto, come spesso succede in ambito alpino, sono il risultato del modellamento di origine glaciale di età pleistocenica, le cui evidenze attuali più facilmente riconoscibili sono rappresentate da rocce montonate e da massi erratici, al quale si è sovrapposta la recente ed attuale attività fluvio-torrentizia; senza trascurare il ruolo fondamentale che la diversa natura litologica del substrato e l'orientazione delle principali superfici di discontinuità che lo caratterizzano esercitano in termini di forma e pendenza dei versanti.

In relazione al modellamento del paesaggio non meno importante è il ruolo che rivestono i fenomeni franosi, discretamente rappresentati a livello areale nel settore considerato (figura 2.7.70). Si tratta principalmente di frane a tipologia complessa delle quali la più rappresentativa è la frana di Pornassino oggetto di monitoraggio strumentale da parte di Arpa Piemonte.

Figura 2.7.70 Carta delle frane desunta dal SIFRAP (Sistema Informativo Frane Piemontesi di Arpa Piemonte)



Il fenomeno franoso di Pornassino, che occupa una porzione di versante di forma allungata con superficie di circa 25 000 m², ha subito ricorrenti riattivazioni in epoca storica, tanto da giustificare il toponimo di “Sliggia della Madonna” sulla Carta degli Stati Sardi del 1848. Il 21 novembre 1926 un volume di materiale allora stimato in circa 8 000 000 m³ si dislocò lungo il versante con meccanismi combinati di scivolamento traslazionale e colata, causando un parziale intasamento del torrente Tanaro; fenomeno analogo, anche se di magnitudo di molto minore, si ripeté il 7 novembre 1956. Da allora si segnalano solo minori colamenti di materiale detritico sciolto, proveniente dalle imponenti scarpate denudate che definiscono il movimento principale.

Ricerca storica

Daniele Bormioli, Luca Bertino - Arpa Piemonte

Le informazioni storiche riguardanti problematiche di dissesto per crollo sulla SP 154 che la ricerca condotta ha reso disponibili sono raccolte nel Sistema Informativo Geologico di Arpa Piemonte (SIGeo); la fonte di tali informazioni è costituita dalle segnalazioni degli eventi di crollo più significativi inviate dagli uffici comunali di Ormea e di Briga Alta e dall'Amministrazione Provinciale agli enti regionali competenti in materia di viabilità e di dissesto. L'insieme dei dati raccolti si riferisce esclusivamente agli ultimi 10 anni, risulta frammentario e non particolarmente dettagliato limitandosi alla data dell'accadimento, ad una localizzazione non sempre precisa e ad una descrizione sommaria (tabella 2.7.21).

Il fenomeno meglio documentato e di maggior rilievo nell'ultimo decennio è certamente il crollo verificatosi il 29 ottobre del 2003 nel tratto della strada provinciale compreso tra le progressive km 13+000 e 13+200; il dissesto comportò la mobilitazione di blocchi di roccia di varia dimensione, alcuni superiori a 8 m³, per un totale di circa 1 000 m³ franati che determinarono il danneggiamento della carreggiata e la conseguente interruzione della circolazione viaria.

Tabella 2.7.21 Sintesi dell'analisi storica relativa al dissesto lungo i versanti in valle Tanaro

Comune	Località	Data	Descrizione
Briga Alta	Gola delle Fascette	20 giugno 1998	Caduta di pietre e massi
Briga Alta	Gola delle Fascette, in corrispondenza del paramassi metallico	6 maggio 1999	Frana determina l'ostruzione completa della carreggiata
Briga Alta	Gola delle Fascette, a monte della galleria naturale	19 settembre 1999	Carreggiata ostruita da un masso
Briga Alta	Gola delle Fascette, in corrispondenza del paramassi metallico	31 gennaio 2000	Frana determina l'ostruzione completa della carreggiata
Briga Alta	Al km 29,170	16 aprile 2005	Caduta masso
Briga Alta	Al km 14,500	21 ottobre 2005	Caduta masso
Ormea	Tra Ponte di Nava e Viozene	30 ottobre 1997	Strada ostruita da un masso
Ormea	Tra Ponte di Nava e Viozene al km 2,050	27 marzo 2000	Caduta di un masso di volume maggiore di 1m ³ ; distruzione della pavimentazione
Ormea	Tra Ponte di Nava e Viozene al km 4,000	29 marzo 2000	Caduta di massi di volume inferiore a 1 m ³
Ormea	Tra Ponte di Nava e Viozene al km 1,300	17 aprile 2000	Caduta di un masso di volume maggiore di 1 m ³
Ormea	Tra Ponte di Nava e Viozene al km 6,100	10 maggio 2000	Frana di massi e alberi
Ormea	Tra Ponte di Nava e Viozene al km 0,800	3 settembre 2000	Caduta massi
Ormea	Al km 13,200	28 agosto 2003	Caduta pietre
Ormea	Al Km 13,100	29 ottobre 2003	Frana in roccia di complessivi 1000 m ³ costituita da blocchi con volume massimo pari a 8 m ³ ; danneggiamento della carreggiata per circa 20 m
Ormea	Al km 13,150	7 novembre 2003	Frana
Ormea	Al km 13,200	19 agosto 2004	Caduta pietre
Ormea	Al km 8,000	27 ottobre 2004	Frana
Ormea	Al km 5,400	27 febbraio 2007	Caduta massi
	Tra Viozene e Upega	9 gennaio 1998	Strada ostruita da un masso
	Tra Viozene e Upega	19 agosto 1998	Caduta di massi con ostruzione della strada; intervento dei Vigili del Fuoco
	Tra Viozene e Upega	5 ottobre 1998	Frana di notevoli dimensioni costituita da grossi massi; ostruzione completa della carreggiata
	Tra Viozene e Upega	29 dicembre 1998	Carreggiata ostruita da un masso
	Tra Viozene e Upega	22 febbraio 2000	Caduta massi e frana

Rilievi di terreno

Daniele Bormioli, Luca Bertino - Arpa Piemonte

In valle Tanaro i rilievi di terreno hanno portato alla delimitazione di 25 aree omogenee, tutte ubicate sul versante sinistro idrografico sul quale si sviluppa a mezza costa la SP 154; la descrizione fotografica è stata realizzata facendo riferimento a 41 stazioni fotografiche (**figura 2.7.71**).

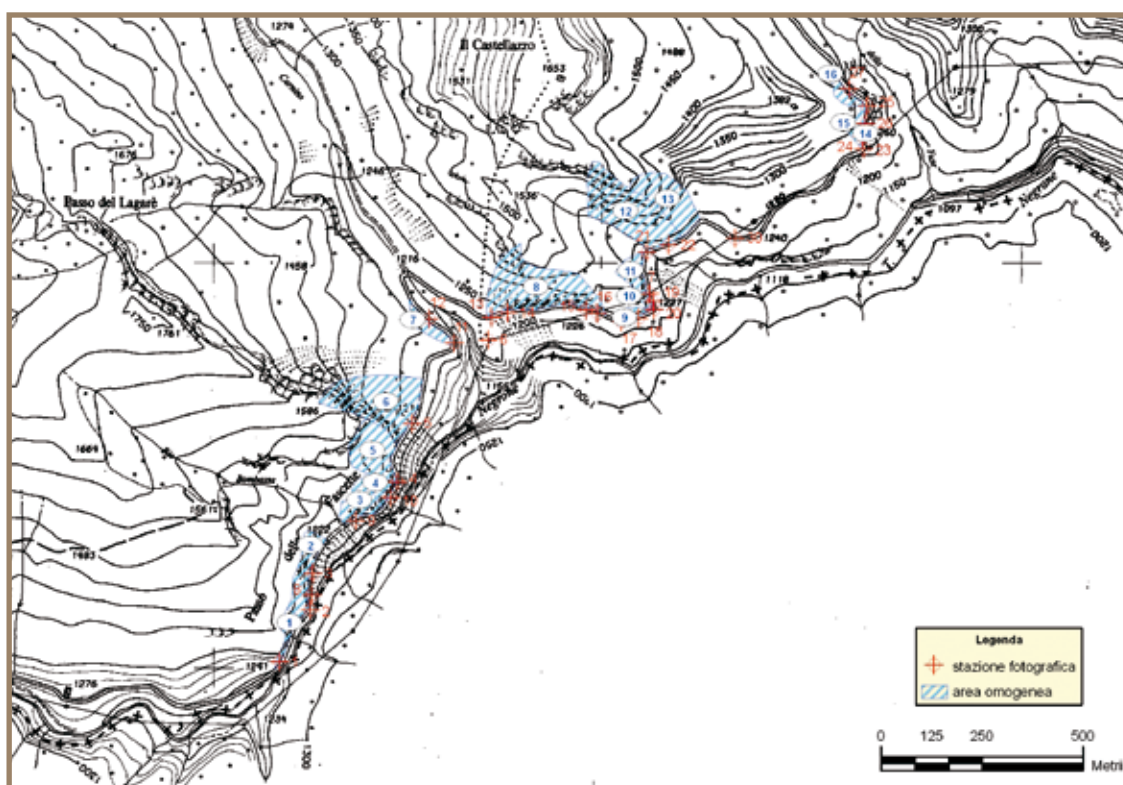
La frequenza maggiore di aree omogenee si riscontra in corrispondenza della Gola delle Fascette dove sono state perimetrare 16 zone in un tratto di strada di 3 km mentre nel tratto di circa 8 km che separa Viozene da Ponte di Nava i settori rocciosi, meno frequenti, hanno portato all'individuazione di sole 9 aree.

La superficie delle aree omogenee perimetrare è quasi sempre modesta, compresa tra 0.1 e 2.8 ha, ma generalmente inferiore all'ettaro.

L'assoluta maggioranza delle aree è localizzata a diretto contatto della strada; questa organizzazione delle pareti rocciose rispetto alla strada ha consentito di effettuare quasi sempre misure direttamente sulla roccia, evitando gli errori di valutazione che normalmente si commettono nell'esame a distanza. Per contro, la conformazione angusta della parte alta della valle Tanaro, associata all'impossibilità di raggiungere agevolmente il versante destro idrografico per una visione panoramica, non ha permesso di integrare i dati raccolti nei primi metri di sviluppo delle pareti rocciose con quelli che si possono ottenere dall'osservazione globale dei fronti rocciosi perimetrati.

L'assetto morfologico delle pareti rilevate è sostanzialmente differente tra la zona della Gola delle Fascette e la parte bassa compresa tra Viozene e Ponte di Nava: nel primo tratto la conformazione delle pareti è prevalentemente verticale fino ad assumere una strutturazione a tetto nei primi metri al di sopra della strada, morfologia questa non naturale, ma frutto dei procedimenti di sbancamento messi in atto per aprire la strada sul ripido e roccioso versante sinistro della Gola delle Fascette; l'altezza complessiva delle pareti è di solito modesta, inferiore a 15 m, anche se non mancano aree che si sviluppano per un centinaio di metri. A valle dell'abitato di Viozene le pareti rilevate sono meno inclinate, di altezza generalmente non superiore alla decina di metri e risultano spesso interrotte da vegetazione.

Figura 2.7.71 Aree omogenee e ubicazione delle stazioni di ripresa fotografica



I rilievi geostrutturali di terreno hanno evidenziato una situazione strutturale delle pareti rocciose in generale abbastanza complessa che dà luogo a situazioni di potenziale instabilità soprattutto nei primi 6-7 m a monte della strada laddove l'impiego dell'esplosivo durante le fasi di realizzazione della strada ha rilasciato i sistemi di fratturazione provocando un generale indebolimento dell'ammasso roccioso. Attraverso l'analisi ed il plottaggio dei singoli dati rilevati sono state individuate complessivamente 15 famiglie di discontinuità, successivamente denominate K1÷K15. Relativamente alla distribuzione areale dei vari sistemi e alla loro importanza si può notare che le prime 5 famiglie sono presenti in quasi tutta l'area e che al loro interno si possono ritrovare i sistemi che originano le principali instabilità dell'area stessa.

L'analisi dei dati strutturali evidenzia come la spaziatura assuma un andamento abbastanza costante tra "moderata" e "ampia". Tutti i sistemi sono invece caratterizzati da una persistenza valutabile come "medio-bassa" che limita la probabilità di distacchi di porzioni rocciose di dimensioni rilevanti e favorisce invece il crollo di blocchi di volumetria modesta, di solito inferiore a 0.1 m³ e raramente superiore a qualche metro cubo.

Per quanto riguarda la scabrezza i piani di discontinuità, nella maggior parte dei casi, sono piuttosto lisci e caratterizzati da un andamento piano o leggermente ondulato; le fratture, in generale, includono materiale di riempimento e, se si fa eccezione per alcune situazioni isolate, risultano asciutte.

I rapporti di intersezione tra i sistemi di discontinuità e le loro caratteristiche geomeccaniche hanno portato al riconoscimento nel corso dei rilievi di terreno di 33 cinematismi di cui 20 planari, 8 cunei, 3 ribaltamenti e 2 distacchi puri (figura 2.7.72).

Figura 2.7.72 Alcuni esempi dei cinematismi rilevati: a, b) cuneo; c) planare; d) ribaltamento



Analisi cinematica tramite stereogrammi

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

In questo paragrafo è descritto l'iter seguito per l'individuazione dei potenziali cinematismi (analisi cinematica) all'interno delle aree omogenee di tipo 1 o di tipo 2 in cui sono stati suddivisi i versanti analizzati in alta valle Tanaro. Al fine di illustrare la procedura seguita ed i risultati ottenuti, viene riportato un esempio corrispondente ad un'area omogenea significativa; si rimanda al materiale contenuto nel DVD allegato al presente lavoro, per consultare i dati relativi all'intera valle.

A partire dai risultati del rilievo speditivo di terreno, per ciascuna area omogenea l'analisi cinematica consiste in:

- 1 rappresentazione stereografica equatoriale della giacitura media del fronte e delle discontinuità presenti;
- 2 individuazione e verifica dei potenziali cinematismi osservati in sito, cioè verifica che la giacitura delle discontinuità rispetti le condizioni cinematiche per l'instabilità illustrate al paragrafo 2.4.2 (**figura 2.4.1**);
- 3 individuazione di eventuali ulteriori cinematismi, possibili dal punto di vista geometrico ma non indicati dal rilievo.

Nel caso della valle Tanaro, il rilievo speditivo di terreno ha evidenziato una situazione strutturale delle pareti in generale piuttosto complessa, che dà luogo a numerose situazioni di potenziale instabilità ben visibili anche tramite osservazione dal fondovalle. In una prima fase sono stati infatti rilevati 33 potenziali cinematismi, di cui 20 scivolamenti planari, 8 scivolamenti a cuneo, 3 ribaltamenti e 2 distacchi puri. In seguito all'analisi cinematica condotta sulle rappresentazioni stereografiche e di una successiva ulteriore verifica in sito, che ha costituito un importante *feedback* all'intera fase di definizione dei cinematismi (Rocca, 2007), si è arrivati a definire un totale di 95 cinematismi, di cui 25 scivolamenti planari, 63 scivolamenti a cuneo, 5 ribaltamenti e 2 distacchi puri. Di questi, il cinematismo per ribaltamento osservato nell'area omogenea n° 20 è stato in seguito escluso dall'analisi poiché fatto crollare artificialmente nel corso di un intervento di messa in sicurezza della strada. Non sono state inoltre condotte analisi di stabilità per i cinematismi per distacco puro, la cui probabilità di rottura viene assunta cautelativamente pari a 100%. Dei 92 cinematismi analizzati, 27 sono stati segnalati dal rilievo e 65 derivano dall'analisi cinematica sugli stereogrammi.

Le analisi cinematiche e la loro successiva verifica in sito hanno consentito di evidenziare come differenti modalità di rilievo influenzino sostanzialmente non solo le misurazioni di giacitura ma anche la definizione dei cinematismi. In particolare, in una zona come quella dell'alta valle Tanaro, dove il versante è molto acclive e la strada stretta, le osservazioni vengono quasi sempre fatte da distanza molto ravvicinata. Questo porta spesso a perdere la vista d'insieme e di conseguenza a sottovalutare cinematismi di grandi dimensioni a favore di quelli più piccoli. Dove invece le pareti non sono accessibili (come per esempio nell'area n° 4, descritta in dettaglio nel seguito) ed è quindi necessario ricorrere ad osservazioni a distanza, le misurazioni sono relative a blocchi piuttosto grandi (come si può notare dai dati riportati nel data base in allegato) ed è possibile che i cinematismi che formano blocchi di piccole dimensioni vengano trascurati. La difficoltà di stimare la giacitura dei piani attraverso l'osservazione a distanza si riflette inoltre in una elevata variabilità sulla giacitura delle famiglie di discontinuità rilevate.

L'analisi cinematica sugli stereogrammi è stata condotta non solo per i valori medi di giacitura del fronte e delle discontinuità ma anche tenendo conto della variabilità della giacitura stessa, al fine di non trascurare la possibilità di formazione di un volume potenzialmente instabile per effetto di variazioni dei parametri geometrici. Solo nel caso in cui il rilievo abbia evidenziato un potenziale cinematismo riferito ad una variazione locale del fronte non sono state condotte ulteriori analisi cinematiche.

A titolo di esempio si riporta in dettaglio il caso dell'area omogenea n°4, situata in località Passo delle Fascette. Si tratta di un affioramento di tipo massivo, formato da rocce carbonatiche, avente grado di fratturazione moderato ed aspetto inalterato. L'area è compresa tra due pronunciate curve della strada; il litotipo in affioramento è dato da calcare scuro.



Figura 2.7.73 Parete corrispondente all'area omogenea n° 4, sita in località Passo delle Fascette

di base K1, giunto K4 e svincolo laterale K2. Si ricorda che in questo caso l'analisi di stabilità è fortemente influenzata dalla forma e dalla snellezza del blocco per cui il rilievo, condotto in quest'area ad una certa distanza dal versante, assume un'importanza fondamentale sull'analisi di stabilità.

La **figura 2.7.73** mostra una vista panoramica del versante.

In questa area l'angolo di immersione (α) del fronte può assumere valori compresi tra un minimo di 110° ed un massimo di 130° , con un valore medio di 120° , mentre l'angolo di inclinazione (ψ) varia tra 70° e 90° , con un valore medio di 80° . Sono state inoltre individuate e misurate in sito 4 famiglie di discontinuità; la **tabella 2.7.22** riporta i valori medi e gli intervalli di variazione delle giaciture misurate. I valori medi delle giaciture dei piani di discontinuità e del fronte sono state inserite nello stereogramma riportato in **figura 2.7.74** e con la rappresentazione stereografica è stata condotta l'analisi cinematica.

Un solo cinematismo è stato rilevato in sito: il ribaltamento di un blocco di forma prismatica con piano

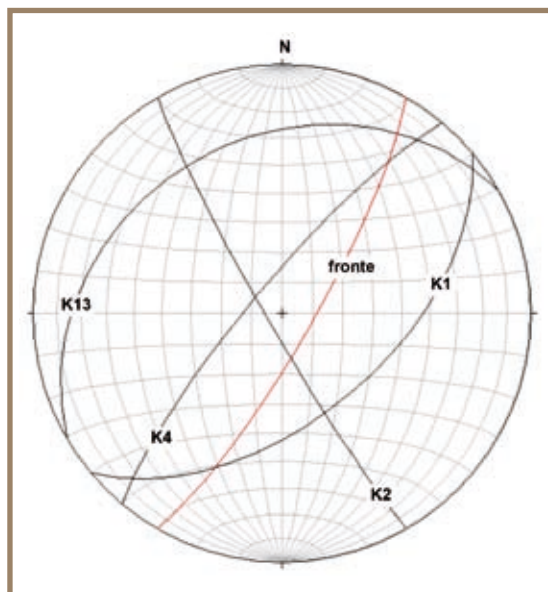
Tabella 2.7.22

Caratteristiche di giacitura delle famiglie di discontinuità rilevate nell'area omogenea n° 4

Famiglia	Immersione (α)		Inclinazione (ψ)	
	media	variabilità	media	variabilità
K1	140°	$\pm 10^\circ$	55°	$\pm 10^\circ$
K2	240°	$\pm 10^\circ$	85°	$\pm 5^\circ$
K4	310°	$\pm 10^\circ$	80°	$\pm 5^\circ$
K13	330°	$\pm 5^\circ$	30°	$\pm 5^\circ$
fronte	120°	$\pm 10^\circ$	80°	$\pm 10^\circ$

Figura 2.7.74

Stereogramma relativo all'area omogenea n° 4



Dall'osservazione dello stereogramma sono poi emersi i seguenti ulteriori potenziali cinematismi:

- scivolamento planare sul piano K1, con possibile giunto di trazione K4 e direzione di scivolamento pari alla giacitura del piano K1;
- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K1 e K2, con possibile giunto di trazione K4 e direzione media di scivolamento (retta di intersezione) pari a $\alpha = 157^\circ$, $\psi = 54^\circ$;
- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K1 e K13, con possibile giunto di trazione K2 e direzione media di scivolamento pari a $\alpha = 53^\circ$, $\psi = 4^\circ$;
- scivolamento a cuneo per intersezione tra i piani K4 e K13, con possibile giunto di trazione K2 e direzione media di scivolamento pari a $\alpha = 38^\circ$, $\psi = 13^\circ$.

Tutti i cinematismi ricavati dallo stereogramma sono risultati possibili dalle successive analisi di stabilità; in particolare è bene precisare che tra questi, è stato inserito lo scivolamento planare generato dagli stessi

piani (K1 e K4) coinvolti nel ribaltamento, in quanto, nel caso di blocchi poco snelli, il suo fattore di sicurezza potrebbe essere inferiore a quello per ribaltamento; chiaramente i due cinematismi si escludono a vicenda ma potrebbero avvenire entrambi in diversi punti dell'area omogenea. Lo stesso vale per i cinematismi a cuneo formati dall'intersezione del piano K1 con discontinuità appartenenti ad altre famiglie.

Per quanto riguarda le altre aree omogenee individuate lungo la valle Tanaro, si rimanda alle schede contenute nel DVD allegato.

Analisi di stabilità

Marta Castelli, Claudio Scavia, Cristina Occhiena - Politecnico Torino

Al termine della fase di analisi cinematica, mediante l'applicazione dei programmi di calcolo meccanico-probabilistici PlaSMon (Pisani, 2005), Wintam (Major *et al.*, 1974) e Toppling Stones (Allodi e Castelli, 2007), è possibile determinare la probabilità di rottura per ogni cinematismo evidenziato. A tal fine è necessario (come illustrato nel paragrafo 2.4.4 e nei manuali di ciascun programma riportati nel DVD in allegato) compilare un file di *input* per ciascuno, all'interno del quale sono specificate le caratteristiche geometriche e meccaniche del cinematismo stesso e le relative distribuzioni di frequenza.

Non avendo a disposizione alcun dato sulle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso, in particolare i parametri di resistenza delle discontinuità in sito, difficili da determinare nel corso del rilievo speditivo, sulla base dei litotipi presenti e di esperienze precedentemente sviluppate per altri siti, si sono considerati su tutte le superfici di discontinuità un angolo d'attrito costante $\phi = 25^\circ$ e una coesione $c = 0$. La scelta dell'angolo di attrito è giustificata dal fatto che le superfici di discontinuità si presentano particolarmente lisce e interessate dalla presenza di riempimento. Per quanto riguarda la coesione va osservato che il rilievo speditivo non consente di stimare l'entità di eventuali ponti di roccia; per questo motivo la coesione si considera nulla a favore di sicurezza. Nessuna variabilità statistica viene considerata nel progetto per questi parametri.

Andando ad analizzare una zona geografica relativamente ampia e un numero di casi cinematicamente possibili notevole, non si è potuto inoltre compiere alcuna considerazione sulla presenza dell'acqua all'interno delle discontinuità; per questo motivo si è scelto di compiere le simulazioni in condizioni drenate, ovvero in assenza di acqua in pressione.

Per quanto riguarda le dimensioni dei blocchi potenzialmente instabili, dove indicato vengono assunti i valori medi forniti dal rilievo di terreno; nel caso in cui il cinematismo non sia stato osservato in sito vengono invece considerate dimensioni unitarie (fittizie). È necessario notare che, a causa delle semplificazioni geometriche e meccaniche introdotte nel progetto (discontinuità piane, assenza di coesione e di forze esterne ecc.), nel caso di potenziali instabilità per scivolamento la geometria dei blocchi non influisce sui fattori di sicurezza ma solo sui volumi calcolati per ciascuna estrazione di Monte Carlo. Per questo motivo i volumi indicati nella **tabella 2.7.23** hanno una validità limitata nel caso in cui il cinematismo non sia stato rilevato. Nel caso di cinematismi per ribaltamento invece la geometria del blocco è fondamentale per il calcolo del fattore di sicurezza, motivo per cui vengono presi in conto unicamente quelli segnalati dal rilievo.

Per quanto riguarda i parametri di giacitura dei piani coinvolti in ciascun cinematismo, forniti in senso statistico, ad essi viene associata una distribuzione di frequenza uniforme corrispondente all'intervallo di variazione fornito dal rilievo speditivo. Questo significa che qualsiasi valore compreso tra il minimo ed il massimo valore della distribuzione ha la stessa probabilità di essere estratto nel corso delle simulazioni di Monte Carlo. Questa forte semplificazione è legata al grado di dettaglio con cui vengono forniti i dati dal rilievo di terreno, come specificato al paragrafo 2.4.4.

Per ciascun cinematismo sono state effettuate 1 000 estrazioni di Monte Carlo. I risultati delle analisi svolte

Tabella 2.7.23 Risultati delle analisi svolte per l'area omogenea n° 4

Cinematismo		F_s (-)			Volume (m ³)		Casi possibili	P_f -possibili (%)	P_f (%)
tipo	discontinuità	min	med	max	min	max			
ribaltamento	K1-K4	0.70	0.99	1.28	0.25	0.42	514	54.67	28.10
planare	K1	0.22	0.33	0.46	$6.1 \cdot 10^{-2}$	0.49	505	100	50.50
cuneo	K1-K2	0.23	0.49	0.74	$3.3 \cdot 10^{-2}$	62.11	997	100	99.70
cuneo	K1-K13	3.51	11.53	49.34	7.48	352.99	773	0	0
cuneo	K4-K13	2.61	4.84	8.68	6.61	66.57	158	0	0

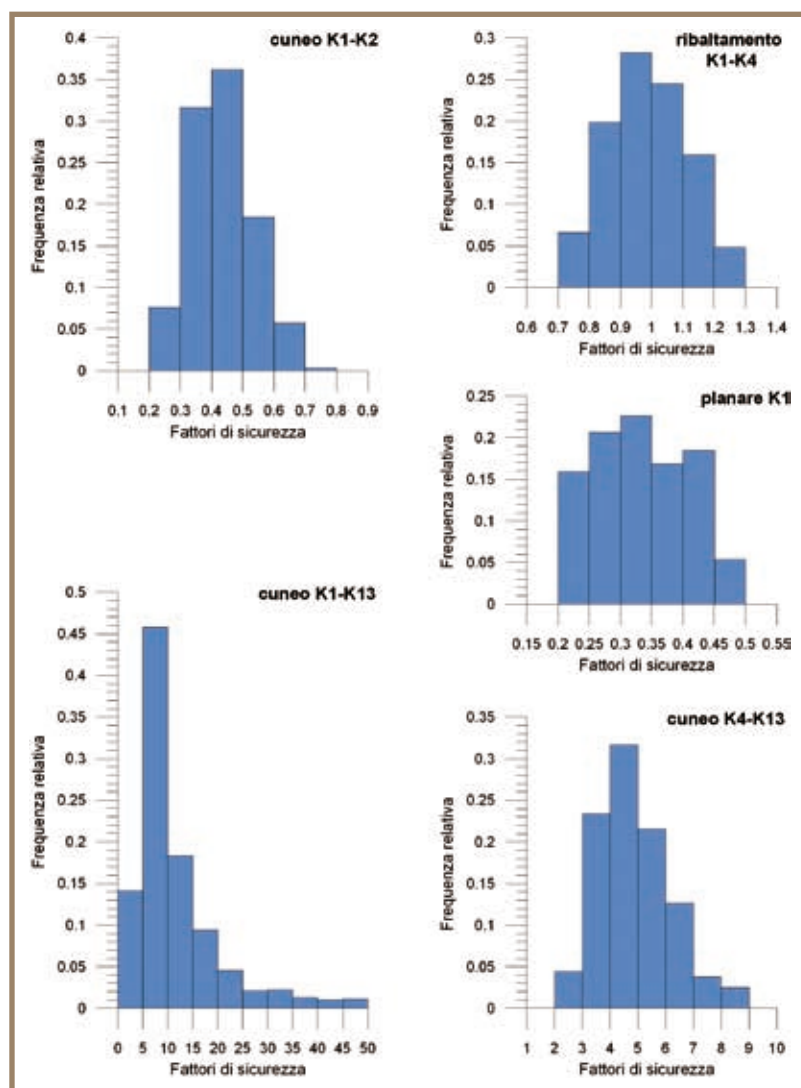
sono schematizzati nella **tabella 2.7.23**, in termini di fattore di sicurezza (F_S) minimo, medio e massimo, volume minimo e massimo (con le limitazioni specificate sopra per quanto riguarda i cinematismi risultanti unicamente dall'analisi dello stereogramma), numero di casi staticamente e cinematicamente possibili (paragrafo 2.4.4), probabilità di rottura (P_f) calcolata con riferimento ai soli casi possibili e probabilità di rottura calcolata con riferimento alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo. Si ricorda che nelle successive fasi del progetto PROVIALP si fa riferimento a quest'ultimo valore di P_f , al fine di tenere conto nel risultato probabilistico del fatto che alcune combinazioni dei parametri non portino a definire volumi potenzialmente instabili all'interno dell'area omogenea.

In **figura 2.7.75** si riportano infine gli istogrammi rappresentanti la distribuzione relativa dei fattori di sicurezza campionati per ciascun cinematismo analizzato.

Dall'analisi dei risultati emerge che:

- per il ribaltamento del blocco formato dai piani K1, K4 e K2, dei 514 casi possibili campionati, a causa della ridotta snellezza dei blocchi, solo 281 sono risultati instabili ($F_S < 1$), pari al 54.67%, che corrisponde a P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili. Rapportando il numero di casi instabili alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo si ottiene invece P_f ridotta al 28.10%. Il valore medio di F_S è risultato 0.99 ed in nessun caso esso è superiore a 1.3;

Figura 2.7.75 Istogrammi di frequenza relativa dei fattori di sicurezza calcolati nell'area omogenea n° 4



- per lo scivolamento planare su K1, tutti i 505 casi possibili campionati sono risultati instabili ($F_S < 1$), con valore medio di $F_S = 0.33$. P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili risulta perciò pari al 100%, mentre essa si riduce al 50.50% se rapportata alla totalità delle estrazioni di Monte Carlo effettuate;
- per lo scivolamento a cuneo K1-K2, tutti i 997 casi possibili campionati sono risultati instabili ($F_S < 1$), con valore medio di $F_S = 0.49$. P_f calcolata con riferimento ai soli cinematismi possibili risulta perciò pari al 100%, mentre essa si riduce al 99.70% se rapportata alla totalità delle estrazioni di Monte Carlo effettuate;
- per lo scivolamento a cuneo K1-K13, a causa della bassa inclinazione della retta d'intersezione, nessuno dei 773 casi possibili campionati è risultato instabile. Tutti i fattori di sicurezza calcolati sono risultati piuttosto alti, con un valore medio pari a 11.53, ed in alcuni casi il cinematismo è stato considerato staticamente impossibile ($F_S > 50$). La probabilità di rottura risulta perciò nulla con riferimento sia ai soli cinematismi possibili, sia alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo. Tale cinematismo è stato perciò escluso dalle successive analisi;
- per lo scivolamento a cuneo K4-K13, sono stati campionati solo 158 casi possibili. Anche in questo caso, a causa della bassa inclinazione della retta d'intersezione, nessuno di essi è risultato instabile.

Tutti i fattori di sicurezza calcolati sono risultati piuttosto alti, con un valore medio pari a 4.84. La probabilità di rottura risulta perciò nulla con riferimento sia ai soli cinematismi possibili, sia alle 1 000 estrazioni di Monte Carlo. Anche questo cinematismo è stato perciò escluso dalle successive analisi.

In sintesi per i cinematismi presenti all'interno dell'area omogenea n° 4 è stato calcolato (escludendo i cunei con P_f nulla):

- F_s minimo pari a 0.22, corrispondente allo scivolamento planare su K1;
- F_s massimo pari a 1.28, corrispondente al ribaltamento del blocco formato dai piani K1, K4 e K2;
- P_f minima pari a 28.10%, corrispondente al ribaltamento del blocco formato dai piani K1, K4 e K2;
- P_f massima pari a 99.70%, corrispondente al cuneo formato dai piani K1 e K2.

Si rimanda al file contenuto nel DVD allegato per la consultazione della tabella generale recante i risultati delle analisi estese a tutti i cinematismi rilevati nell'intera Alta Valle Tanaro.

Analisi di run out

Luca Mallen - Arpa Piemonte

Ultimate le analisi di stabilità e stimata una probabilità di rottura per ogni cinematismo identificato, si è proceduto alle analisi di *run out*.

Mediante l'utilizzo del software ROTOMAP GIS® è stata simulata una serie di crolli aventi origine dalle aree omogenee individuate durante i rilievi speditivi di terreno.

L'applicativo prevede l'inserimento di una serie di parametri di *input* relativi principalmente al modello digitale di terreno utilizzato, ai coefficienti di restituzione normale, tangenziale e al coefficiente di attrito, nonché agli angoli limite di urto, rimbalzo e decollo, al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari.

Il DTM utilizzato è a maglia 10 m e rappresenta un buon compromesso tra l'esigenza di avere un modello digitale che descriva nel modo più accurato possibile la morfologia dei versanti e la capacità di calcolo delle macchine che devono elaborare i dati, trattandosi di un'analisi arealmente molto estesa.

I coefficienti di restituzione utilizzati sono stati inizialmente ricavati dalla letteratura e successivamente adattati ai dati a nostra disposizione mediante operazioni di *back analysis* e sulla base di esperienze fatte in passato con studi simili in zone alpine.

Per quanto riguarda gli angoli limite di decollo, urto e rimbalzo si è optato per utilizzare una terna di angoli compresa nel range proposto dalla letteratura, ovvero tra 9° e 12° (valori peraltro già impostati come *default* negli esempi contenuti all'interno della guida dell'applicativo).

Per la scelta dei parametri relativi al numero di punti di partenza e alle deviazioni angolari infine, si è optato per la simulazione del distacco di un masso per ogni cella appartenente ad una determinata area omogenea, senza deviazioni angolari, dal momento che le aree omogenee di partenza sono spesso arealmente piuttosto estese, e quindi in grado di garantire la variabilità necessaria per una corretta stima dei valori energetici.

Ultimate le elaborazioni, l'applicativo restituisce una serie di grid relativi all'energia cinetica (media e massima), ai punti di arresto dei massi, alle altezze di volo e all'indice di suscettività.

Dalle elaborazioni svolte, in primo luogo si evidenzia come la SP 154, che corre lungo il fondovalle, sia fortemente interessata da potenziali fenomeni di crollo. L'analisi dei punti di arresto infatti, mostra come da tutte le aree omogenee oggetto di studio (aventi cioè caratteristiche di idoneità per un'analisi di terreno speditiva e probabilità di rottura > 0) si potrebbero staccare dei blocchi in grado di raggiungere ed attraversare la sede stradale.

A questo proposito è necessario notare che le zone del fondovalle prive di copertura dell'indice di suscettività possono avere significati diversi ed opposti. Esse possono indicare per esempio zone sottostanti aree omogenee di tipo 1 o 2 che non hanno dato evidenza di potenziali instabilità ($I_D = 0$), oppure zone sottostanti aree di tipo 3, riconosciute come potenzialmente instabili ma per le quali non è stato possibile condurre alcun rilievo di terreno, o ancora zone del versante su cui non è stato possibile avere alcuna informazione (per esempio perché coperte da vegetazione o troppo lontane dal punto di osservazione).

Al fine di evitare errori di interpretazione nella lettura delle carte prodotte, sono state perciò indicate sempre le aree omogenee di potenziale distacco, specificando la loro tipologia. Se esse non sono presenti o se si tratta di aree di tipo 3, nessuna considerazione può essere fatta sulla suscettibilità del fondovalle e della strada.

Per quanto riguarda la distribuzione dell'energia cinetica massima, i valori più alti (> 200 J/kg) si riscontrano nelle porzioni di versante sottostanti le aree omogenee 5, 6 e 8 (figura 2.7.76).

Per ciò che concerne infine l'indice di suscettività, il parametro maggiormente significativo in quanto tiene conto sia della probabilità di rottura che delle volumetrie dei massi coinvolti, è possibile notare come questo assuma

i valori massimi in corrispondenza del Passo Laiardo, nella porzione di versante sottostante l'area omogenea n° 20, mentre negli altri settori della valle assume valori tendenzialmente più modesti (**figura 2.7.77**).

Nella valle Tanaro, la distribuzione dell'energia massima e della suscettività non sembrano evidenziare particolari correlazioni, in quanto i picchi massimi dei due parametri risultano distribuiti in maniera del tutto indipendente l'uno dall'altro.

Figura 2.7.76 Distribuzione dell'energia cinetica massima relativa alle aree omogenee 5, 6 e 8. In rosso i valori energetici più alti

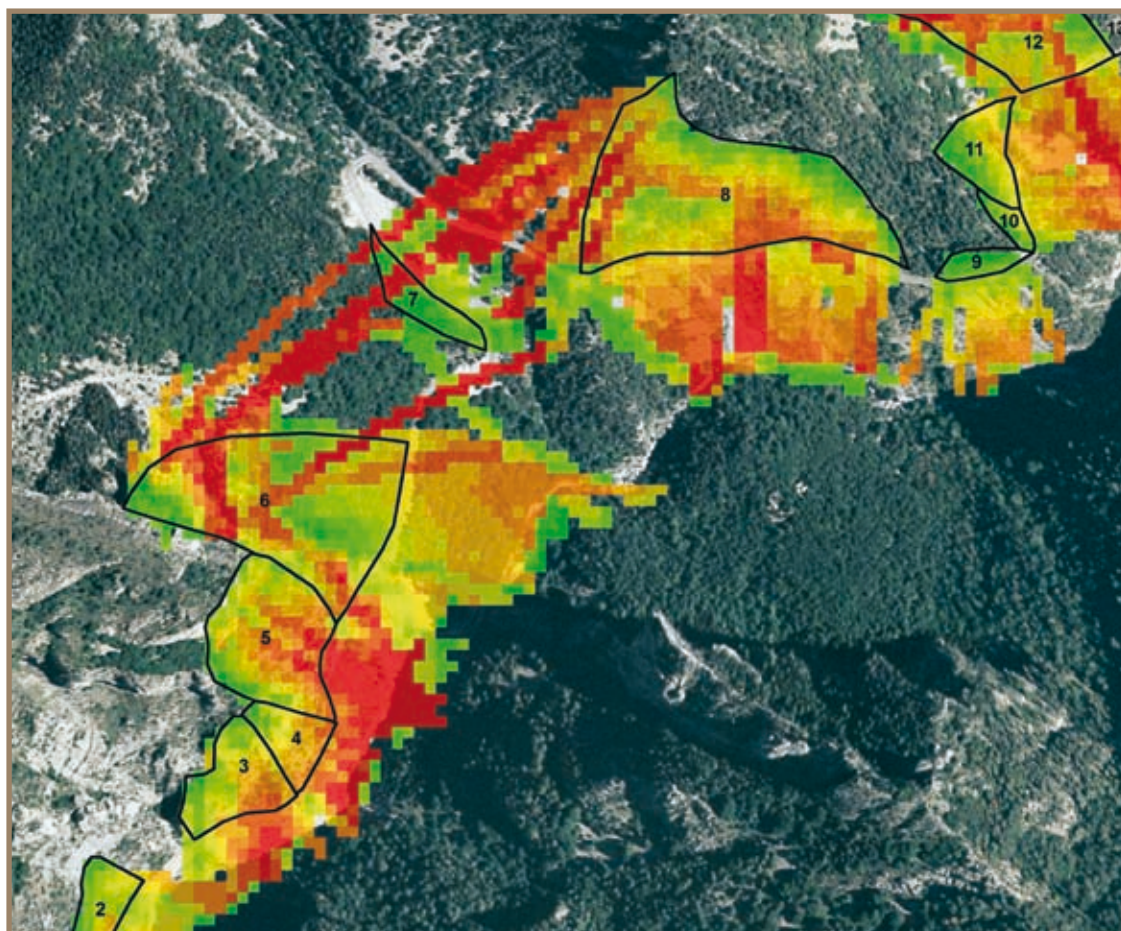
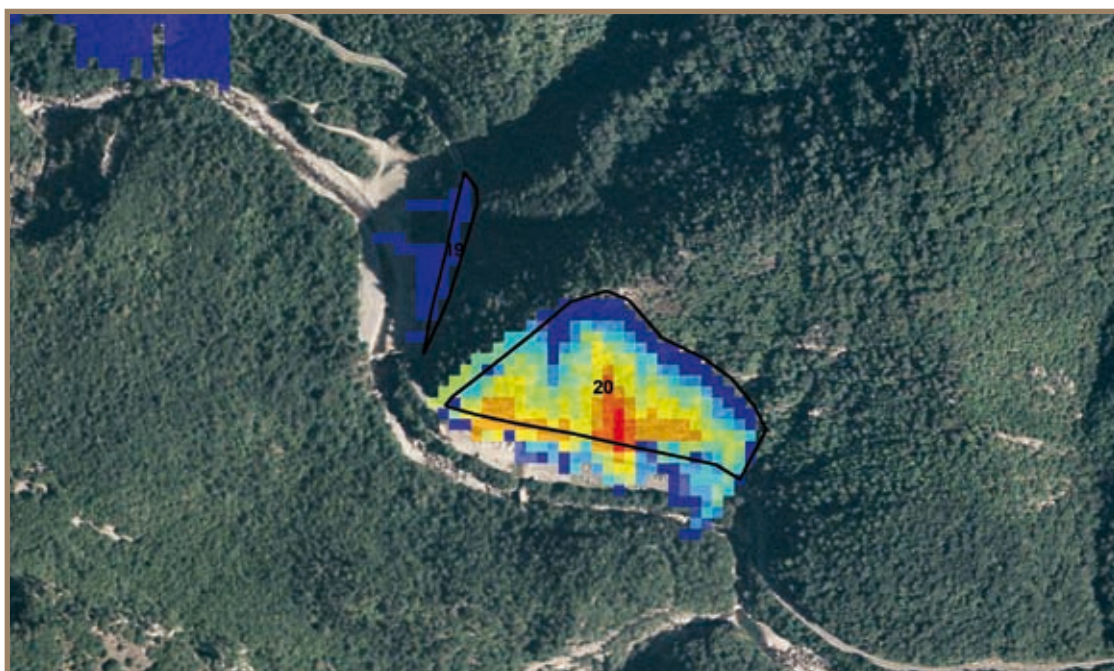


Figura 2.7.77 Distribuzione dell'indice di suscettività relativo all'area omogenea n° 20. In rosso i valori più alti



2.8 IL METODO DEI CONI

Stefano Campus¹, Marta Castelli², Luca Mallen¹
¹Arpa Piemonte, ²Politecnico Torino

2.8.1 Descrizione del metodo

Per la fase di valutazione delle aree di invasione, il progetto PROVIALP prevede l'utilizzo di un metodo di tipo *lumped mass* che simula la traiettoria di caduta dei massi ed è in grado di calcolare la loro velocità in ogni punto sulla base di parametri di restituzione energetica del moto.

In questo capitolo viene presentato, invece, un metodo per valutare in modo speditivo la massima

zona di invasione, senza dover fare riferimento a parametri di tipo meccanico, ma basandosi unicamente sulle caratteristiche geometriche del versante e sui dati storici, integrando tutto ciò con le informazioni sulla probabilità di distacco ricavate dalle analisi meccanico-probabilistiche.

Il metodo dei coni, detto anche metodo dello *shadow angle*, è una metodologia empirica basata sulla geometria del pendio studiato e sull'analisi di dati storici (Evans e Hungr, 1993) per individuare l'area di massima invasione di una frana da crollo. In particolare sono tre le zone di maggiore interesse (**figura 2.8.1**):

1. *source* o area di distacco;
2. *talus slope* o pendio;
3. *rockfall shadow* o piede del pendio.

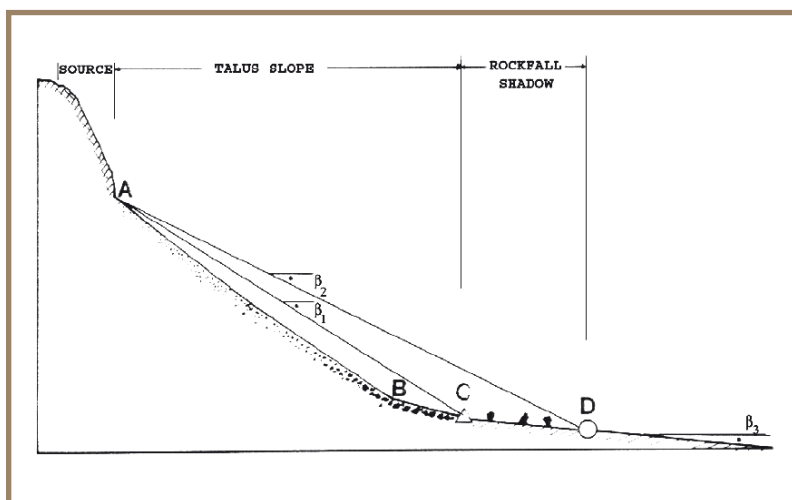


Figura 2.8.1 Diagramma schematico delle caratteristiche di un profilo di una traiettoria di una frana da crollo. A - C è il pendio con angolo medio β_1 (38°), A - D è il piede del pendio con angolo medio β_2 , mentre β_3 è l'angolo dell'accumulo (Evans e Hungr, 1993)

La zona denominata *rockfall shadow* (parte C - D in **figura 2.8.1**) è delimitata dal piede del pendio e dalla linea involucro dei punti corrispondenti alle massime distanze di arresto dei massi che si sono già distaccati, cioè quella parte coperta da blocchi sparsi che sono rotolati oltre la base del pendio. Tale zona è ovviamente quella maggiormente interessata dal pericolo crolli, anche se non sempre è riconoscibile la parte terminale del suo piede.

Si definisce quindi *shadow angle* l'angolo delimitato dal piano orizzontale e dalla retta che unisce l'apice del pendio e il limite massimo di arresto dei massi caduti, β_2 in **figura 2.8.1**. In letteratura, i valori di β_2 più frequentemente riportati sono intorno a $22^\circ - 38^\circ$, ma variano in un intervallo tra 22° e 38° (Evans e Hungr, 1993, Weiczorek et al., 1998); più l'angolo è piccolo, più il metodo viene considerato cautelativo.

Lo *shadow angle* permette quindi di stimare l'area di massima invasione di una frana da crollo.

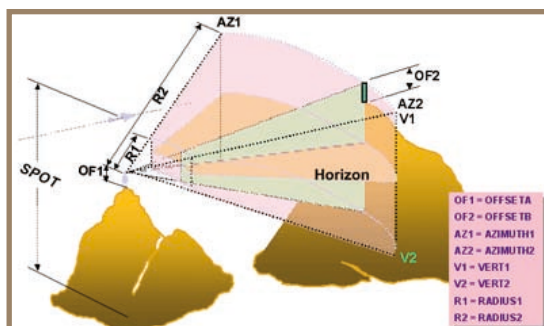
2.8.2 La funzione *viewshed*

Il metodo dello *shadow angle* è stato implementato mediante il software ESRI® ArcGIS 9.2, sfruttando la funzione interna *viewshed* che permette di valutare il grado di visibilità delle aree circostanti un determinato punto di vista, da parte di "ipotetici osservatori". Nel caso in esame, si è ipotizzato che le aree omogenee rappresentino gli osservatori e l'ampiezza della loro visuale (orizzontale e verticale) è definita in base ai parametri suggeriti dalla letteratura per il metodo dei coni. In particolare, la funzione *viewshed* identifica le celle in un grid di *input* che possono essere osservate da uno o più punti di vista o linee. Ogni cella nel grid di *output* riceve un valore che indica quanti punti di osservazione possono essere visti da ogni posizione. In presenza di un solo punto di osservazione, ogni cella "visibile" riceve il valore 1, tutte le altre celle il valore 0. I punti di osservazione possono essere determinati da elementi puntuali o lineari; in questo secondo caso vengono presi i nodi ed i vertici delle linee come punti di osservazione.

La **figura 2.8.2** descrive graficamente quali sono i parametri che regolano le funzioni *viewshed*; come esempio si è deciso di porre il punto d'osservazione sulla cima di una montagna, mentre la zona di osservazione

Figura 2.8.2

Rappresentazione grafica delle variabili necessarie alla definizione di un cono



OF1 - OFFSE TA
OF2 - OFFSE TB
AZ1 - AZIMUTH1
AZ2 - AZIMUTH2
V1 - VERT1
V2 - VERT2
R1 - RADIUS1
R2 - RADIUS2

è posta all'interno del cono che guarda a destra. È possibile definire l'altezza del punto d'osservazione, la direzione verso cui guardare e l'ampiezza orizzontale e verticale del cono.

Il punto di osservazione è sulla cima della montagna a sinistra (OF1 in figura 2.8.2); la direzione del viewshed è all'interno del cono che guarda a destra.

Si possono variare nove parametri di viewshed:

1. la quota altimetrica della superficie di osservazione (SPOT) come in figura 2.8.2;
2. la distanza verticale da sommare al valore delle quote del punto di osservazione (OFFSET A), come in figura 2.8.3;
3. la distanza verticale da sommare al valore delle quote di ogni cella (OFFSET B), come in figura 2.8.3;
4. il valore iniziale dell'angolo orizzontale per limitare la visuale (AZIMUTH1), come in figura 2.8.2, misurato in senso orario a partire dal nord (figura 2.8.4);
5. il valore finale dell'angolo orizzontale per limitare la visuale (AZIMUTH2), come in figura 2.8.2, misurato in senso orario a partire dal nord (figura 2.8.4);
6. il limite superiore dell'angolo verticale per limitare la visuale (VERT1), come in figura 2.8.5;
7. il limite inferiore dell'angolo verticale per limitare la visuale (VERT2), come in figura 2.8.5;
8. il raggio interno che limita la distanza della ricerca di aree visibili a partire da ogni punto di osservazione (RADIUS1), come in figura 2.8.6;
9. Il raggio esterno che limita la distanza della ricerca di aree visibili a partire da ogni punto di osservazione (RADIUS2), come in figura 2.8.6.

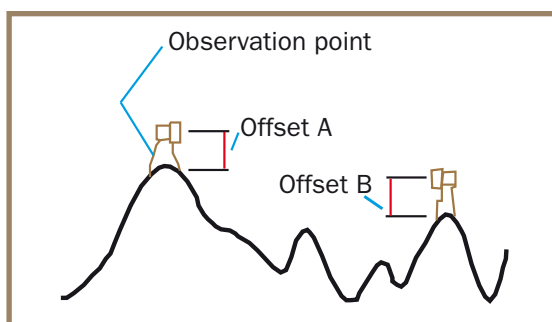


Figura 2.8.3 Definizione dei valori di compensazione (offset) da sommare alle quote delle celle

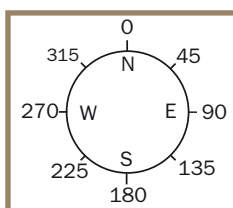


Figura 2.8.4 Sistema di coordinate rispetto al quale definire l'angolo di apertura orizzontale di un cono

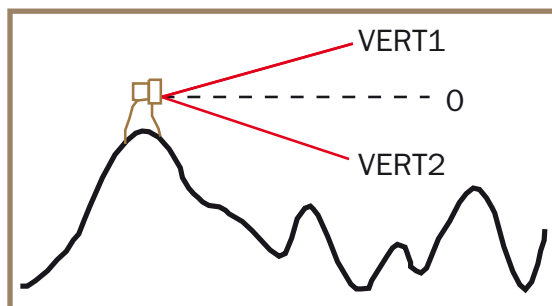


Figura 2.8.5 Definizione dell'angolo di apertura verticale di un cono

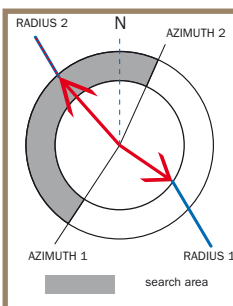


Figura 2.8.6 Definizione dell'area interessata dalla funzione viewshed

2.8.3 Applicazione del metodo

Il metodo illustrato è stato applicato a due località della valle Orco, nei comuni di Locana e Noasca, poiché si tratta di siti particolarmente attivi dal punto di vista dei crolli di blocchi e di cui si posseggono molte informazioni da rilievi e analisi storiche.

Per la definizione dei parametri necessari a definire "l'apertura" sia orizzontale sia verticale dei coni di osservazione, è stata svolta una ricerca bibliografica i cui risultati sono illustrati in tabella 2.8.1.

Tabella 2.8.1 Principali valori di angoli verticali desunti da ricerca bibliografica (in Terziano, 2006)

Anno	Autore	Angolo verticale (VERT)	Angolo orizzontale (AZIMUTH)
1972	Worobey	34°	-
1977	Lied	28°- 30°	-
1988	Evans e Hungr	27.5°	-
1993	Evans e Hungr	32°- 38°	-
1998	Weiczorek et al.	22°- 26°	-
1999	Weiczorek et al.	22°	-
2004	Crosta e Agliardi	25°- 60°	-
2005	Mayer e von Poschinger	27°- 30°	-

Come si può notare, i valori da attribuire all'angolo verticale sono compresi principalmente entro un intervallo di circa 15°, mentre non si ha a disposizione alcun valore significativo per l'angolo orizzontale. In effetti su questo parametro esistono moltissime incertezze legate alla difficoltà di risalire alle zone di distacco dei massi presenti al piede del versante nel corso di rilievi di terreno.

Inoltre, la maggior parte degli studi condotti in passato tramite il metodo dello *shadow angle* è di tipo bidimensionale e di conseguenza non necessita della definizione di un'apertura del cono sul piano orizzontale.

Per definire questo angolo, è stata svolta un'analisi parametrica sul sito di Exilles in valle di Susa, in cui è stata applicata una variazione azimutale di 90° - 45° - 3° (Terziano, 2006). Sulla base della conclusione che in quel contesto l'angolo che porta a risultati maggiormente realistici è 45°, si è deciso di applicare anche per le simulazioni di Locana e Noasca con i cono di osservazione con la medesima orizzontale di 45°, ovvero $\pm 22.5^\circ$ rispetto alla giacitura media del fronte.

Anche per l'angolo di apertura verticale si è fatto riferimento alle medesime simulazioni (Terziano, 2006), con l'adozione inizialmente del valore 35° come angolo ottimale per il metodo dello *shadow angle*.

Questi primi due parametri sono da considerarsi solamente come valori di partenza delle analisi, poiché provengono da simulazioni compiute su siti differenti da quelli della valle Orco con caratteristiche geologiche e morfo-strutturali differenti. Per questo motivo è stata compiuta successivamente una serie di verifiche sui dati di *output* e sono stati scelti i parametri d'ingresso sulla base di *back analysis* tarate sui siti in esame, così come descritto di seguito.

Infine, per la scelta del valore da assegnare al RADIUS, si è misurata l'ampiezza media del versante, dalla sommità dell'area omogenea fino al fondovalle, dove scorre il torrente Orco. Sulla base di ciò, è stata quindi effettuata un'analisi che coprisse un'area limitata a 1 000 m di estensione minima.

2.8.4 Analisi svolte e risultati

Le operazioni preliminari necessarie per l'applicazione della funzione *viewshed* consistono essenzialmente nel rendere le aree omogenee di cui al capitolo 2.3.2 sorgenti di un distacco e quindi come posizione di vista iniziale. Nel caso di studio, le aree omogenee di Locana e Noasca sono state trasformate in una griglia di punti che si trovano ad una distanza costante pari a 10 m, corrispondente alla maglia del DTM a disposizione. In questo modo è possibile individuare i punti di osservazione da cui si faranno partire i cono (**figure 2.8.7 e 2.8.8**). Ogni punto è posto nel baricentro di una cella del DTM ed ogni punto è considerato origine di un cono, con l'ipotesi quindi che ogni punto possa essere sorgente di un distacco. I parametri del cono vengono mantenuti costanti per tutti i punti (De Benedittis, 2007).

Per attribuire una componente probabilistica all'analisi, oltre al valore delle nove variabili sopra descritte necessarie per l'applicazione della funzione *viewshed*, sono stati anche inseriti i dati dei possibili cinematismi individuati per ciascuna area omogenea, corredati dalla loro probabilità, ricavata dalle simulazioni descritte nel capitolo 2.4. I risultati delle simulazioni sono riportati nelle **figure 2.8.9 e 2.8.10**.

Per verificare i risultati ottenuti, l'area evidenziata attraverso il metodo dei cono è stata sovrapposta alle aree interessate da crolli pregressi e diffusi censite dal progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) condotto da Arpa Piemonte (2004). Nelle **figure 2.8.11 e 2.8.12** sono riportate le sovrapposizioni.

Come si può notare i parametri scelti per l'analisi *viewshed* hanno portato in generale ad una sovrastima dell'area di influenza dei possibili crolli a partire dalle zone di distacco (aree omogenee) prese in considerazione dal progetto PROVIALP. Ciò si può notare sia dalla sovrapposizione dei dati forniti dal progetto IFFI sia considerando il fatto che vengono evidenziate anche aree poste sul versante opposto (oltre il fiume) e questo non è realistico.

Dal confronto tra le aree omogenee dei progetti PROVIALP ed IFFI si può notare che queste ultime sono in numero maggiore; ciò è dovuto al fatto che il progetto PROVIALP prende in considerazione solamente le aree che possono originare crolli in grado di interferire con l'asse viario. Occorre anche precisare che le aree soggette a crolli del progetto IFFI non distinguono le zone di distacco da quelle di invasione.

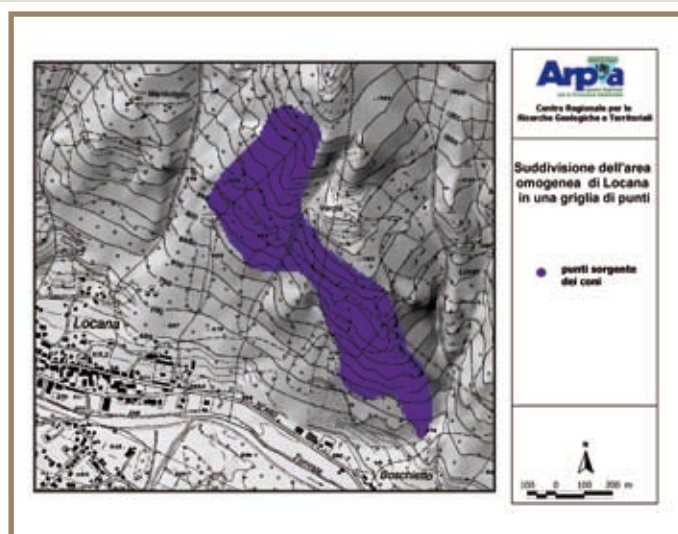


Figura 2.8.7 Suddivisione dell'area omogenea di Locana in un grigliato di punti

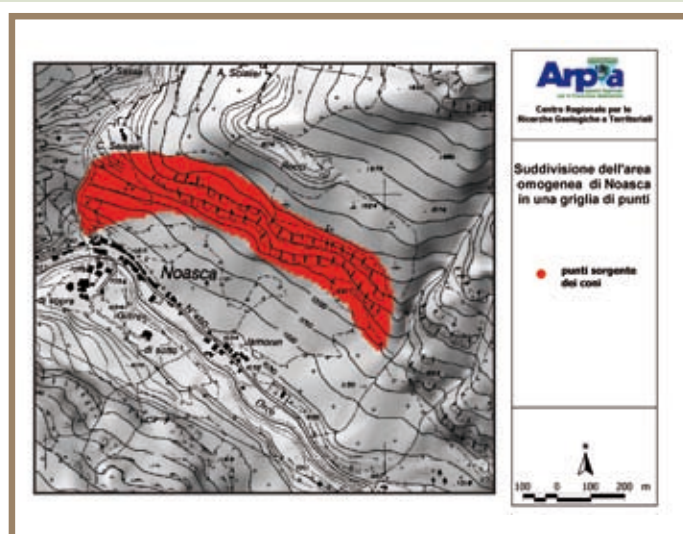


Figura 2.8.8 Suddivisione dell'area omogenea di Noasca in un grigliato di punti

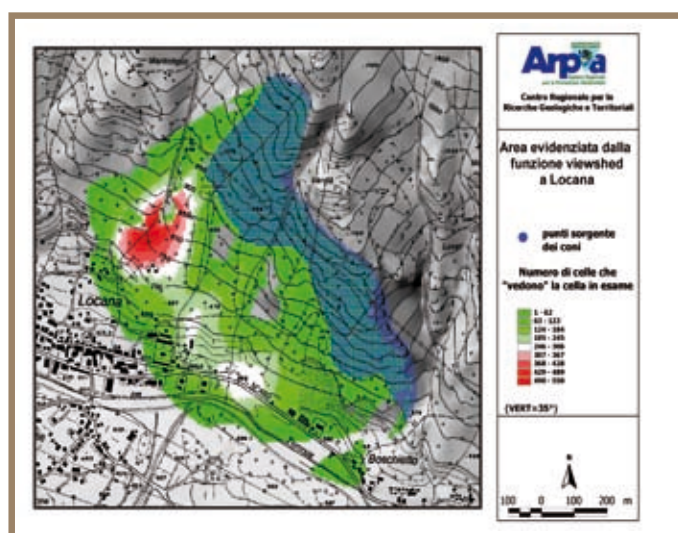


Figura 2.8.9 Area evidenziata dalla funzione viewshed a Locana, con angolo verticale pari a 35°

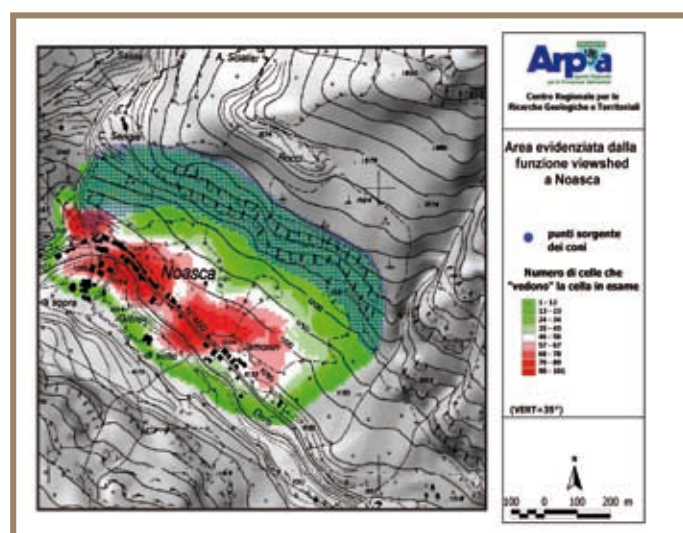


Figura 2.8.10 Area evidenziata dalla funzione viewshed a Nasca, con angolo verticale pari a 35°

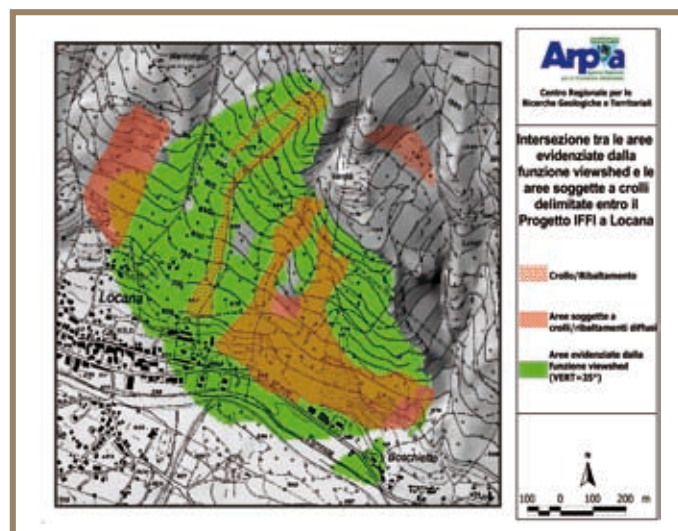


Figura 2.8.11 Intersezione tra le aree soggette a crollo derivate dal Progetto IFFI e le aree evidenziate dalla funzione viewshed a Locana, con angolo verticale pari a 35°

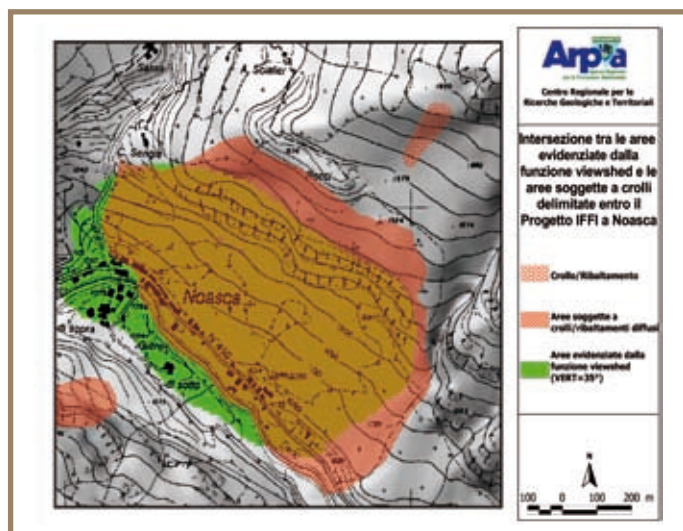


Figura 2.8.12 Intersezione tra le aree soggette a crollo derivate dal Progetto IFFI e le aree evidenziate dalla funzione viewshed a Noasca, con angolo verticale pari a 35°

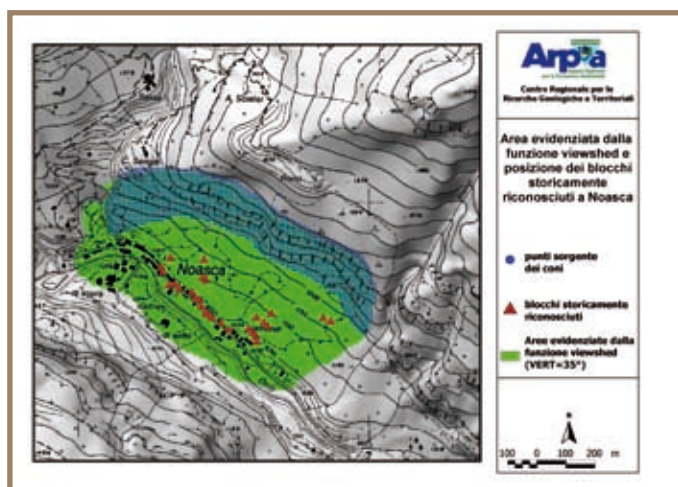


Figura 2.8.13 Confronto tra le aree evidenziate dalla funzione viewshed, con angolo verticale pari a 35°, e blocchi già caduti storicamente riconosciuti a Noasca

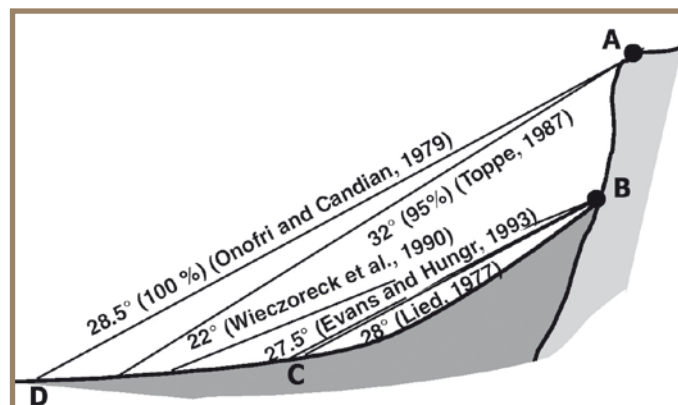


Figura 2.8.14 Valori angolari derivanti da analisi in cima o al piede del pendio (Crosta et al., 2001)

Le aree evidenziate dalla funzione *viewshed* trovano conferma anche attraverso il raffronto con le aree di frana desunte dal progetto IFFI, ma presentano ancora alcune differenze, in particolare nella zona in basso a destra della figura, sia nel caso di Noasca sia in quello di Locana. Una possibile spiegazione potrebbe essere connessa al fatto che la pendenza locale del versante è molto bassa e i coni originati dai punti di osservazione sovrastanti si trovano al di sotto della superficie del versante.

Nel caso di Noasca, tale sovrastima appare ancora più evidente se si confrontano le aree evidenziate dalla funzione *viewshed* e la posizione dei blocchi già caduti storicamente riconosciuti (figura 2.8.13).

Per tale motivo è stato necessario affinare l'analisi utilizzando parametri differenti dai precedenti; in particolare per quanto riguarda il valore dell'angolo verticale di apertura dei coni. Attraverso *back analysis*, è stato possibile ricavare un angolo proprio per ciascun sito, facendo riferimento alla linea d'involuppo dei punti d'arresto dei massi individuati storicamente. Infatti, come riportato nella figura 2.8.14 è possibile ricavare la quota del punto C, ovvero il piede del pendio dove si sono arrestati i massi e la quota del punto B, cioè il bordo inferiore dell'area di distacco dei massi; conoscendo questi due dati è infatti possibile ricavare un angolo che risulta essere lo *shadow angle* (Evans e Hungr, 1993).

Attraverso semplici correlazioni trigonometriche, sono stati ricavati i nuovi angoli verticali per ciascun sito; al sito di Noasca è stato assegnato un angolo di 27° rispetto alla verticale, mentre per quello di Locana un angolo di 30°. Come già descritto, tramite la funzione *viewshed*, a ciascun punto della zona di distacco viene associato un cono, la cui apertura è mantenuta costante. In realtà i coni dovrebbero avere parametri diversi a seconda del loro punto di origine, in funzione delle caratteristiche morfologiche del pendio.

Le figure 2.8.15 e 2.8.16 riportano i risultati della nuova simulazione e come si può notare le simulazioni trovano conferma confrontandole con i dati storici.

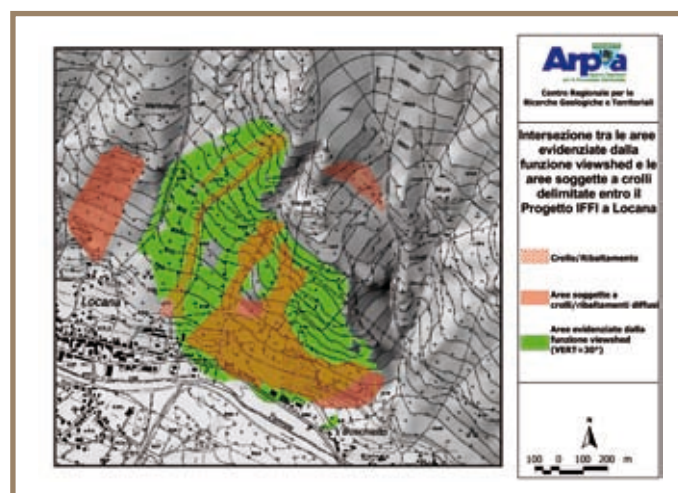


Figura 2.8.15 Intersezione tra le aree soggette a crollo derivate dal Progetto IFFI e le aree evidenziate dalla funzione viewshed a Locana, con angolo verticale pari a 30°

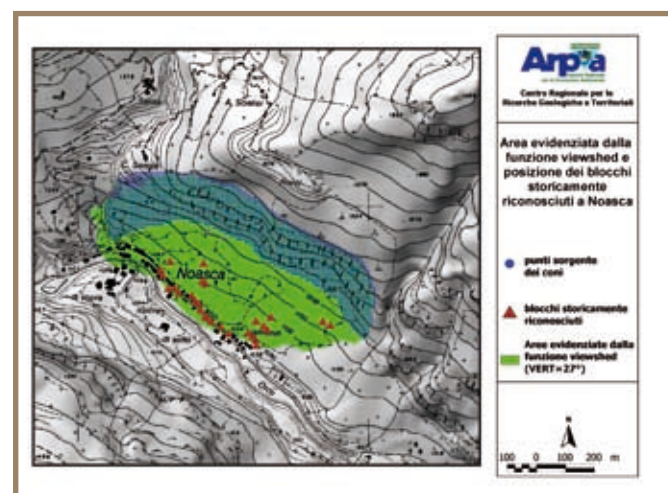


Figura 2.8.16 Confronto tra le aree evidenziate dalla funzione viewshed, con angolo verticale pari a 27° e blocchi già caduti storicamente riconosciuti a Noasca

2.8.5 Calcolo della pericolosità relativa

Il metodo descritto e applicato ai siti di Locana e Noasca individua, qualora si verificasse un distacco, un'area di invasione, ma non tiene conto della probabilità che esso si verifichi. Si è allora cercato di introdurre nel metodo una variabile che tenesse conto della probabilità di rottura relativa dei cinematismi individuati nel corso del progetto PROVIALP (De Benedittis, 2007).

Come descritto nel capitolo 2.4, a ciascuna area omogenea possono essere associati più cinematismi di rottura, ciascuno dei quali caratterizzato da una probabilità di rottura. Poiché l'ipotesi di base è che questi cinematismi sono indipendenti tra loro e possono tutti verificarsi da ciascun punto dell'area omogenea, utilizzando il metodo dello *shadow angle*, è come se si fossero creati, per ogni punto di osservazione, n coni sovrapposti, ciascuno con una propria probabilità.

La sovrapposizione dei coni potrebbe tradursi in una somma di probabilità, ma in questo modo il parametro perderebbe significato. È necessario osservare però che l'ipotesi di totale indipendenza dei cinematismi non è molto realistica, poiché, qualora se ne verificasse uno in un punto, da quello stesso punto non si potranno verificare ulteriori crolli.

Ipotizzando un singolo cinematismo per ciascun punto e ragionando sempre a favore di sicurezza, è possibile allora assegnare come probabilità globale all'area omogenea quella massima ottenuta tramite le simulazioni di Monte Carlo.

A questa probabilità globale occorre però attribuire un peso, in funzione del volume ipotizzato per ciascun cinematismo, dato che è vero che ogni cinematismo ha la propria probabilità di verificarsi, ma possono originarsi anche volumi differenti. Quindi per non trascurare crolli che hanno bassa probabilità, ma che mettono in gioco volumi rilevanti, si è scelto di assegnare ad ogni cinematismo un indice i :

$$i = P_r \cdot V \quad (2.8.1)$$

dove:

P_r probabilità che si verifichi il cinematismo

V volume del cinematismo

Calcolato l'indice i per ciascun i -esimo cinematismo presente nelle aree omogenee di Locana e Noasca, è possibile allora scegliere per ciascuna il maggiore, come indice di probabilità globale pesata dell'area omogenea.

$$I_p = [P_r \cdot V]_{\max} \quad (2.8.2)$$

Nelle **tabelle 2.8.2** e **2.8.3** sono riportati gli indici i per tutti i cinematismi calcolati per le aree omogenee in esame; si è scelto di assegnare il volume massimo riscontrato all'interno dell'area omogenea ai cinematismi di cui non si hanno informazioni sull'altezza e la larghezza dei blocchi (indicati con un asterisco).

Tabella 2.8.2 Valori dell'indice i per l'area omogenea di Locana

Località	Id_area	Cinematismo	Probabilità	Volume [m ³]	Indice i	Note
Locana	27	Planare 01	0.03	56	1.68	*
Locana	27	Cuneo 01	0.00	36	0.00	
Locana	27	Cuneo 02	0.61	56	34.16	
Locana	27	Cuneo 03	0.53	56	29.68	*

Tabella 2.8.3 Valori dell'indice i per le aree omogenee di Noasca

Località	Id_area	Cinematismo	Probabilità	Volume [m ³]	Indice i	Note
Noasca	43	Planare 01	0.50	30	15.0	
Noasca	43	Cuneo 01	0.17	40	6.8	
Noasca	43	Cuneo 02	0.51	40	20.4	
Noasca	43	Cuneo 03	0.01	40	0.4	*
Noasca	44	Planare 01	0.13	80	10.4	*
Noasca	44	Cuneo 01	0.40	48	19.2	
Noasca	44	Cuneo 02	0.33	80	26.4	
Noasca	44	Cuneo 03	0.20	80	16.0	*

Una volta assegnato il valore dell'indice I_p per ciascuna area omogenea è possibile originare un singolo cono per ciascun punto di osservazione; l'area individuata tramite la funzione *viewshed* è identica a quella precedente, ma è possibile calcolare per ciascun punto del DTM della zona di invasione un indice I di pericolosità relativa data da:

$$I = \frac{n \cdot I_p}{N_{tot}} \quad (2.8.3)$$

dove:

n numero di punti di osservazione da cui è vista una determinata cella (o il numero dei coni che si intersecano in quel punto)

N_{tot} numero di punti di osservazione dell'area omogenea

I_p indice di probabilità pesata dell'area di distacco

In **figura 2.8.17** è riportata la distribuzione dell'indice I per l'area individuata dalla funzione *viewshed* a Locana con un angolo verticale di 30°.

Nel caso in cui la zona di invasione sia generata dalla sovrapposizione di due o più aree omogenee di distacco con caratteristiche diverse, è necessario calcolare l'indice I separatamente in modo da distinguere i coni sulla base del punto sorgente.

Nella **figura 2.8.18** sono riportate le aree in cui i coni originati da due aree omogenee differenti si sovrappongono nel sito di Noasca.

In questo caso, dove i due coni si sovrappongono, l'indice I è dato dalla somma dei due valori originati dai due coni distinti:

$$I_{tot} = \frac{n_1 \cdot I_{p1}}{N_{1tot}} + \frac{n_2 \cdot I_{p2}}{N_{2tot}} \quad (2.8.4)$$

dove i pedici 1 e 2 rappresentano le aree omogenee sorgenti.

In **figura 2.8.19** è riportata la distribuzione dell'indice I per l'area di invasione dei massi a Noasca, con angolo verticale pari a 27°.

Per poter parlare di un indice di pericolosità relativa spaziale è necessario ancora osservare che in realtà occorrerebbe introdurre oltre alla probabilità e al volume anche la velocità con cui i blocchi rotolano a valle, in modo da avere un parametro di natura energetica che rappresenti l'intensità del fenomeno. Quest'ultimo parametro risulta assai difficile da definire nell'ambito del metodo dello *shadow angle* perché non si pos-

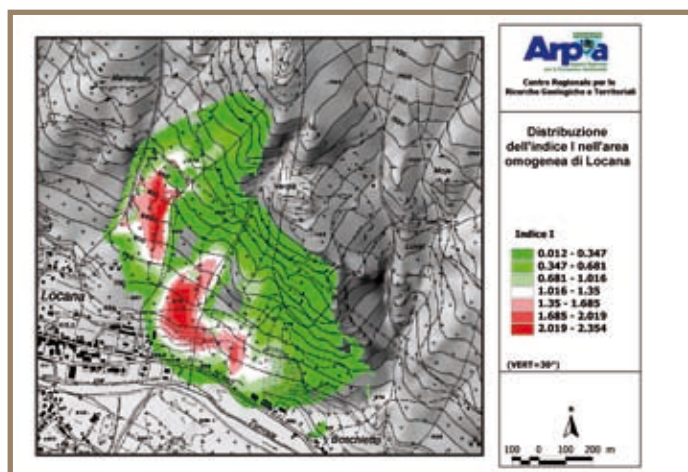


Figura 2.8.17 Distribuzione dell'indice I sul sito di Locana, con angolo verticale pari a 30°

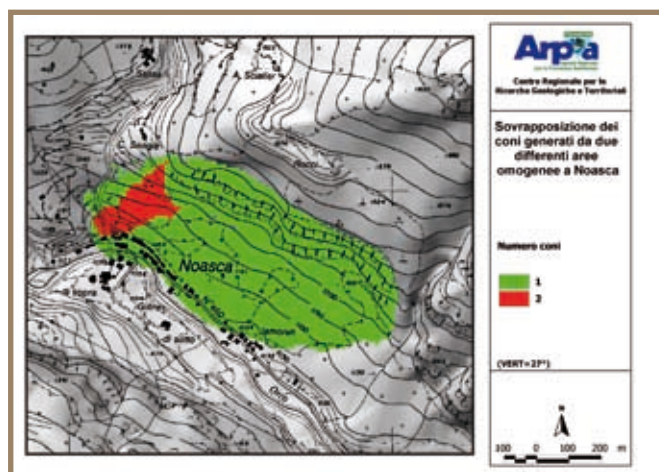


Figura 2.8.18 Sovrapposizione dei coni originati da due aree omogenee differenti nel sito di Noasca

sono conoscere le traiettorie dei massi e come essi disperdano la loro energia cinetica quando rimbalzano sul terreno.

Un metodo proposto in letteratura (Jaboyedoff e Labiouse, 2003) è stimare l'energia cinetica di un masso sulla base della sua energia potenziale come:

$$V = f_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (2.8.5)$$

dove:

f_v fattore che tiene conto della dispersione dell'energia cinetica lungo il percorso, posto pari a 0.9

g accelerazione di gravità

ΔH differenza tra la quota ideale del masso e quella del terreno (**figura 2.8.20**)

Allo stesso modo, se la massa m del masso è fissata, sulla base delle informazioni sul volume e sulle caratteristiche del materiale, è possibile risalire all'energia cinetica come:

$$E = m \cdot g \cdot \Delta H \quad (2.8.6)$$

In **figura 2.8.20** è riportato schematicamente il calcolo del valore di ΔH ; risulta evidente come sia difficile calcolare tale valore in ogni punto, dato che dipende dal punto esatto da cui si distaccherà il masso e dalla sua traiettoria. Per introdurre il parametro energia cinetica nel metodo dei coni occorrerebbe calcolare il valore di ΔH per ciascun cono originato da ogni punto di osservazione, rendendo eccessivamente complicata la procedura di calcolo.

Per parlare di pericolosità in termini assoluti occorre inoltre introdurre anche una variabile temporale, in modo da tener conto di quando si potrà verificare un cinematisimo. Per fare questo bisogna svolgere un'accurata analisi storica in modo tale da determinare periodi ciclici in cui si può verificare un fenomeno franoso.

Il metodo dello *shadow angle* non tiene conto di queste ultime due variabili e per questo motivo non è possibile parlare di pericolosità in termini assoluti, ma si può delimitare una porzione di territorio suscettibile, connotata da un indice di pericolosità relativa spaziale.

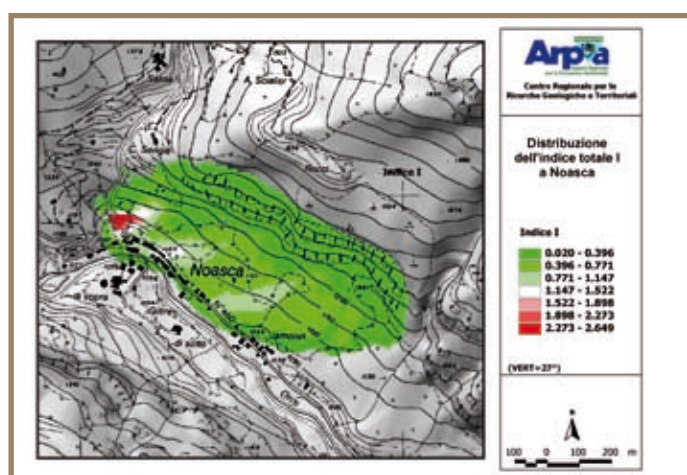


Figura 2.8.19 Distribuzione dell'indice I sul sito di Noasca, con angolo verticale pari a 27°

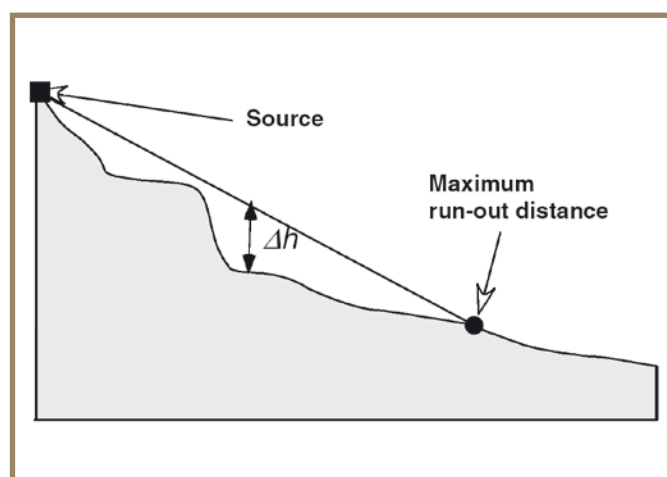


Figura 2.8.20 Metodo proposto per il calcolo dell'energia cinetica (Jaboyedoff e Labiouse, 2003)

2.9 ANALISI TRAMITE LIDAR

Stefano Campus¹, Marta Castelli², Sara Lìgorio², Andrea Lingua³, Andrea Biasion³, Leandro Bornaz³
¹Arpa Piemonte, ²Politecnico Torino, ³S.I.R. s.r.l.

2.9.1 Introduzione

Nel capitolo 2.3 è stata diffusamente dettagliata la metodologia per individuare e definire un'area omogenea dal punto di vista strutturale e cinematico e come sia necessario provvedere ad un rilevamento speditivo per caratterizzare in modo sufficiente i sistemi di discontinuità presenti nell'ammasso, essenzialmente dal punto di vista geometrico e non meccanico.

Al contempo, è stato eseguito un rilevamento di una parete rocciosa (oggetto di analisi nel Progetto) per mezzo di strumentazione laser scanner, approccio al momento considerato ancora non convenzionale ma che sta prepotentemente affermandosi nel campo della ingegneria dei versanti.

Come spiegato nel seguito, a partire dalla creazione di un modello di superficie denso e dettagliato della parete creato con il laser scanner, per mezzo di un software sviluppato dal Politecnico di Torino è stato possibile riconoscere e misurare l'orientazione delle principali famiglie di discontinuità e confrontare così i risultati ottenuti con il rilevamento eseguito nel progetto PROVIALP.

2.9.2 Tecniche LIDAR

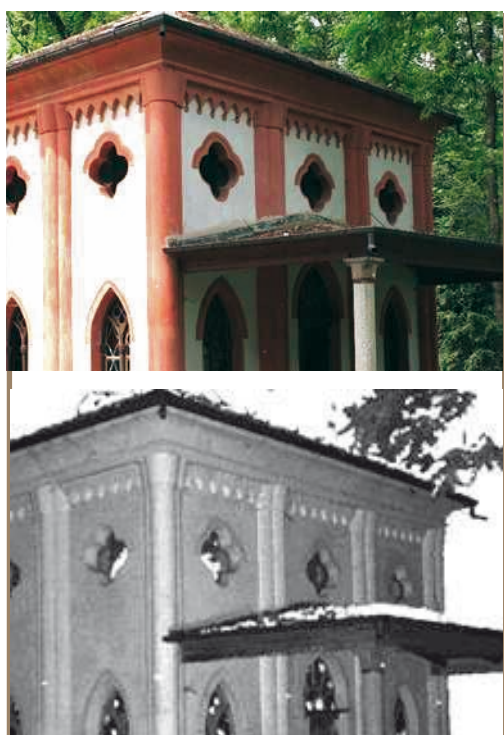


Figura 2.9.1 Immagine originale RGB (a) e immagine laser espressa in termini di differente riflettività (b) della Fagianaja del Castello di Racconigi (Politecnico di Torino)

In campo topografico la presenza di strumenti che si basano sull'uso di onde elettromagnetiche per la misurazione di distanze non è una novità. Infatti, da molti anni ormai, si fa uso del distanziometro ad onde per calcolare distanze in tempo reale e con grande precisione. La versatilità di questi strumenti ha portato allo sviluppo di una nuova tecnologia che si basa sempre sull'uso del raggio laser, ma che ha una molteplicità di campi di applicazione: il LIDAR acronimo di *Light Detection and Ranging*.

Il principio di funzionamento del laser scanner si basa su un emettitore che genera un impulso ottico, contraddistinto da una determinata lunghezza d'onda, che dopo aver colpito l'oggetto posto sul suo cammino viene riflesso. Un ricevitore registra l'onda riflessa e un contatore interno misura il tempo trascorso tra l'impulso emesso e quello ricevuto. In questo modo si riesce a ricavare la distanza che separa il centro ottico dello strumento dall'oggetto colpito. La grande novità di questi strumenti sta nel fatto che acquisiscono migliaia di punti al secondo grazie ad un insieme di meccanismi (servo-motori, prismi, ecc.) che convogliano il raggio laser nella direzione voluta. Il risultato è una nuvola di punti che rappresenta gli oggetti investiti dal raggio laser e che permette di avere un vero e proprio modello tridimensionale dell'oggetto rilevato (**figura 2.9.1**).

Grazie alla precisione e alla rapidità, i campi di applicazione spaziano dall'industria alle applicazioni topografiche, dai rilievi architettonici fino ad arrivare al monitoraggio ambientale.

Dunque, uno strumento laser scanner è un qualsiasi dispositivo che, operando su una porzione della superficie fisica di un oggetto, è in grado di acquisirne le coordinate tridimensionali in modo automatico, con elevata densità ed in tempo reale. I laser scanner possono inoltre operare come strumenti statici in posizioni fisse per il controllo di linee di produzione, per il monitoraggio dei movimenti e delle deformazioni e per il rilievo di alta precisione; oppure possono essere utilizzati come strumenti mobili montati su treppiedi per il rilievo di oggetti posti ad una distanza che può andare da pochi centimetri a un chilometro dallo strumento.

Le precisioni richieste nel rilievo dipendono ovviamente dalla dimensione e dalla forma dell'oggetto e dalla motivazione dell'operazione di misura stessa. In linea generale, fissata la scala nominale del rilievo, la necessità di precisione è limitata se l'oggetto può essere ricondotto ad una superficie regolare, mentre occorre impiegare risoluzione e precisione massime se l'oggetto presenta forme irregolari, con un elevato numero di discontinuità.

A questo scopo i laser scanner terrestri possono essere suddivisi, in base alla loro portata nominale, in quattro grandi categorie:

- laser di piccola portata (< 1 m): laser scanner triangolatori;
- laser di media portata (1 m ÷ 50 m): laser scanner distanziometrici o triangolatori;
- laser di lunga portata (> 50 m): laser scanner distanziometrici;
- laser di lunghissima portata (> 1 km): laser scanner distanziometrici.

Nei laser scanner di piccola portata le precisioni possono raggiungere 0.1 mm (e in alcuni casi superare tale limite), mentre nei laser scanner di media portata possono variare da 0.2 mm (a distanze di presa non superiori a 2 m) fino a 5 mm alla distanza di 50 m. Nei laser scanner di lunga portata, per distanze di presa fino a 1 000 m, si possono avere precisioni di 15 mm che diventano 5 - 10 cm oltre i 1 000 m di distanza.

Gli oggetti investigabili devono ovviamente essere ad una distanza inferiore rispetto alla portata dello strumento. Nel caso di estese superfici da investigare, tale limite viene superato spostando lo strumento in diversi punti e poi unendo le scansioni in laboratorio.

2.9.3.L'immagine solida

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 DDSM (modello digitale denso). Per determinare correttamente queste distanze, la scansione laser e la fotografia devono essere realizzate da due punti di presa vicini, per ridurre il numero di pixel non acquisibili dal laser scanner (zone defilate), di cui quindi non è possibile determinare la posizione 3D.

Se per ottenere il DDSM viene utilizzato un laser scanner, alle quattro informazioni contenute nell'immagine solida è possibile aggiungerne ulteriori. Gli scanner oggi presenti sul mercato sono, infatti, in grado di fornire, oltre alla posizione tridimensionale dei punti anche il valore di riflettività (in termine di percentuale di raggio riflesso) che il materiale possiede nei confronti del raggio laser. Questa informazione, legata al tipo di materiale componente l'oggetto rilevato, può diventare importante nell'analisi e nello sviluppo di procedure di elaborazione automatiche sul modello 3D. Si può dunque sommare questa informazione a quelle

contenute dall'immagine solida, aggiungendo un'ulteriore matrice con le stesse dimensioni delle matrici RGB e D (in termini di righe e colonne).

Un'immagine solida ottenuta utilizzando i laser scanner è quindi composta da cinque matrici: R,G,B, la distanza D e la riflettività A (figura 2.9.2).

L'immagine solida consente diversi utilizzi pratici, quali:

- la determinazione, in tempo reale tramite un PC standard, della posizione 3D di un qualsiasi punto rappresentato nell'immagine;
- l'estrazione di profili, sezioni o piani per mezzo di semplici funzioni di disegno;
- l'integrazione delle informazioni geometriche dei modelli tridimensionali con la qualità fotografica e la ricchezza di particolari delle immagini a colori;
- l'esecuzione di misure tridimensionali corrette (piani, linee, aree, volumi, angoli, ecc.).

Quest'ultimo utilizzo è particolarmente utile per l'individuazione delle giaciture dei piani delle discontinuità di un ammasso roccioso. È infatti possibile effettuare misure direttamente sull'immagine solida per la stima, con i minimi quadrati, del piano medio di un insieme di punti.

Per un tecnico non esperto di modellazione solida, risulta molto più semplice e meno problematico eseguire misure dirette su una fotografia invece che su un modello solido in ambiente tridimensionale. Inoltre l'immagine digitale ad alta risoluzione utilizzata per generare l'immagine solida rimane invariata, senza subire deformazioni o modifiche e quindi in essa tutte le informazioni rimangono originali.



Figura 2.9.2

Schematizzazione dell'immagine solida (Politecnico di Torino)

2.9.4 Applicazione del metodo

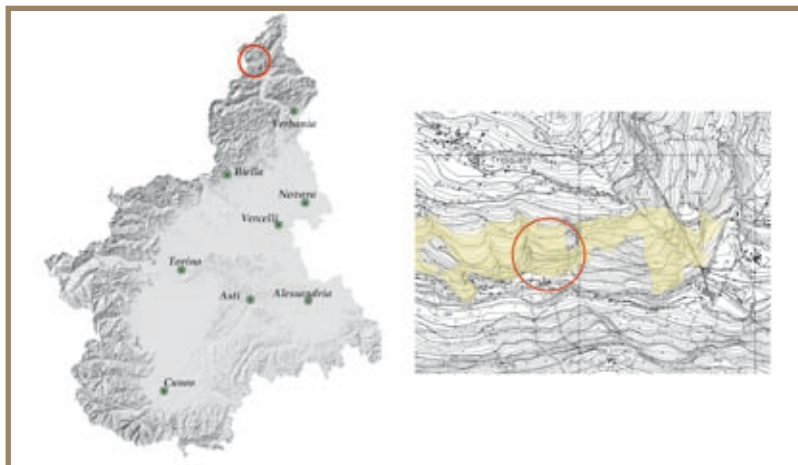


Figura 2.9.3 Ubicazione della zona di studio



Figura 2.9.4 Vista delle quattro acquisizioni



Figura 2.9.5 Posizionamento delle mire sulla parete (a) e riflettore da terra (b)

Figura 2.9.6 Sistema laser scanner-fotocamera digitale ad alta risoluzione



Oggetto del rilevamento è stata una parete in località Balmalonesca della valle Divedro, nel comune di Trasquera (VCO) (**figura 2.9.3**), avente dimensioni approssimative di 200 m in lunghezza e di circa 100 m in altezza, abbastanza articolata e composta da gneiss occhialini (Massicci Monte Rosa e valle d'Ossola).

Per ottenere un modello di superficie più completo possibile, sono state eseguite acquisizioni da quattro diverse posizioni, ciascuna formata da più immagini adiacenti ed aventi adeguato ricoprimento (**figura 2.9.4**). La sovrapposizione di tali immagini è stata garantita attraverso il posizionamento di mire (*marker*) ad alta riflettività: 12 sulla parete e 3 a terra, queste ultime utili per l'inquadramento cartografico rilevate con osservazioni statiche GPS appoggiate alle stazioni permanenti vicine e ai vertici IGM95 presenti in zona (**figura 2.9.5**).

Da ogni punto di messa in stazione dello strumento si è realizzata l'acquisizione dei dati laser in diverse fasi. Inizialmente si è rilevato tutto l'ambiente circostante, con una scansione rapida detta *scansione panoramica*, 360° di rotazione orizzontale con bassa risoluzione angolare, utilizzata per acquisire, durante le fasi successive, con più precisione le aree di interesse. In un secondo momento sono state acquisite le posizioni in cui si trovavano i *marker* di terra utilizzando una risoluzione angolare più elevata.

Dalla stessa posizione sono state realizzate anche le immagini digitali ad alta risoluzione, montando sul laser scanner, tramite un braccio calibrato, la fotocamera digitale Nikon D1X dotata di un obiettivo 28 mm che, in modalità di acquisizione ad alta risoluzione, crea immagini di 3 000 · 1 960 pixel (**figura 2.9.6**).

Per quanto riguarda la qualità del rilievo, lo strumento laser RIEGL LMS-Z420 ha permesso di ottenere una precisione di 5 mm nella misura della distanza (laser in classe 1), che, dopo tutte le operazioni di filtratura, allineamento e georeferenziazione, si può stimare arrivi a circa 1-1.5 cm. La risoluzione angolare invece è stata di 10 mgon, che ad una distanza media dall'oggetto di 100 m equivale ad una spaziatura dei punti di

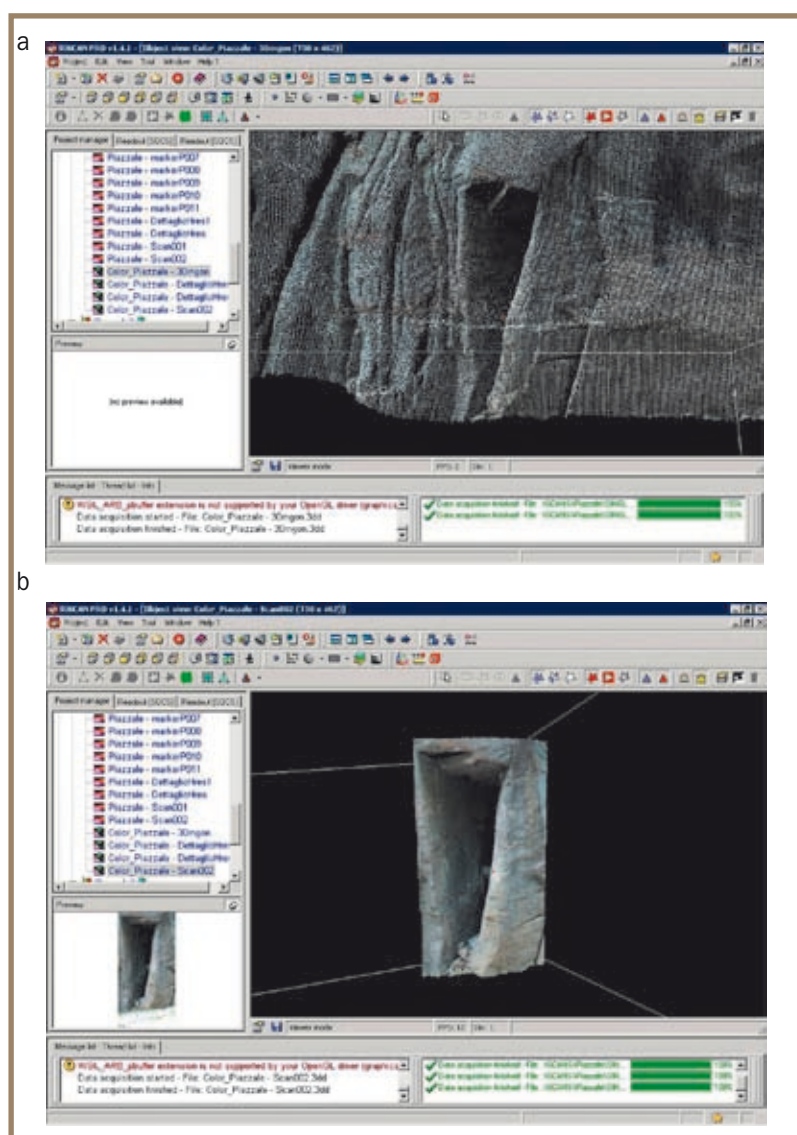


Figura 2.9.7 Esempio di scansione a bassa (a) e ad alta (b) definizione

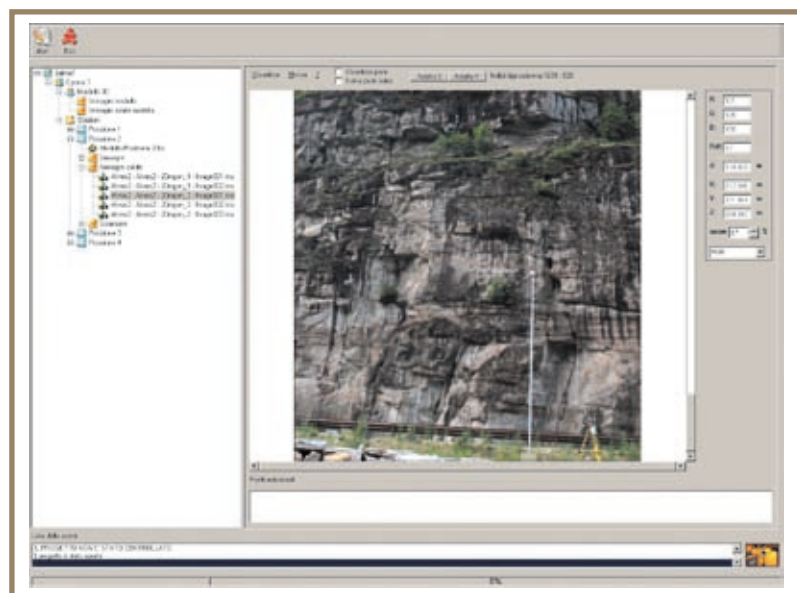


Figura 2.9.8 Finestra di lavoro del software VisualSR 2004

1.5 cm; 20 mgon equivale a un punto ogni 3 cm (figura 2.9.7).

L'acquisizione dei dati di campagna è stato eseguito con il software RiscanPro®, in dotazione allo strumento, che permette di assolvere un gran numero di compiti comprendenti la configurazione del laser, l'acquisizione, la visualizzazione, la manipolazione e l'archiviazione dei dati. Il successivo trattamento è stato eseguito con il software VisualSR 2004 3.1.11, sviluppato presso il DITAG del Politecnico di Torino. Il programma VisualSR è stato recentemente aggiornato ed implementato come software SIRIO sviluppato dalla S.I.R. s.r.l., società spin-off del Politecnico di Torino, di cui si può vedere una demo nel DVD allegato al presente volume.

Il percorso logico per ottenere l'immagine solida sulla quale eseguire le misure è stato:

- ricerca *marker* per la sovrapposizione delle singole riprese formanti un punto stazione;
- controllo e calibrazione della posizione della camera;
- filtratura;
- generazione immagini solide;
- allineamento e georeferenziazione.

2.9.5 Elaborazione e risultati

Il trattamento preliminare è stato eseguito utilizzando il software VisualSR 2004, sviluppato presso il DITAG del Politecnico di Torino (figura 2.9.8).

Una volta che l'immagine solida è completamente formata, è possibile conoscere in tempo reale la posizione spaziale di ogni pixel nel sistema di riferimento XYZ (cartografico), il valore di riflettività e la distanza, semplicemente muovendo il cursore sull'immagine. I valori sono visualizzati in un'apposita finestra.

È inoltre possibile rappresentare l'immagine solida in funzione della distanza dal punto di presa, della riflettività oppure in veri colori (figura 2.9.9) ed effettuare misure di distanze, angoli e piani (figura 2.9.10).

La misura che presenta maggior interesse per l'analisi della struttura della parete è la stima del piano medio di un insieme di punti. Utilizzando l'equazione del piano medio passante per un insieme di punti, infatti, è possibile determinare automaticamente *dip* e *dip direction*.

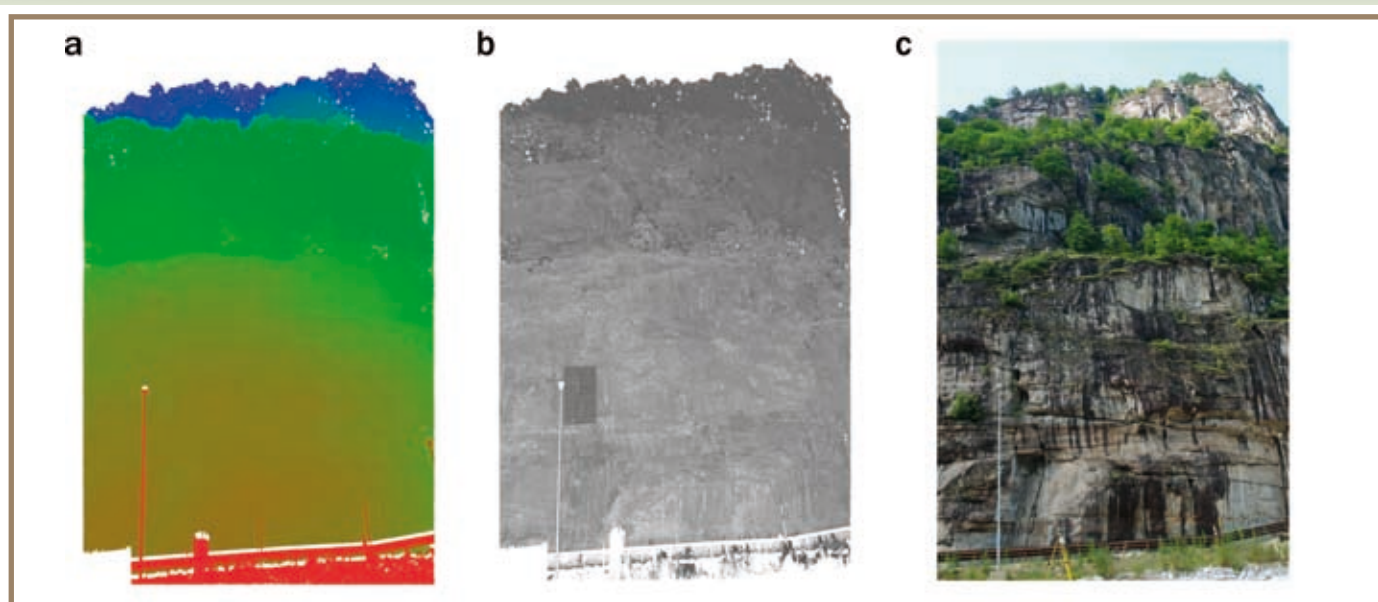


Figura 2.9.9 Immagine solida rappresentata in funzione della distanza dal punto di presa (a), della riflettività (b) e in veri colori (c)

Tale misura può essere effettuata in tre modalità:

1. selezionando tre punti per i quali passa un solo piano (**figura 2.9.11a**);
2. selezionando manualmente un insieme di punti per i quali si stima un piano medio (**figura 2.9.11b**);
3. definendo sull'immagine un poligono di forma qualunque che delimita i punti del modello di superficie da considerare per la stima del piano medio (**figura 2.9.11c**).

Figura 2.9.10 Misure disponibili in ambiente VisualSR 2004

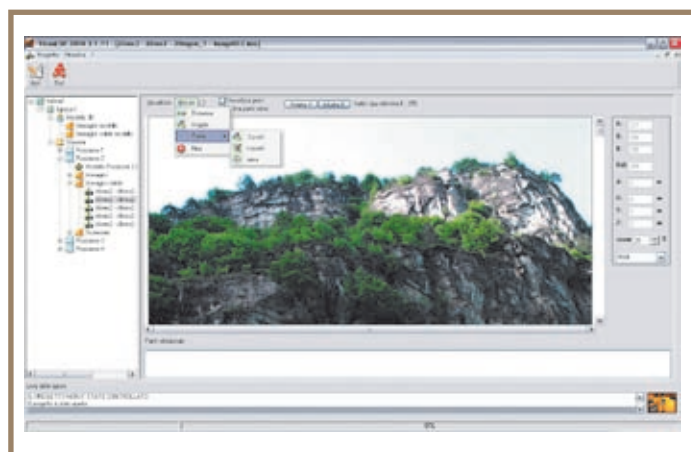
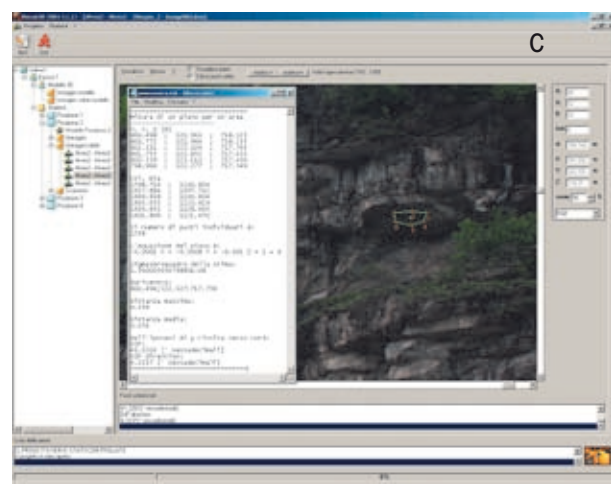
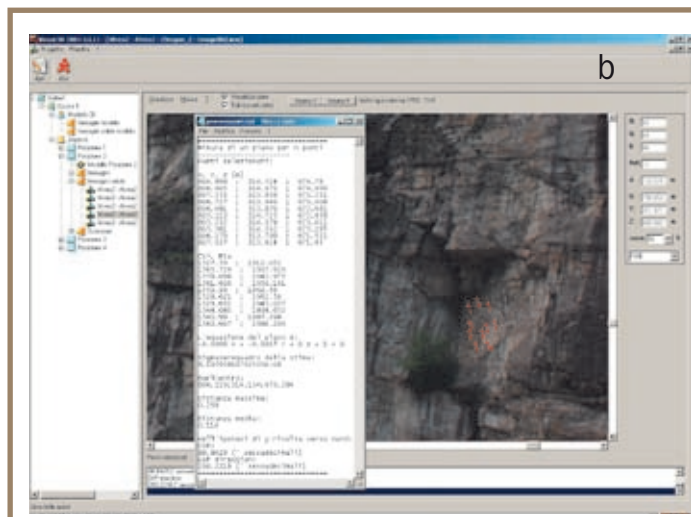
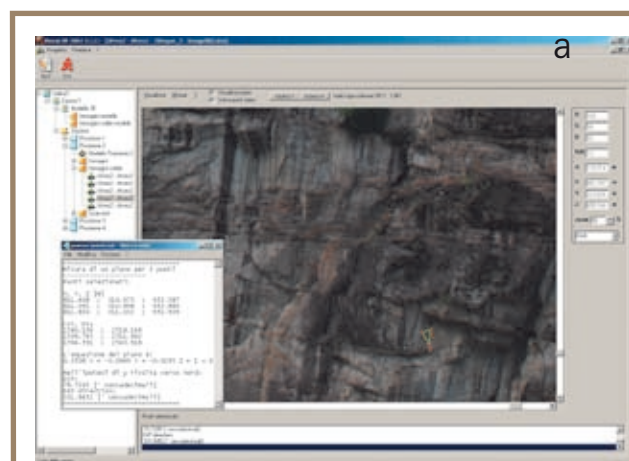


Figura 2.9.11 Stima del piano medio in ambiente VisualSR 2004



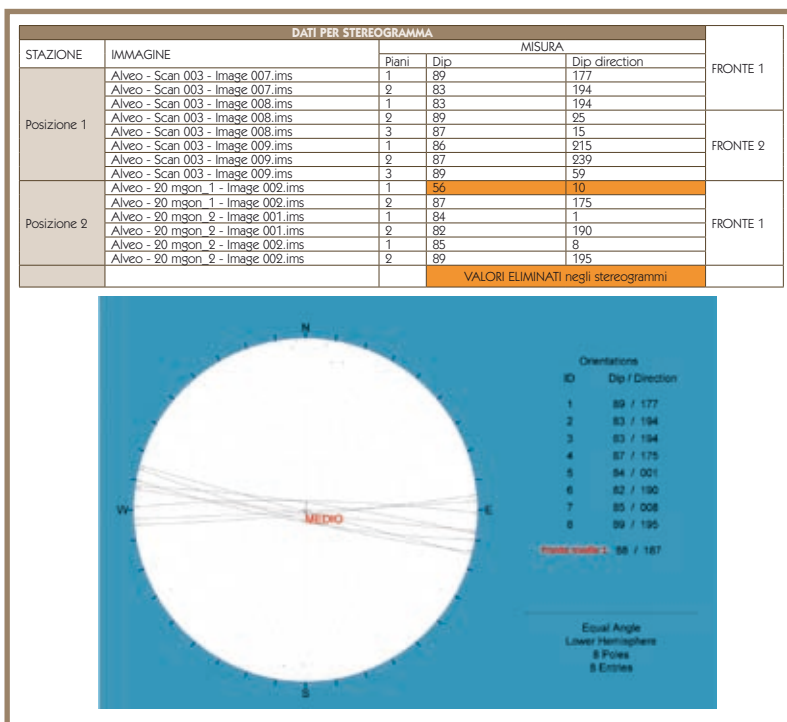


Figura 2.9.12 Individuazione del Fronte 1

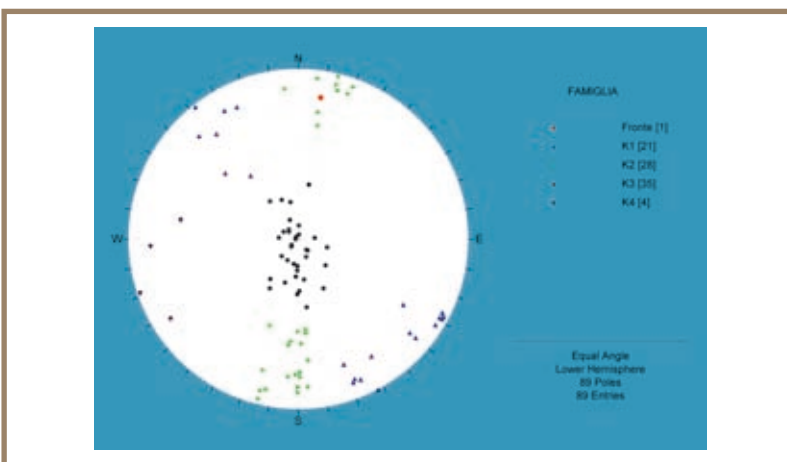


Figura 2.9.13 Individuazione delle discontinuità relative al Fronte 1

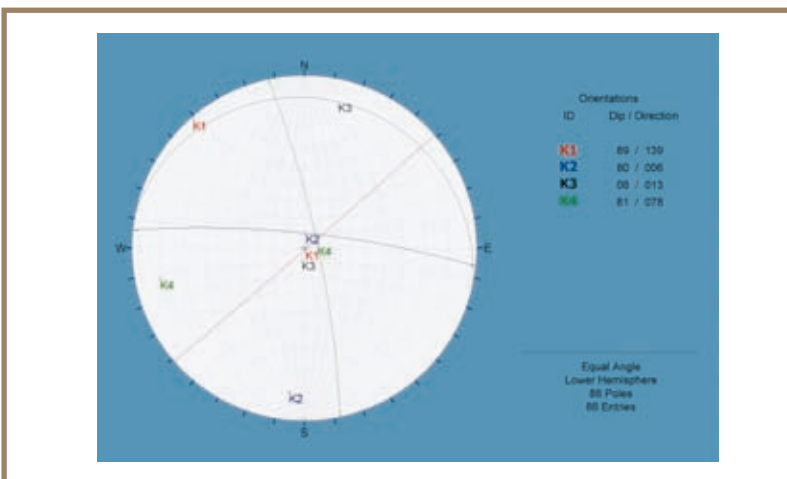


Figura 2.9.14 Stereogramma rappresentativo delle famiglie di discontinuità relative al Fronte 1

Dopo aver determinato quali sono i punti interessanti dal calcolo, il piano medio è calcolato attraverso una stima ai minimi quadrati e dello stesso sono forniti l'equazione, *dip* e *dip direction* ed i parametri di stima (numero dei punti utilizzati, scarto quadratico medio, distanza massima e media tra i punti, piano calcolato).

Individuazione delle famiglie di discontinuità

Il rilievo è stato suddiviso in due macro aeree, corrispondenti alla giacitura del fronte locale che presenta due differenti assetti: uno parallelo alla strada e l'altro che riguarda la parte del fronte in prossimità della faglia. L'analisi si può quindi suddividere in diverse fasi:

1. Individuazione del Fronte 1 (fronte parallelo alla strada):
 - selezione di piani rappresentativi su ogni foto delle prime due postazioni riguardanti questa parte di fronte;
 - dopo aver trovato *dip* e *dip direction* dei vari piani, rappresentazione stereografica di tali valori in modo da individuare un fronte medio.
 2. Individuazione del Fronte 2 (fronte più vicino alla faglia): medesime operazioni sopra elencate.
- La **figura 2.9.12** riporta sia il dettaglio dei piani individuati sia lo stereogramma relativi al Fronte 1.
3. Rilievo delle famiglie di discontinuità relative ai Fronti 1 e 2:
 - individuazione dalle immagini solide di più piani di discontinuità. In questo caso sono stati selezionati numerosi punti appartenenti allo stesso piano per avere stime più precise;
 - proiezione dei poli dei piani ricavati dal software VisualLSR 2004 e individuazione del piano medio di ogni famiglia di discontinuità a partire dagli addensamenti.

La **figura 2.9.13** riporta sia un esempio del dettaglio degli 89 piani individuati sia gli stereogrammi relativi ai sistemi di discontinuità ricavati per il Fronte 1, mentre la **figura 2.9.14** riporta i piani medi.

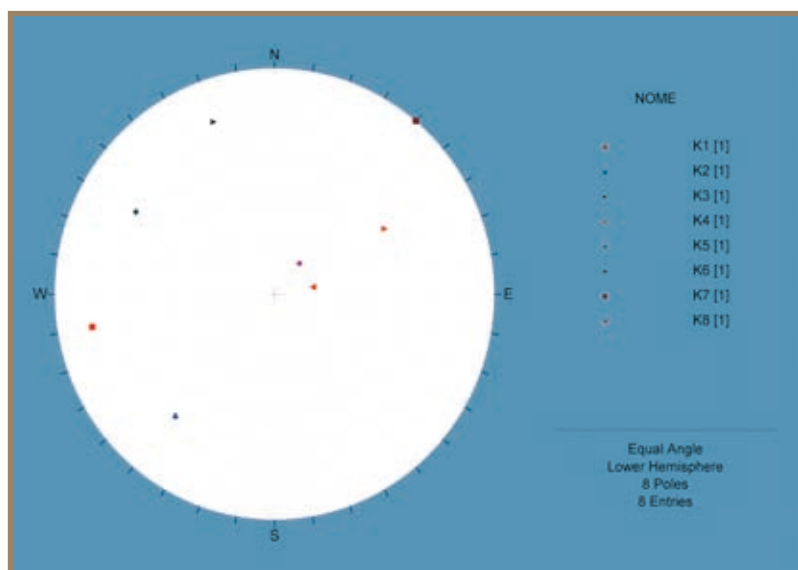


Figura 2.9.15 Stereogramma rappresentativo delle discontinuità da rilievo speditivo di terreno

Confronto rilievo speditivo – rilievo laser scanner

Confrontando i risultati ottenuti attraverso il laser scanner e successivamente interpretati con il software VisualSR 2004 3.1.11 con quelli ricavati dal rilievo speditivo nell'ambito del progetto PROVIALP, si possono trarre alcune considerazioni utili ad evidenziare vantaggi e limiti.

I due rilievi mostrano una certa coerenza nell'individuare i sistemi principali di discontinuità, ma il rilievo laser evidenzia una variabilità del sistema sub-orizzontale (K3 di **figura 2.9.13**) che il rilievo di terreno non coglie (**figura 2.9.15**). Tale discrepanza è probabilmente da imputare al fatto che la parete è accessibile solo alla base e che il grado di fratturazione dell'ammasso e la complessità dei rapporti tra strutture è decisamente differente tra la base e la

sommità della parete stessa. Questo ha comportato che le misure manuali indicano che i piani immergono verso sud-ovest, mentre il laser essendo posto ad una distanza di circa 200 m ha potuto rilevare anche i tetti delle discontinuità che immergono anche verso nord-est.

2.9.6 Considerazioni conclusive

L'esperienza condotta con il rilievo laser scanner consente di individuare vantaggi e limiti di tale tecnica.

Vantaggi analisi LIDAR

1. possibilità di studiare pareti inaccessibili che il geologo non può rilevare;
2. tempi di esecuzione relativamente rapidi e comunque più veloci di un rilievo tradizionale a parità di strutture rilevate. Per questo lavoro sono bastati un giorno per il posizionamento dei *marker*, un giorno di acquisizione in campagna e due giorni di attività per il trattamento dei dati grezzi per arrivare alla creazione dell'immagine solida su cui eseguire le misure col software VisualSR 2004;
3. ripetibilità delle misure effettuabili con il software VisualSR 2004 3.1.11 e quindi maggiore oggettività delle misure rispetto al rilievo tradizionale;
4. alta densità di misure e maggiore controllo della relativa dispersione rispetto al rilevamento tradizionale;
5. ottimo strumento per integrare il rilevamento e l'interpretazione tradizionale;
6. utilizzo multi-temporale per misurare spostamenti della superficie nel tempo.

Svantaggi analisi LIDAR

1. possibilità di effettuare solo rilievo geometrico e non meccanico-strutturale;
2. visibilità della parete (quindi qualità delle misure) legata al periodo di ripresa (giorno, stagione, ora) che può diventare pessima per motivi legati alla vegetazione, all'ombra, all'umidità e comunque a tutti i problemi legati alla tecnologia laser;
3. i costi sono attualmente in assoluto superiori ad un rilevamento tradizionale, ma va attentamente valutato il rapporto costi-benefici che, a seconda della finalità del rilievo, fanno propendere per l'uno o per l'altro approccio.

In conclusione, la tecnologia LIDAR e la relativa analisi con il software VisualSR 2004 per la caratterizzazione geometrica di una parete non può essere utilizzata a sé stante, ma deve essere affiancata all'interpretazione di un esperto di dominio che dovrebbe curare dunque sia l'inquadramento geologico strutturale sia l'utilizzo dell'immagine solida per il riconoscimento delle discontinuità.

2.10 L'INDAGINE PSINSAR™

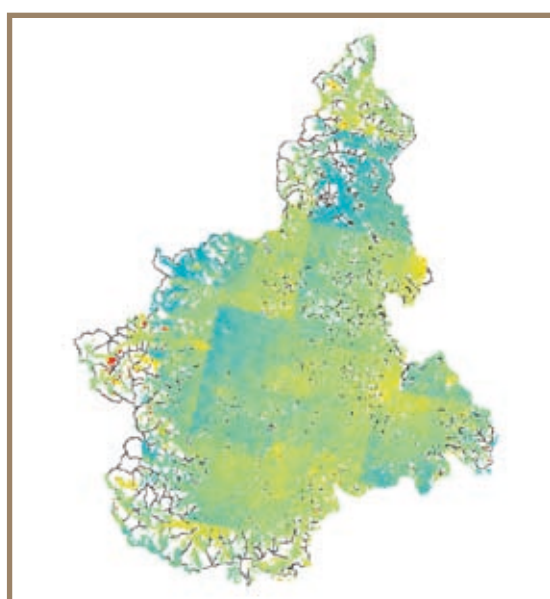
Alessio Colombo - Arpa Piemonte

2.10.1 La tecnica PSInSAR™

Nel 2006 Arpa Piemonte ha finanziato un'indagine che ha comportato l'acquisizione della copertura dei dati interferometrici ottenuti tramite la tecnica dei *Permanent Scatterers* (Politecnico di Milano PS Technique™ – PSInSAR™) per l'intero territorio regionale (figura 2.10.1). I dati PS disponibili si riferiscono all'intervallo di tempo compreso tra gli anni 1992 e 2001 e provengono dalle piattaforme satellitari ERS1 ed ERS2 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA).

Scopo della ricerca è la qualificazione geologica dei PS presenti sul Piemonte allo scopo di identificare, qualificare (separare) e quantificare (spazialmente e temporaneamente) fenomeni deformativi in senso lato

Figura 2.10.1 Distribuzione dati PS relativi all'analisi PSInSAR™ effettuata da TRE Tele-Rilevamento Europa mediante l'elaborazione delle immagini interferometriche fornite dalle piattaforme satellitari ERS1 ed ERS2 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), per gli anni 1992 - 2001. Tale dato costituisce la base di partenza per la valutazione delle deformazioni superficiali tramite approccio radar-satellitare



manifestatisi nell'arco temporale campionato dai PS attraverso lo sviluppo di procedure di analisi, raccolta ed interpretazione del dato SAR.

Essendo la tecnica PSInSAR™ particolarmente idonea all'identificazione ed alla definizione delle deformazioni ad evoluzione lenta, essa offre un importante mezzo di analisi nello studio dei fenomeni franosi.

Inoltre, l'intervallo di tempo 1992 - 2001 a cui si riferiscono i dati è particolarmente significativo per il Piemonte, essendosi verificati in tale periodo almeno sette eventi alluvionali significativi (settembre/ottobre 1993; giugno 1994; novembre 1994; luglio 1996; ottobre 1996; giugno 2000; ottobre 2000).

La tecnica PS si basa sull'osservazione, su più immagini radar della stessa area, acquisite in tempi successivi da satellite, di un insieme di bersagli radar, i cosiddetti diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*, PS) (figura 2.10.2). I PS sono tipicamente parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, in generale elementi già presenti al suolo, le cui caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione; questo non accade invece alla vegetazione, il cui aspetto muta di continuo. In particolare la figura 2.10.2 mostra una rappresentazione schematica delle basi teoriche della tecnica PS che permette di valutare le deformazioni della superficie terrestre lungo la direzione di vista del satellite con precisioni dell'ordine del millimetro.

Questa tecnica, che non risente delle condizioni atmosferiche o del grado di insolazione del territorio (riprese anche in notturna) permette di:

- valutare le deformazioni della superficie terrestre lungo la direzione di vista del satellite con precisioni dell'ordine del millimetro;

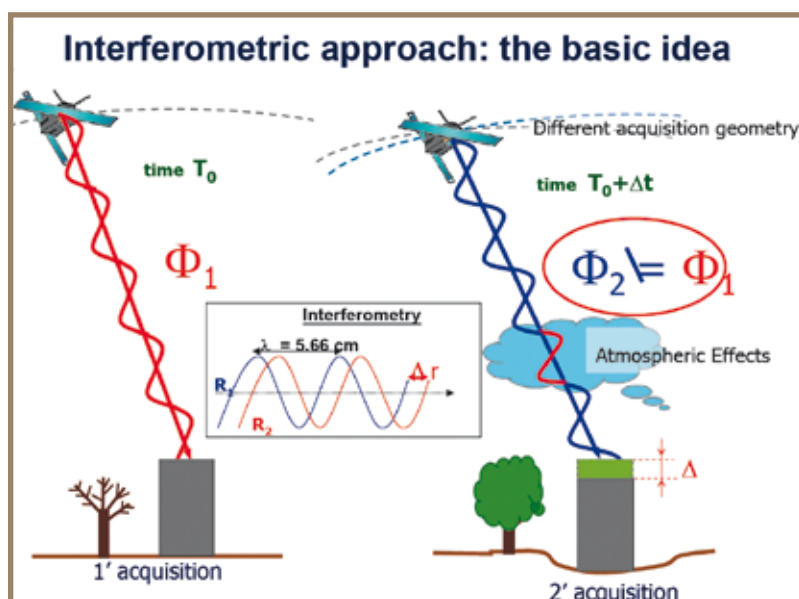


Figura 2.10.2 Schema esplicativo della metodologia di acquisizione e della teoria su cui si basa l'analisi interferometrica differenziale (TRE Tele-Rilevamento Europa)

- caratterizzare il trend evolutivo della deformazione grazie al dataset completo di immagini storiche (1992 - 2001) con una cadenza media di circa 6-7 immagini all'anno per qualsiasi area di studio;
- analizzare le deformazioni su aree relativamente ampie (diversi chilometri), mettendo in luce settori di deformazione caratterizzati da movimenti locali differenziali, non altrimenti percepibili se non con una fitta rete di monitoraggio tradizionale.

A questi vantaggi si associa tuttavia una serie di limitazioni quali:

- la tecnica non è utilizzabile per fenomeni deformativi veloci (movimenti più rapidi di alcuni cm/anno). Movimenti superiori anche a pochi centimetri tra due immagini successive determinano l'insorgere di problematiche di "decorrelazione" (perdita di coerenza) a causa degli eccessivi cambiamenti topografici. L'impiego di tecniche di interferometria satellitare risulta invece molto utile in quei siti dove la velocità di movimento ha valori così bassi da risultare di difficile individuazione anche all'occhio di un rilevatore esperto, o inferiori alle capacità di risoluzione degli strumenti di monitoraggio convenzionali;
- impossibilità di un monitoraggio in "tempo reale": la frequenza di acquisizione del dato (determinata dal passaggio del satellite) è di 35 giorni;
- i versanti paralleli alla direzione di vista del sensore (all'incirca est-ovest) non sono analizzabili con queste tecniche; sensibili distorsioni prospettive dei versanti ad elevata energia di rilievo; versanti non illuminati in quanto coperti da altri; non è utilizzabile in aree boscate;
- scarsità di misure in aree poco urbanizzate (nasce la necessità di installare capisaldi artificiali);
- un pixel di un'immagine radar corrisponde ad una area di circa 20 m · 20 m sulla superficie terrestre; da ciò consegue che non è possibile eseguire indagini su aree troppo ristrette (minori di qualche migliaio di metri quadrati) come ad esempio su frane di piccole dimensioni;
- costi legati all'acquisto di immagini radar (per le elaborazioni viene richiesto un numero minimo di 25-30 immagini).

2.10.2 Applicabilità dell'analisi PSInSAR™ ai fenomeni di crollo

L'analisi condotta in Piemonte mette in evidenza che un gran numero di PS ricade all'interno delle geometrie rilevate come fenomeni di crollo nonché aree soggette a crolli e ribaltamenti diffusi. Circa il 60% dei PS rilevati in zona alpina ricade in aree ricoperte da accumuli detritici e il 28% dei fenomeni di crollo identificati dal progetto IFFI in Piemonte contiene almeno un PS.

La presenza di estese percentuali di territorio denudate dal manto vegetale, unite alla presenza di roccia esposta e estremamente fratturata, nonché di accumuli di detrito a blocchi spigolosi aumenta esponenzialmente la probabilità di reperire ottimi bersagli radar all'interno di queste porzioni di versante instabili.

Tale peculiarità pone la necessità di approfondire e capire quale sia il vero contributo che l'analisi PSInSAR™ può apportare allo studio e alla comprensione dei fenomeni da crollo.

Per fare ciò occorre porre l'attenzione sui limiti intrinseci della tecnica.

In generale l'analisi del seminato PS, come anticipato, mette in luce che un'alta concentrazione di bersagli ricade in corrispondenza di accumuli detritici di versante (detriti di falda, ecc.) (**figure 2.10.3 e 2.10.4**). I PS in queste zone sono caratterizzati da movimenti lungo LOS (congiungente satellite-bersaglio radar) anche significativi. Le caratteristiche geometriche e fisiche di queste aree sono estremamente favorevoli per l'analisi PSInSAR™: elevata concentrazione di roccia esposta a spigoli vivi, esposizione e inclinazione dei versanti congrua alle geometrie di acquisizione del sensore satellitare.

È assai probabile che il movimento rilevato dai PS debba riferirsi ai movimenti superficiali stagionali che sottopongono il detrito a fluttuazioni e ad un generale stato di instabilità dell'intero corpo dell'accumulo detritico.

La difficoltà di interpretazione potrebbe sorgere nel caso in cui tali coltri detritiche si trovino su un corpo di frana più profondo e quindi risentano della cinematica di un'eventuale instabilità legata ad un collasso gravitativo più profondo (**figura 2.10.4**). In questo caso risulterebbe infatti difficile la distinzione, tramite il solo utilizzo dell'analisi PSInSAR™, tra i fenomeni superficiali sopra descritti e gli eventuali movimenti più profondi dovuti al fenomeno franoso.

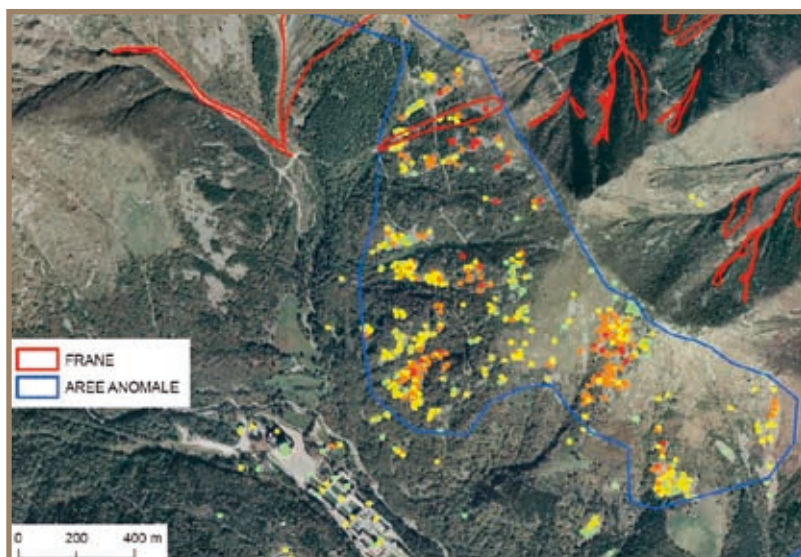


Figura 2.10.3 Alpi: Santuario di Oropa (BI)

Figura 2.10.4 Appennino: val Borbera (AL) Calcarì di M. Antola

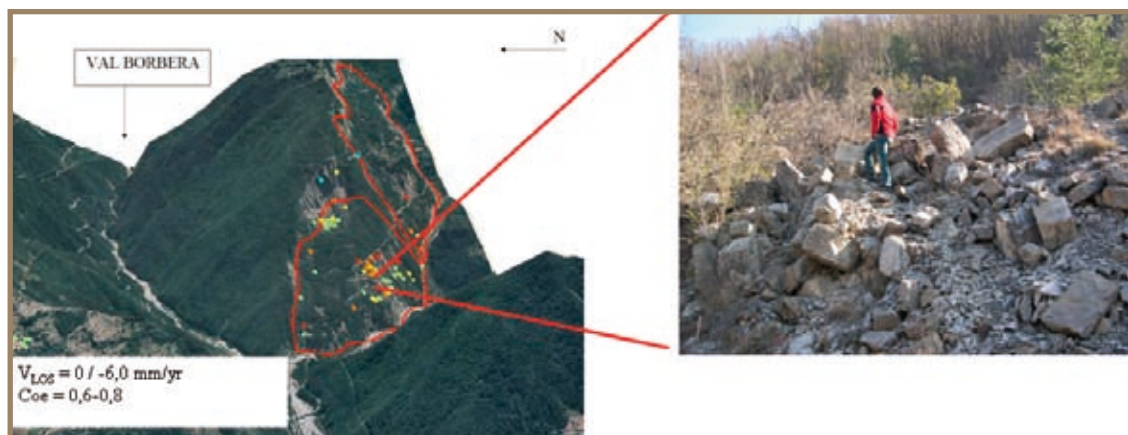


Figura 2.10.5 Carema (TO): l'inventario IFFI ha individuato alcuni fenomeni rapidi e di limitate proporzioni, principalmente crolli in roccia e colamenti superficiali; l'analisi PSInSAR™ ha messo in evidenza probabili movimenti più profondi non ancora conosciuti



Le caratteristiche intrinseche del metodo PSInSAR™, che consentono di rilevare velocità di spostamento relativo molto preciso dell'ordine di pochi millimetri/anno, possono essere estremamente utili nell'ambito della comprensione dei fenomeni di crollo nell'individuazione dei movimenti destabilizzanti che si possono verificare pre-collasso delle pareti soggette a crolli. Tale prerogativa risulta molto utile nel discernere in ultima analisi zone in testata a differente comportamento cinematico.

Un esempio di applicazione di quanto enunciato si può rilevare nella zona del comune di Carema (TO) (**figura 2.10.5**) dove fenomeni di crollo, rilevati tramite fotointerpretazione con un criterio geomorfologico, localizzano fenomeni superficiali distribuiti sul versante.

L'analisi PSInSAR™ identifica settori di versante in deformazione all'intorno delle nicchie di distacco dei crolli mettendo in luce zone in movimento che l'analisi geomorfologia interpretativa non aveva considerato. Tale individuazione ha permesso di rivalutare la dimensione dell'area di sorgente di questi fenomeni.

Inoltre, analizzando i dati relativi all'intero versante, l'analisi PSInSAR™ mette in evidenza chiaramente che i fenomeni superficiali sono da mettere in relazione ad un movimento più profondo del quale, ad oggi, non si avevano elementi sufficienti per la sua identificazione.

A fronte di questo però, l'alta concentrazione di PS prima descritta è generalmente localizzata nella porzione di accumulo dei fenomeni da crollo, mentre la parte superiore e la nicchia di distacco dei fenomeni si caratterizzano per una evidente riduzione di densità del seminato.

Tale differenza si giustifica analizzando le caratteristiche geometriche delle pareti dove avvengono i distacchi. Queste pareti infatti sono generalmente caratterizzate da elevate inclinazioni (usualmente $> 45^\circ$) e si trovano quindi spesso in ombra radar (effetto noto come *shadowing*).

Alla luce di quanto descritto, relativamente ai dati attualmente in possesso di Arpa Piemonte (analisi ERS), risulta difficile applicare tale metodo a scala regionale sui fenomeni di crollo. Le geometrie ERS infatti (con un angolo di ripresa vicino alla verticale azimutale) non permettono di analizzare aree ad elevata pendenza quali le zone di distacco dei crolli. L'impiego di altri tipi di sensori a geometria diversa quali RADARSAT (inclinato di 36° rispetto alla verticale) potrebbe rendere questa tecnologia molto valida anche nell'individuazione di eventuali instabilità pre-collasso.

Occorre però sottolineare come le esperienze e le conoscenze sviluppate sui fenomeni di crollo nell'arco alpino occidentale dimostrano che, in moltissimi casi, tali fenomeni sono manifestazioni superficiali e rapide che si sviluppano in seno a più ampi e profondi movimenti di versante, grandi frane o deformazioni gravitative profonde; tipologie di fenomeno che, proprio in ragione delle loro dinamiche evolutive lente, vengono perfettamente identificate e caratterizzate dall'analisi PS.

In altri termini se la tecnica PS può presentare talora difficile applicazione nell'identificazione diretta dei fenomeni di crollo, essa può invece fornire indicazioni sulle dislocazioni generali degli ammassi che generano crolli. Giacché, in generale, gli ammassi con dislocazioni maggiori sono quelli che generano i crolli con maggior frequenza, le indicazioni derivate dai PS possono rivelarsi estremamente utili per una migliore caratterizzazione delle aree soggette a crolli diffusi.

2.11 CONCLUSIONI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Marta Castelli¹, Luca Mallen², Claudio Scavia¹
¹Politecnico Torino, ²Arpa Piemonte

Il contributo di Arpa Piemonte al progetto PROVIALP è stato sviluppato in collaborazione con il Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, con lo scopo di mettere a punto una metodologia speditiva per la valutazione della pericolosità da caduta massi a scala territoriale, lungo vie di comunicazione alpine.

La metodologia sviluppata si articola in diverse fasi, descritte in dettaglio nei capitoli precedenti:

1. suddivisione dei versanti in aree omogenee dal punto di vista geostrutturale ed identificazione delle aree ove condurre le indagini (capitolo 2.2);
2. rilievo geologico-strutturale speditivo in tali aree, identificazione dei potenziali cinematismi di distacco e stima dei volumi coinvolti (capitolo 2.3);
3. calcolo della probabilità di distacco di ciascun cinematismo, condotto tramite un metodo meccanico-probabilistico appositamente sviluppato, a partire da distribuzioni di frequenza delle caratteristiche geostrutturali fornite dal rilievo (capitolo 2.4);
4. definizione di un indice di distacco (I_D) per ogni area omogenea, che tenga conto della probabilità di distacco di ciascun cinematismo individuato al suo interno e dei volumi potenzialmente coinvolti;
5. analisi di *run out* per valutare le zone di invasione dei potenziali crolli e calcolo al loro interno di un indice di pericolosità relativa I_S . Tale indice rappresenta una suscettibilità alla caduta massi, calcolata sulla base del parametro I_D e dell'energia cinetica sviluppata durante il moto dei massi lungo il pendio (capitolo 2.5).

Nell'ambito del progetto è inoltre stato condotto uno studio preliminare di carattere generale relativo alla vulnerabilità delle vie di comunicazione, in previsione di un'estensione della metodologia alla definizione del rischio (capitolo 2.6).

L'applicabilità della metodologia messa a punto nel corso del progetto è stata infine testata su alcune aree campione situate in territorio piemontese (capitolo 2.7). Questa fase di applicazione è stata condotta al fine di tarare le varie fasi della metodologia considerando le condizioni geomorfologiche, ed il contributo di molti operatori (soprattutto per la fase di rilievo di terreno), i quali sono stati chiamati ad esprimere commenti e raccomandazioni. Per tale motivo i risultati ottenuti su ciascuna valle potrebbero in alcuni casi essere legati alla diversa sensibilità del rilevatore o ai differenti strumenti utilizzati (per esempio quelli descritti al paragrafo 2.3.4). Questa fase conclusiva ha rivestito un'importanza fondamentale poiché ha consentito di validare e generalizzare "in corso d'opera" le procedure e di fornire un quadro piuttosto vasto delle potenzialità della metodologia e delle problematiche che possono nascere nel corso dell'applicazione.

In particolare sono stati considerati i seguenti tratti di viabilità montana:

- Valle Orco (TO): SR 460, tratto di circa 35 km da Pont Canavese a Ceresole Reale (paragrafo 2.7.1).
- Valli di Lanzo (TO):
 - valle di Ala: SP 1, tratto di circa 30 km da Germagnano a Pian della Mussa (paragrafo 2.7.2);
 - valle di Viù: SP 32, tratto di circa 40 km da Germagnano al lago di Malciaussia (paragrafo 2.7.3).
- Valle di Susa (TO): SP 216 nella zona di Bardonecchia (Melezet), SS 24 nella zona di Cesana e SS 335 nella zona di Oulx (paragrafo 2.7.4).
- Valle Germanasca (TO): SP 169, tratto di circa 20 km da Pomaretto a Prali (paragrafo 2.7.5).
- Valle Tanaro (CN): SP 154, tratto di circa 17 km da Ponte di Nava a Upega (paragrafo 2.7.6).

Il principale risultato delle applicazioni è stato, per ciascuna area, una mappatura dell'indice di suscettibilità I_S , suddiviso in classi di diversa intensità. I criteri per la classificazione di tale indice sono stati accuratamente studiati con riferimento ad ogni valle, in modo da mettere in evidenza, con uno strumento di facile interpretazione, i settori della rete viaria che risultano più critici. Ciò significa che ogni valle è stata considerata in modo indipendente poiché l'influenza delle caratteristiche morfologiche e strutturali, in relazione ad un rilievo di terreno di tipo speditivo, non consentono di trattare in modo uniforme contesti diversi.

Le mappe di suscettibilità costituiscono uno strumento molto utile ai fini della pianificazione territoriale poiché consentono, alla scala della valle, di individuare le zone sulle quali è necessario concentrare l'attenzione con analisi più approfondite. Si sottolinea che, in relazione alle semplificazioni adottate sia nel rilievo delle caratteristiche dei versanti, sia di conseguenza nei metodi numerici di calcolo della probabilità di rottura, la metodologia proposta non può essere considerata un'analisi di stabilità delle pareti rocciose che minacciano la viabilità, ma unicamente un'analisi preliminare su vasta scala, con lo scopo di definire le priorità di intervento. Al fine di pianificare e progettare eventuali opere di difesa dalla caduta massi, essa dovrà perciò essere seguita da studi di dettaglio delle effettive condizioni di stabilità delle pareti, che consentano di definire in modo più particolareggiato le caratteristiche geometriche e meccaniche dei sistemi di discontinuità presenti e dei materiali costituenti l'ammasso roccioso e la sua copertura. Solo in tal modo sarà possibile utilizzare metodi numerici più sofisticati ed ottenere una valutazione più realistica del fenomeno.

Alcune considerazioni più approfondite possono essere condotte relativamente a ciascuna fase, come riportato nel seguito. Sulla base di tali considerazioni è possibile formulare alcune raccomandazioni sull'applicazione dell'intera metodologia, scaturite dall'esperienza maturata nel corso del progetto.

2.11.1 Fase di rilievo

Dato il carattere territoriale del lavoro, l'intera metodologia è stata configurata sulle potenzialità di un rilievo speditivo di terreno condotto a scala di valle, messo a punto al fine di ridurre i tempi di acquisizione dei dati. A tale scopo è stato necessario ridurre al minimo i parametri da misurare in sito (limitati a: orientazione media del fronte e delle discontinuità, volume dei blocchi, coperture) e studiare un metodo per ottenere misure quantitative semplificate della variabilità spaziale di tali parametri all'interno di aree omogenee dal punto di vista geostrutturale (tramite la stima di un valore medio e di un intervallo di variazione).

È necessario notare innanzi tutto che il progetto è incentrato sulle vie di comunicazione, per cui sono state analizzate unicamente zone di versante che costituiscono un potenziale pericolo per le strade. Per questo motivo il risultato finale in termini di suscettibilità alla caduta massi è da riferire unicamente alle strade stesse e non può essere considerato per quanto riguarda per esempio i centri abitati.

La suddivisione delle zone potenzialmente instabili in aree omogenee ha consentito di schematizzare ed organizzare il rilievo in un *database* appositamente strutturato, che costituisce non solo un importante strumento di lavoro nell'ambito del progetto ma anche un accrescimento delle conoscenze territoriali, andando ad ampliare la base dati a disposizione di Arpa Piemonte. Per quanto riguarda il suo utilizzo nell'ambito del progetto, il *database* consente in particolare di definire tutti i potenziali cinematismi di instabilità (non solo cioè quelli effettivamente osservati sul versante) sulla base di stereogrammi rappresentativi dell'intera area omogenea.

Tuttavia solo le zone del versante esposte (cioè non coperte da vegetazione) e situate a distanza sufficiente per l'esecuzione di misure dal fondovalle, indicate nel *database* come aree omogenee di tipo 1 e di tipo 2, sono state considerate nelle successive fasi della metodologia. Il risultato in termini di pericolosità relativa è limitato perciò unicamente a tali zone di distacco, mentre non è stata condotta alcuna analisi di pericolosità a partire dalle zone non direttamente rilevabili. Al fine di fornire un'indicazione supplementare, all'interno delle zone non rilevabili è possibile indicare le aree in cui, secondo il giudizio del rilevatore, potrebbero esserci le condizioni strutturali favorevoli all'instabilità (aree di tipo 3). Con riferimento a tali aree non vengono forniti dati di terreno, ma esse vengono comunque rappresentate nel risultato finale, in modo da mettere in evidenza la necessità di studi più approfonditi relativi agli elementi situati nel fondovalle in loro corrispondenza.

Si ricorda infine che tutte le valutazioni di terreno sono state condotte ignorando la presenza di opere di difesa da caduta massi. Considerare tali opere ed il loro ruolo nella riduzione della pericolosità del fenomeno richiederebbe infatti approfondite valutazioni dell'efficienza e dell'efficacia delle opere stesse, che esulano dagli scopi del progetto PROVIALP.

Nel corso del rilievo è stato necessario condurre una stima dei volumi rappresentativi di ciascun cinemati-

smo, che non possono essere ottenuti tramite i calcoli numerici a causa delle semplificazioni sulla geometria a cui è stato necessario ricorrere. Tale stima è fortemente affetta dalle problematiche legate alla speditività del rilievo. Essa può infatti essere condotta con riferimento ai volumi delimitati da discontinuità osservabili sul versante e alle dimensioni delle nicchie di distacco di crolli avvenuti in passato e/o dei massi presenti al piede del versante. Solo un'approfondita analisi comparativa di tali volumi può consentire l'associazione tra un potenziale cinematismo di instabilità ed il volume del blocco che può cadere sulla strada. Quest'analisi però non sempre può essere condotta, a causa sia del tempo che richiederebbe (si pensi per esempio alla necessità di osservare un blocco da più punti di vista per definirne il volume), sia del fatto che spesso i massi caduti dal versante vengono asportati dopo l'evento. La sola osservazione delle nicchie di distacco è affetta dalle problematiche relative al punto di osservazione. Se tale punto si trova a grande distanza dal versante (per esempio sul versante opposto) si tende a sovrastimare il volume o ad osservare solo nicchie di notevole estensione, se viceversa il punto si trova in prossimità del versante si tende a perdere la visione complessiva e quindi ad osservare solo volumi di piccola entità. Per questo motivo generalmente aree di tipo 2 (più distanti dalla strada) producono volumi maggiori di quelle di tipo 1 (più vicine).

Il rilievo strutturale speditivo di terreno risulta sicuramente più significativo per le aree con fratturazione regolare (indicate nel *database* come "bloccoso", "tabulare" o "colonnare"), dove la reale condizione di fratturazione dell'ammasso roccioso può essere semplificata attraverso il raggruppamento in famiglie. Per quelle con fratturazione fortemente irregolare esiste il rischio di rilevare un elevato numero di famiglie di discontinuità, che però non sono realmente presenti in modo omogeneo su tutta la parete osservata. Estendendo misure con significato locale all'intera parete l'intersezione di tutte le discontinuità rilevate genera un elevato numero di cinematismi potenziali, probabilmente non rappresentativo della situazione reale, e comunque difficile da gestire con una metodologia speditiva. Anche nel caso si raggruppino le misure in poche famiglie ma con variabilità elevate il risultato appare poco significativo. Per tale ragione, nel caso di ammasso roccioso con fratturazione fortemente irregolare è più conveniente, nel corso del rilievo, indicare semplicemente il grado (o la densità) di fratturazione. A tali aree successivamente può essere assegnata una probabilità di rottura a priori sulla base di tale indicazione.

Il rilievo di terreno, infine, è volto non solo alla caratterizzazione delle zone di potenziale distacco di massi dal versante, ma anche delle zone del pendio in cui si svolge l'eventuale moto di caduta dei massi stessi. Anche tali zone sono state suddivise in aree omogenee e classificate come aree di tipo 0. La descrizione di tali aree di tipo 0 è indispensabile per il calcolo dell'interazione tra massi e versante, che viene condotta nella fase di *run out* tramite la definizione di coefficienti di restituzione energetica, che esprimono le dissipazioni di energia prodotte dagli impatti dei massi al suolo e dall'eventuale rotolamento e/o scivolamento. A tal fine il rilievo deve indicare, per tali aree, il tipo di pendio, il tipo di vegetazione, la densità di vegetazione e le eventuali sistemazioni agrarie o antropiche in generale. Uno studio preliminare ha consentito di associare a ciascuna area omogenea di tipo 0 i coefficienti da utilizzare nelle analisi di *run out*, come descritto al paragrafo 2.3.3.

Sulla base delle considerazioni sopra esposte è evidente che la fase di rilievo risulta avere un'influenza fondamentale sul risultato finale della metodologia e la soggettività delle osservazioni e delle misure è forse il suo limite maggiore, anche se alcuni strumenti informatici di facile utilizzo possono ridurre il problema. In relazione a ciò ed al fine di validare la procedura di rilievo messa a punto e di testare la sua effettiva capacità di cogliere le caratteristiche strutturali dei versanti, è stato condotto un confronto con i risultati di una tecnica di rilievo alla stessa scala basata sulla tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), descritta al capitolo 2.9. Tale tecnologia, grazie all'utilizzo di uno strumento laser scanner è in grado di acquisire le coordinate tridimensionali di una nuvola di punti situata su una superficie in modo automatico e con elevata densità. Sulla base di tale acquisizione, tramite una procedura messa a punto dal Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie, è possibile creare un'immagine solida della superficie interessata sulla quale eseguire diverse misurazioni, come per esempio la stima di inclinazione ed immersione di piani. Il confronto tra i risultati delle due procedure di rilievo condotte sulla stessa parete ha dimostrato come, nonostante la speditività delle misure, il rilievo di terreno fornisca risultati appropriati alla scala di interesse.

Dall'esperienza maturata si raccomanda, per l'applicazione della metodologia di rilievo:

- di far riferimento in primo luogo alle conoscenze già disponibili (*database* territoriali, cartografie, foto aeree, dati storici, ecc.), in modo da avere un quadro preliminare delle condizioni geologico-strutturali dei versanti e pianificare il rilievo di terreno;
- di ricorrere, se possibile, all'ausilio di strumenti informatici che consentano la georeferenziazione dei dati raccolti e la loro gestione direttamente sul terreno, al fine di ridurre la possibilità di errore e la soggettività delle misure e di condurre un'analisi preliminare dei cinematismi;
- al fine di ridurre la soggettività delle misurazioni, si raccomanda comunque il coinvolgimento di più operatori, i quali dovrebbero lavorare in stretta collaborazione e confronto;
- di definire l'estensione delle aree omogenee con riferimento alle caratteristiche strutturali ed all'orientazione del fronte, cercando un compromesso tra la necessità di ridurre i tempi di rilievo e di calcolo (che porterebbe a considerare aree piuttosto estese) e quella di ottenere una descrizione in termini di numero di famiglie di discontinuità presenti, variabilità nelle giaciture ecc., sufficientemente dettagliato alla scala di indagine;
- di considerare che l'estensione delle aree omogenee rilevate ha influenza sulla rappresentazione cartografica del risultato finale a scala di valle. Nella definizione di tali aree si tenga perciò conto dell'influenza delle dimensioni delle celle del DTM sulla rappresentatività del fenomeno, per evitare ad esempio che l'intera area omogenea e la strada ricadano nella stessa cella;
- di prestare particolare attenzione alla stima dei volumi rappresentativi, i quali hanno una notevole influenza sul risultato finale. Per tale stima si faccia riferimento ove possibile sia all'osservazione del versante (blocchi delimitati da discontinuità, nicchie di distacco) sia ai massi presenti al piede;
- di fare riferimento per ciascuna area omogenea di distacco, ove possibile, a punti di osservazione diversi, situati a diversa distanza dalla parete, poiché questi fattori influenzano molte determinazioni, in particolare la stima dei volumi e della variabilità delle giaciture.

2.11.2 Fase di distacco, calcolo della probabilità di rottura

Questa fase viene condotta sulla base di metodi di calcolo molto semplificati, poiché la sinteticità delle informazioni derivanti dal rilievo non consentirebbe una corretta valutazione dei parametri necessari ad analisi sofisticate. Le analisi di stabilità si basano in particolare sul metodo dell'equilibrio limite, che consente il calcolo del fattore di sicurezza (F_s) di potenziali cinematismi di instabilità.

La suddivisione dei versanti in aree omogenee dal punto di vista geologico-strutturale permette di riferire ad aree generalmente piuttosto estese i risultati delle analisi numeriche. Per tenere conto della variabilità spaziale dei parametri all'interno delle aree omogenee, le analisi vengono condotte in termini probabilistici, grazie alla definizione di distribuzioni di frequenza (anch'esse semplificate) dei parametri stessi. A tale scopo si è utilizzato il metodo probabilistico di Monte Carlo, molto versatile ed adatto ad una implementazione numerica in associazione al metodo dell'equilibrio limite. Il risultato è una probabilità di rottura (P_f) per ogni cinematismo individuato nell'area omogenea, che ha il senso della probabilità che, in ciascun punto all'interno dell'area stessa, si abbiano le condizioni (geometriche e meccaniche) per il distacco di un volume roccioso con un determinato cinematismo. Tale probabilità non ha perciò alcun significato temporale e non può portare alla definizione di una vera e propria pericolosità nel fondovalle.

Per quanto riguarda i cinematismi analizzati numericamente, si è fatto riferimento ai casi di scivolamento planare, scivolamento a cuneo e ribaltamento a blocchi. Un'analisi preliminare delle condizioni cinematiche che portano alla definizione di tali cinematismi viene condotta sulla base degli stereogrammi caratteristici di ciascuna area omogenea, prodotti in fase di rilievo. A causa delle limitazioni del metodo di calcolo e del metodo di rilievo, che non è in grado di fornire alcuna indicazione sulla presenza e distribuzione dei ponti di roccia nell'ammasso, non viene condotta alcuna analisi numerica per quanto riguarda i cinematismi per ribaltamento flessionale (assimilati a ribaltamenti a blocchi tramite la stima dell'altezza potenzialmente instabile), per distacco puro e per scivolamento su superficie curva di pendii in terra o in ammassi rocciosi molto fratturati. Ai cinematismi per distacco puro e per scivolamento su superficie curva, se osservati sul

versante, si attribuisce (a favore di sicurezza) una probabilità di rottura del 100%.

I codici di calcolo utilizzati, in parte sviluppati nel corso del progetto, sono: WINTAM (Major et al., 1974) per l'analisi di scivolamenti a cuneo, PlaSMon (Pisani, 2005) per l'analisi di scivolamenti planari e Toppling Stones (Allodi e Castelli, 2007) per l'analisi di ribaltamenti a blocchi. Per utilizzare tali codici è necessario allestire per ogni cinematismo un file di *input*, contenente sia le caratteristiche meccaniche e geometriche indispensabili per condurre la verifica di stabilità, sia i parametri statistici e di controllo per l'analisi probabilistica. In tutti i codici di calcolo esiste la possibilità di assegnare distribuzioni di frequenza di diverso tipo (uniforme, triangolare, gaussiana, gaussiana troncata, esponenziale, istogramma) a tutte le variabili geometriche e meccaniche considerate nell'analisi di stabilità. Nel caso del progetto PROVIALP, le caratteristiche geometriche di ciascun cinematismo e la loro distribuzione statistica vengono fornite dal rilievo, mentre le caratteristiche fisiche e meccaniche devono essere ipotizzate sulla base di indicazioni generiche sui litotipi presenti e sulle caratteristiche delle famiglie di discontinuità, poiché il rilievo non è in grado di fornire tali indicazioni. Nessuna variabilità statistica viene perciò considerata nel progetto per questi parametri.

I parametri forniti in senso statistico sono quindi unicamente quelli relativi alla giacitura del fronte e dei piani coinvolti in ciascun cinematismo. Ad essi viene associata una distribuzione di frequenza uniforme corrispondente all'intervallo di variazione fornito dal rilievo speditivo. Questo significa che qualsiasi valore compreso tra il minimo ed il massimo della distribuzione ha la stessa probabilità di essere estratto nel corso delle simulazioni di Monte Carlo. Questa forte semplificazione è legata al grado di dettaglio con cui vengono forniti i dati dal rilievo di terreno, come specificato in precedenza.

Analizzando una zona geografica relativamente ampia e un numero di cinematismi notevole, non è possibile inoltre fare alcuna considerazione sulla presenza dell'acqua all'interno delle discontinuità; per questo motivo si è scelto di compiere tutte le simulazioni in condizioni drenate, ovvero in assenza di acqua in pressione, sebbene i codici di calcolo prevedano la possibilità di tenere conto di forze instabilizzanti (quali per esempio le spinte idrauliche).

Prima di effettuare l'analisi di stabilità, tutti i programmi eseguono un controllo cinematico sugli angoli di immersione e di inclinazione dei piani, verificando l'effettiva possibilità cinematica di instabilità. Tale controllo risulta necessario al fine di escludere dall'analisi di stabilità tutti i casi generati dalle estrazioni di Monte Carlo che non diano luogo a volumi potenzialmente instabili. La probabilità di rottura viene calcolata come rapporto tra il numero di casi instabili ed il numero totale dei campionamenti di Monte Carlo, cioè considerando anche eventuali cinematismi "impossibili". In tal modo si tiene conto della possibilità che, all'interno di un'area omogenea del versante, la variabilità delle caratteristiche di giacitura delle discontinuità in alcuni punti non crei le condizioni per l'instabilità. Questi casi sono di fatto assimilati a situazioni di stabilità, cioè con $F_s > 1$.

I codici di calcolo prevedono, per ciascuna analisi, un numero massimo di campionamenti di Monte Carlo pari a 1 000 000. Si fa notare che il numero minimo di campionamenti necessario per avere un risultato affidabile in termini di probabilità di rottura calcolata è funzione di molti fattori, tra cui in particolare il numero di variabili statistiche, il tipo di distribuzione di ciascuna ed il suo scarto quadratico medio. Sulla base di analisi parametriche condotte in passato (Scavia e Castelli, 2003), nelle applicazioni presentate in questo volume sono stati considerati 1 000 campionamenti per ciascun cinematismo analizzato, che forniscono un risultato sufficientemente preciso in relazione al limitato numero di variabili statistiche, anche se le loro distribuzioni di frequenza sono molto semplificate e l'intervallo di variazione è a volte piuttosto ampio. Al fine di valutarne l'influenza sul risultato finale, nel caso della valle di Susa i campionamenti sono stati aumentati a 10 000.

In termini generali il numero di campionamenti dovrebbe essere incrementato all'aumentare del numero di variabili statistiche in gioco e dello scarto quadratico medio della loro distribuzione. Distribuzioni più semplificate (uniforme o triangolare) inoltre richiedono un numero di campionamenti più elevato. Per aumentare la precisione dei risultati, infine, i campionamenti possono essere ulteriormente incrementati per i cinematismi che mostrano bassi valori della probabilità di rottura.

Dall'esperienza maturata nel corso delle applicazioni si osserva che:

- a causa delle semplificazioni descritte in precedenza, l'analisi ha unicamente un significato comparativo tra zone diverse dello stesso versante;
- i codici di calcolo forniscono come risultato anche il volume di ciascun cinematismo analizzato. Si ricorda però che tale volume non è significativo per le successive fasi del progetto poiché affetto dalle notevoli semplificazioni sulla geometria dei blocchi e sulla distribuzione statistica dei parametri geometrici;
- alla scala delle applicazioni presentate in questo volume risulta impossibile tener conto della presenza di ponti di roccia e di acqua nelle discontinuità perché è impossibile avere queste informazioni dal rilievo. Nel caso generale il metodo consente di tenere conto di tali fattori in modo semplificato;
- i parametri meccanici possono essere stimati, dove possibile, sulla base di informazioni qualitative ottenute dal rilievo (aspetto delle superfici, resistenza del materiale). Prudenzialmente è possibile utilizzare parametri di base (residui) sulla base dei litotipi presenti, per esempio: $\varphi_{\text{base}} = 25^\circ\text{-}30^\circ$ e $c = 0$ (Pa). La scelta di assumere coesione nulla è da considerarsi a favore di sicurezza, poiché si trascura il contributo alla stabilità di eventuali ponti di roccia presenti all'interno delle discontinuità;
- nel caso in cui il rilievo fornisca risultati più dettagliati è possibile assumere distribuzioni di frequenza dei parametri di ingresso più complesse (triangolare, gaussiana, gaussiana troncata, esponenziale, istogramma);
- il metodo di calcolo risulta molto conservativo poiché ogni cinematismo è considerato in modo indipendente. Nel caso per esempio che un blocco possa instabilizzarsi sia per ribaltamento che per scivolamento, ad esso vengono infatti assegnati due valori di probabilità di rottura.

2.11.3 Fase di *run out*, calcolo dell'indice di suscettibilità

L'ultima fase della procedura viene condotta tramite il codice di calcolo commerciale tridimensionale ROTOMAP GIS® (Geo & Soft S.r.l.), sviluppato nel corso del progetto al fine di:

- simulare le traiettorie di caduta massi da una griglia di punti (definita dal modello digitale del terreno), distribuiti all'interno di ciascuna area omogenea di distacco identificata nella fase di rilievo;
- calcolare un indice di suscettibilità nelle celle del versante interessate dalle traiettorie di caduta.

Durante questa fase del lavoro è possibile integrare i risultati ottenuti in ambiente GIS. Questo è un aspetto fondamentale della metodologia poiché, oltre a consentire la visualizzazione dei risultati ottenuti sul territorio oggetto di studio, favorendo una più approfondita analisi dei risultati, offre la possibilità di gestire una considerevole mole di dati in modo relativamente semplice. In tal modo è infatti possibile utilizzare nell'analisi non solo le informazioni raccolte nelle fasi precedenti (quali i parametri geometrici e strutturali delle zone di distacco, i volumi coinvolti e le probabilità di rottura di ciascun cinematismo), ma anche una serie di livelli informativi e *database* territoriali disponibili.

Nel caso del progetto PROVIALP, per esempio, si è fatto riferimento a:

- DTM di Arpa Piemonte a maglia di lato 10 m;
- cartografia geologica alla scala 1:50 000 o 1:100 000;
- carta dell'uso del suolo del Progetto CORINE alla scala 1:100 000;
- Piani Territoriali Forestali;
- ortofoto digitali;
- rete viaria.

Il codice di calcolo ROTOMAP GIS® è basato su un metodo elastico di tipo *lumped mass*, che simula il comportamento di un punto materiale senza forma e con massa unitaria. Ciò comporta le seguenti implicazioni:

- viene simulato il comportamento di un masso isolato e non è possibile tener conto dell'eventualità di una sua frantumazione per effetto degli urti sul terreno o con altri massi. Questo può comportare una sovrastima dell'energia cinetica;
- il codice risulta molto sensibile alla scabrezza della superficie su cui si sviluppano le traiettorie di caduta massi, per cui il modello digitale di terreno che si utilizza rappresenta un livello informativo di

- primaria importanza, ed il suo grado di precisione ed accuratezza possono influenzare notevolmente i risultati. Per esempio, il DTM utilizzato in questo progetto (maglia 10 m), pur rappresentando una sorta di buon compromesso tra la precisione richiesta e la capacità di gestire a livello hardware il calcolo delle traiettorie su aree estese, porta inevitabilmente ad una sovrastima dell'energia cinetica, in quanto la semplificazione della morfologia dei versanti riduce la scabrezza delle superfici coinvolte;
- i parametri fondamentali per il calcolo delle traiettorie di caduta massi sono i coefficienti di restituzione e di rotolamento, che esprimono le perdite di energia durante il moto lungo il versante e devono tenere conto di molti fattori tra cui la forma ed il volume dei blocchi ed il materiale di cui sono costituiti, oltre alle caratteristiche meccaniche della superficie su cui si sviluppa il moto.

Il carattere speditivo delle analisi di terreno ed il grado di dettaglio del DTM utilizzato nel progetto hanno portato alla definizione di una metodologia di valutazione dei coefficienti di restituzione e di rotolamento che consentisse di basarsi su informazioni generali riguardo la tipologia dei versanti, derivate da strati informativi esistenti. L'esperienza maturata nel corso delle applicazioni suggerisce però di dedicare particolare attenzione alla taratura di tali parametri, che può risultare piuttosto complessa. Tale taratura deve sempre essere eseguita e si può basare su dati storici relativi alla zona in esame, sul rilievo dei massi presenti al piede o più semplicemente su considerazioni legate alla morfologia della valle.

Il principale risultato dell'analisi è una mappatura dell'indice di suscettibilità (I_s) relativo ai versanti oggetto di indagine, con il significato di pericolosità relativa (cioè una pericolosità avente solo la componente spaziale e non quella temporale), che consente di identificare in modo semplice ed immediato le zone più "critiche" della valle o, come nel caso specifico del progetto PROVIALP, della sola rete viaria. Nel progetto infatti sono stati considerati unicamente i versanti in grado di interessare una via di comunicazione, per cui il risultato ha validità limitata alla strada stessa (e non deve essere per esempio utilizzato in riferimento a centri abitati). In ogni caso, estendendo la fase di raccolta dati, la metodologia può acquistare un significato più ampio.

Tale risultato non può essere considerato una pericolosità in senso stretto poiché, come specificato in precedenza, non considera l'aspetto temporale del fenomeno. Le informazioni di carattere storico a disposizione sono infatti ancora troppo scarse per il calcolo di una probabilità di rottura temporale intesa come tempo di ritorno dei crolli (soprattutto in zone diverse della stessa valle). Inoltre la frequenza dovrebbe essere associata ad una volumetria e ad una zona di distacco e raramente è possibile reperire dati di questo tipo. I modelli di calcolo utilizzati, coerentemente con il carattere speditivo della metodologia, non consentono infine di associare i meccanismi di innesco alla ricorrenza di fenomeni meteorici o sismici. L'organizzazione in fasi successive della metodologia consente comunque di introdurre una probabilità di rottura temporale nel calcolo, qualora esistessero le condizioni per una sua valutazione realistica.

L'indice di suscettibilità ha perciò lo scopo di identificare i tratti di versante più critici all'interno di una valle, sui quali concentrare l'attenzione con analisi più approfondite. Questo aspetto è di fondamentale importanza poiché la metodologia, sviluppata al fine di indagare ampi tratti della viabilità montana, è da considerarsi uno studio preliminare dell'impatto del fenomeno di caduta massi sulle strade, identificando all'interno delle zone interessate diversi livelli di suscettibilità. La progettazione di opere di difesa, la definizione di piani regolatori o di misure di protezione civile non possono perciò essere basate sui risultati prodotti ma richiedono studi di dettaglio delle condizioni di innesco e di evoluzione del fenomeno.

Dal momento che l'indice di suscettibilità viene calcolato sulla base di una sommatoria che può assumere un intervallo di valori molto variabili (in relazione ai numerosi fattori prevalentemente legati alla fase di rilievo di terreno, come specificato in dettaglio nel capitolo 2.5), per evitare interpretazioni errate del risultato occorre prestare particolare attenzione alla sua rappresentazione cartografica. Nel progetto si è optato per una rappresentazione in cui ogni classe in cui è diviso l'intervallo di esistenza di I_s contenga un ugual numero di occorrenze, indipendentemente dall'ampiezza dell'intervallo che essa rappresenta. Tale suddivisione è stata eseguita con riferimento ai risultati ottenuti in modo indipendente in ciascuna valle. Essa perciò consente la comparazione tra zone diverse lungo una valle, ma non il confronto tra valli diverse. Per questo motivo, nel progetto non è stato eseguito alcun confronto tra le varie mappe di suscettibilità prodotte e le

cartografie di suscettibilità contenute nel DVD allegato devono essere considerate valide unicamente alla scala della valle.

Per una corretta interpretazione delle carte di suscettibilità è necessario inoltre notare che le zone non interessate dalle traiettorie di caduta massi (per le quali non viene calcolato l'indice di suscettibilità) possono avere il duplice significato di:

- aree in cui non è stata eseguita l'analisi, per le quali cioè non esistono informazioni sulla suscettibilità;
- aree "stabili", al di sotto di settori che non hanno evidenziato la possibilità di crollo, per le quali cioè la suscettibilità risulta nulla.

Al fine di individuare le zone su cui non sono state condotte le analisi, nelle mappe di suscettibilità fornite nel DVD allegato al presente volume vengono indicate anche le aree omogenee di distacco, con la loro classificazione in aree di tipo 1, 2 o 3. Si ricorda che le aree di tipo 3 rappresentano tratti del versante in cui, secondo il giudizio del rilevatore, potrebbero esserci le condizioni strutturali favorevoli all'instabilità ma che non possono essere rilevati in modo speditivo. Esse vengono comunque rappresentate nel risultato finale, in modo da mettere in evidenza la necessità di studi più approfonditi. Nessuna considerazione relativa alla suscettibilità degli elementi situati nel fondovalle in loro corrispondenza può essere condotta al momento.

Il codice ROTOMAP GIS® fornisce altri risultati oltre l'indice di suscettibilità, quali:

- energia cinetica specifica (media o massima);
- altezze massime di volo;
- distribuzione punti di arresto.

Di tali risultati si fornisce una rappresentazione cartografica che può avere una grande importanza nell'interpretazione dei risultati. La distribuzione dei punti di arresto fornisce per esempio preziose indicazioni per la definizione della vulnerabilità delle strade e consente di identificare le zone di possibile accumulo. La distribuzione delle energie specifiche è un'altra informazione molto importante poiché consente di avere un'indicazione sulle velocità che possono raggiungere i massi. Inoltre, confrontata con la distribuzione dell'indice di suscettibilità, essa consente di mettere in luce il ruolo delle condizioni di distacco (numero di cinematismi, volumi e probabilità di rottura) sul risultato finale, distinguendolo dal ruolo delle condizioni di evoluzione (topografia, altezze di distacco, tipo di pendio, uso del suolo).

Dall'esperienza maturata nel corso delle applicazioni si raccomanda:

- l'utilizzo di un DTM quanto più preciso e accurato possibile, tenendo sempre in conto i limiti hardware e i tempi di elaborazione. Quanto più il modello digitale di terreno è grossolano tanto più l'applicativo tende a sovrastimare l'energia cinetica durante le simulazioni di crollo;
- un'accurata caratterizzazione dei versanti oggetto di studio per la successiva assegnazione e taratura dei coefficienti di restituzione, che dovranno essere realizzate sia con l'ausilio di tutte le basi dati disponibili sia con attente osservazioni sul terreno durante le operazioni di rilievo;
- estrema attenzione nella classificazione dell'indice di suscettibilità e delle energie specifiche, avendo sempre cura di analizzare la variabilità dei dati prima di decidere come suddividerli per la rappresentazione grafica; quest'ultima infatti ha un forte impatto su chi consulta le cartografie e può indurre a considerazioni improprie;
- la rappresentazione di tutte le aree omogenee di distacco nelle mappe di suscettibilità, indicando la loro tipologia. Solo in questo modo è infatti possibile differenziare le zone prive di informazioni sulla suscettibilità da quelle in cui la suscettibilità risulta nulla, che altrimenti non risultano distinguibili;
- la valutazione dei risultati limitata alle singole valli, in quanto valli diverse sono caratterizzate da classificazioni diverse, che possono eventualmente essere confrontate tra loro a livello numerico ma non a livello grafico.

2.12 INGEGNERIA NATURALISTICA

Alberto Dotta, Lucia Caffo, Rinaldo Gros - Consorzio Forestale Alta Valle di Susa

2.12.1 Scopi e ambiti di azione

L'ingegneria naturalistica è una tecnica costruttiva che si avvale della capacità biotecnica delle piante per consolidare e rinaturare versanti e corsi d'acqua. Il materiale vegetale vivo assume pertanto un'importanza fondamentale all'interno delle tecniche afferenti all'ingegneria naturalistica, in quanto alla crescita dell'apparato radicale e della parte aerea viene affidata la concreta possibilità di cicatrizzare aree in dissesto, sponde di corsi d'acqua instabili contribuendo alla completa rinaturazione di aree in cui le fitocenosi originarie sono state allontanate sia per motivi naturali che antropici.

La necessità di operare con un approccio progettuale prossimo alla natura è solo uno degli aspetti che fanno dell'ingegneria naturalistica una tecnica in rapida espansione ed in grande evoluzione. Gli effetti positivi, che vengono riassunti nella **tabella 2.12.1** risiedono nella grande varietà di soluzioni progettuali in funzione delle diverse necessità territoriali, nella capacità di innescare processi di ricostruzione di ecosistemi e di cenosi in aree al momento private dell'originaria copertura vegetale, di favorire l'insediamento di ecosistemi, nella maggiore capacità, rispetto all'ingegneria tradizionale, di risolvere problemi sui versanti e lungo i corsi d'acqua, nel migliore inserimento paesistico ed ambientale delle opere di sistemazione.

Effetto	Descrizione
Tecnico	Protezione delle sponde dall'erosione provocata dall'acqua corrente e dall'urto dell'onda di piena Protezione delle superfici spondali e dei versanti dall'erosione superficiale provocata da vento, neve, gelo, precipitazioni Aumento della stabilità della scarpata spondale e del versante con la costruzione di collegamento terreno radice Funzione protettiva contro il vento e la caduta di massi
Ecologico	Compensazione degli estremi di umidità e temperatura nello strato aereo vicino al terreno e con ciò creazione di favorevoli condizioni di crescita per la componente vegetale Miglioramento del bilancio idrico del terreno mediante drenaggio ed immagazzinamento del deflusso idrico Preparazione del terreno e formazione di humus Creazione di spazi vitali per piante ed animali Ombreggiamento delle sponde mediante vegetazione legnosa Depurazione delle acque mediante la fissazione delle sostanze nocive nella rizosfera Funzione di protezione contro il vento
Economico	Diminuzione delle spese di costruzione e di manutenzione (*) delle opere
Estetico	Armonizzazione del paesaggio Miglioramento dell'effetto emotivo suscitato dal paesaggio mediante la creazione di nuovi tasselli territoriali anche con la cicatrizzazione di aree in dissesto o degradate
(*) riguardo questo punto corre l'obbligo segnalare la difficoltà di comparare tecniche proprie dell'ingegneria naturalistica con quelle di sistemazione classica in quanto hanno approcci tecnici e progettuali completamente differenti e pertanto di difficile se non impossibile confronto.	

Tabella 2.12.1 Effetti delle tecniche di ingegneria naturalistica (Shichtl e Stern, 1994)

Il ricorso a tecniche di ingegneria naturalistica si verifica quando si voglia conseguire almeno una delle seguenti finalità (De Antonis e Molinari, 2003):

- creazione o ricostruzione di un ambiente naturale degradato;
- sistemazione idrogeologica o consolidamento di formazioni forestali con funzione di protezione diretta di infrastrutture e centri abitati;
- recupero ambientale e inserimento paesistico di luoghi ed infrastrutture.

2.12.2 Tecniche di intervento

Le tecniche di intervento ascrivibili all'ingegneria naturalistica possono essere raggruppate e sinteticamente descritte come nelle tabelle seguenti.

Difesa dall'erosione superficiale, miglioramento della capacità drenante dei terreni, rinaturalizzazione e manutenzione dei versanti		
Rivegetazione e gestione forestale	Tecniche di inerbimento	Semina manuale a spaglio Idrosemina Semine protette
	Messa a dimora di specie arbustive ed arboree	Rimboschimenti anche con l'ausilio di protezioni
	Cespugliamenti consolidanti	Gradonate vive Cordonate vive
	Interventi selvicolturali	Manutenzione dei versanti Manutenzione di alvei e sponde
Geosintetici e fibre naturali		Geotessili Geomembrane

Tabella 2.12.2 *Tecniche di ingegneria naturalistica, (De Antonis e Molinari, 2003, mod.)*

In questa categoria sono comprese le tecniche di ingegneria naturalistica più superficiali, ovvero che interessano, con gli apparati radicali delle piante introdotte come materiale vegetale vivo, gli orizzonti superiori dei versanti e delle sponde dei corsi d'acqua. La funzione prevalente è quella di consolidare, trattenere e cicatrizzare le parti superiori del terreno, in cui possono svilupparsi gli apparati radicali delle specie introdotte siano esse erbacee, arbustive ed arboree. L'azione consolidante pertanto non è mai profonda e tali tecniche non possono contrastare esigenze di consolidamento più profonde e strutturali. Si tratta di tecniche definite pertanto superficiali ed idonee a contrastare l'azione erosiva degli agenti meteorici e dell'acqua di scorrimento superficiale grazie alla presenza di una nuova copertura erbacea, arborea ed arbustiva, in cui il contrasto all'erosione viene fornito sia dalla parte aerea della pianta, riducendo per assorbimento l'energia cinetica della precipitazione, sia dall'apparato radicale trattenendo e regimando il deflusso idrico superficiale.

Regimazione idraulica e drenaggio delle formazioni	
Canalizzazione	Canalette metalliche con rinfianchi rivegetati Canalizzazioni di legname e pietrame Canalette in terra inerbite Canalette in terra impermeabilizzate ed inerbite Canalette in tavolame
Sistemi drenanti	Trincee drenanti Cunei filtranti Fascinate drenanti

Tabella 2.12.3 *Tecniche di drenaggio, (De Antonis e Molinari, 2003, mod.)*

Sono opere di grande ausilio nel consolidamento dei versanti in cui si rende necessario regimare, incanalare e consolidare il reticolo idrografico superficiale esistente. In alcuni casi si può determinare la necessità di creare nuovi sistemi di allontanamento e raccolta delle acque in versanti o corsi d'acqua minori in cui l'azione di dissesti ed erosioni ha reso inefficace se non annullato il reticolo preesistente. La capacità delle piante di assorbire attraverso gli apparati radicali grandi quantità d'acqua (per i salici arbustivi sono stati stimati 200 l di consumo annuo) permette di utilizzare tecniche in cui la componente vegetale viva assume una rilevante funzione consolidante. La parti delle piante inerti e non in grado di vegetare (fascinate drenanti) possono aumentare la porosità del suolo, determinando la costruzione di linee preferenziali di scorrimento, permettendo il deflusso delle acque all'interno di trincee drenanti, lungo la massima pendenza o a 45° sull'orizzontale, parimenti alla ghiaia od altri materiali inerti. Per quanto concerne le canalette si tratta di strutture inerti in cui la vegetazione introdotta assolve alla funzione di cicatrizzazione con il versante e le sponde circostanti.

Ricostruzione strutturale dei versanti, sostegno, contenimento, consolidamento, protezione dall'erosione		
Opere in legname	Palificate semplici	Palificate semplici Palificate semplici a pali sovrapposti Palificate semplici a piloti incrociati
	Palificate vive di sostegno	Palificate vive di sostegno ad una parete Palificate vive di sostegno a doppia parete Palificate vive di sostegno a doppia parete con ancoraggi profondi Sistemi di palificate a gradoni
	Opere di stabilizzazione superficiale	Stecconate Vimate o graticciate Fascinate
	Grate vive	Grate vive a camera semplice Grate vive a camera doppia Grate vive a funi Murature in pietrame
Opere in pietrame		Scogliere rivegetate Murature in pietrame Gabbioni

Tabella 2.12.4 Tipologie di opere sui versanti (De Antonis e Molinari, 2003, mod)

In questo gruppo di tecniche sono presenti tipologie di interventi estremamente frequenti nelle sistemazioni nell'arco alpino. L'uso combinato del legname e del materiale vegetale vivo nella costruzione delle palificate e delle grate vive permette una grande elasticità di soluzioni garantendo risultati di grande rilievo nella soluzione dei dissesti di versante, determinando un efficace consolidamento in profondità.

Ai fini di un corretto utilizzo di queste tecniche è bene procedere ad un'attenta analisi del problema da risolvere al fine di evitare tristi insuccessi. La realizzazione di palificate di sostegno riempite con materiale non drenante in presenza di versanti ricchi di acqua determina spesso il ribaltamento dell'opera. Parimenti un uso di palificate in versanti con inclinazioni superiori al limite massimo (40° - 45°) determina il sifonamento dell'opera e la sua messa in instabilità. Le stesse opere più superficiali come le fascinate, stecconate e fascinate sono spesso impiegate fuori dai loro limiti di utilizzo (30° - 35°) con conseguente sifonamento e crollo della struttura. I benefici in termini di consolidamento e rinaturazione si ottengono solamente impiegando correttamente tali tecniche, evitando inutili e dannosi inneschi di ulteriori dissesti di versante in luogo degli auspicati ed attesi consolidamenti.

La funzione del materiale vegetale vivo in queste opere è fondamentale. Occorre pertanto prevedere una scelta oculata delle specie ed un loro corretto impiego al fine di una crescita corretta e stabile nel tempo della componente viva della struttura consolidante.

Difesa spondale, stabilizzazione di alvei ed impluvi		
Opere idrauliche trasversali	Briglie e soglie	Briglie in legname e pietrame Briglie selettive
Opere idrauliche longitudinali	Scogliere rivegetate	Scogliere in massi di cava Scogliere in massi munite di taglione Scogliere in massi vincolati
	Coperture diffuse	Coperture diffuse con astoni

Tabella 2.12.5 Tipologie di opere lungo i corsi d'acqua, (De Antonis e Molinari, 2003, mod)

I corsi d'acqua sono uno degli ambiti di impiego delle tecniche di ingegneria naturalistica più difficili ed impegnativi. L'azione erosiva dell'acqua associata alla pendenza delle aste fluviali ed il notevole trasporto solido che caratterizza gli eventi di piena dei torrenti alpini, conferisce un ventaglio di problematiche in cui le tecniche devono essere impiegate conoscendo limiti e ambiti di azione e ogni singolo dettaglio della tecnica utilizzata. Impieghi corretti di tali tecniche hanno contribuito alla sistemazione e correzione di torrenti e di corsi d'acqua in ambito alpino a partire dall'alto medioevo. In comune di Oulx risultano, dagli archivi, difese

longitudinali in legname di larice realizzate a seguito dell'alluvione del 1541; resti di tali opere sono stati recentemente rinvenuti in lavori di sistemazione spondale.

Le valutazioni in merito alle tipologie costruttive delle opere trasversali hanno permesso un grande aggiornamento delle briglie in legname e pietrame, che ora vengono costruite con un grande ventaglio di tipologie anche in funzione del tipo di regime torrentizio e del trasporto solido del corso d'acqua da sistemare.

Ricostruzione di versanti e difesa passiva dalla caduta di massi	
Opere in terra rinforzata	Con funzione di contenimento e difesa passiva Con funzione paramassi e paravalanghe Con funzione di sostegno

Tabella 2.12.6 *Tipologie di opere per difesa da caduta massi, (De Antonis e Molinari, 2003, mod)*

Le opere in terra rinforzata permettono di realizzare versanti artificiali di notevole pendenza con benefici in termini di superficie occupata dell'opera medesima. Ciò permette la realizzazione di opere di difesa della viabilità dalla caduta massi in ambiti di versanti incombenti sulla infrastruttura. Si tratta comunque di opere estremamente artificiali in cui la vegetazione assolve un'azione di mascheramento e di cicatrizzazione paesistica, senza poter determinare il completo consolidamento della struttura, che per natura e tipologia costruttiva è affidata alla parte inerte dell'opera.

2.12.3 Ambiti di intervento delle opere di ingegneria naturalistica

Avendo a che fare con materiale vegetale vivo da collocare a dimora in aree in cui è possibile la vegetazione e la crescita in condizioni favorevoli, le opere afferenti all'ingegneria naturalistica possono essere utilizzate solamente all'interno delle fasce altimetriche dei versanti in cui è possibile ritrovare formazioni vegetali naturali. In genere, per semplificazione, le aree considerate ottimali per l'ingegneria naturalistica sono quelle in cui è possibile ritrovare foreste stabili o vegetazione erbacea in contesto di pascoli o di alta quota. Tenendo conto del tipo di pericolo naturale trattato nel presente volume, ovvero la caduta massi, si prende unicamente in considerazione la fascia vegetazionale potenzialmente occupata dalla foresta in quanto soggetto in grado di ostacolare attivamente o passivamente la caduta dei massi.

Le foreste che assolvono alla funzione di protezione diretta

Da sempre l'uomo attribuisce alle foreste un'importante funzione protettiva. Questa funzione è svolta con diverse modalità ed è indirizzata a diversi aspetti e componenti sia dell'ecosistema forestale, sia delle attività e degli interessi dell'uomo.

Una prima modalità di protezione (funzione di protezione generica o indiretta) è quella che la foresta svolge nei confronti della conservazione del suolo dall'erosione diffusa o incanalata. Questa è svolta da tutti i popolamenti forestali, ma è più o meno importante in funzione di giacitura, pendenza, morfologia e condizioni geopedologiche. In conseguenza di questo ruolo generico di protezione, ed anche della maggiore importanza che la funzione produttiva aveva nel passato, in Italia si è spesso utilizzato il termine "foresta di protezione" per tutte quelle foreste che non svolgono una prioritaria funzione produttiva. In questi popolamenti di solito non si prescriveva nessun intervento selvicolturale oppure questi erano prudenti e localizzati. Nelle foreste di montagna, proprio in conseguenza del valore economico dei boschi, si assegnava una funzione produttiva ai popolamenti forestali localizzati più a bassa quota e più accessibili ed una funzione protettiva a quelli localizzati più ad alta quota o meno accessibili.

Una seconda modalità di protezione è quella che la foresta svolge nei confronti dei pericoli naturali: valanghe, caduta massi, scivolamenti superficiali e lave torrentizie. In questo caso la foresta agisce sia impedendo il verificarsi dell'evento sia mitigandone l'effetto. Il ruolo della foresta non ha la stessa importanza e non agisce nello stesso modo nei confronti di tutti i pericoli naturali. In assenza dell'uomo i pericoli naturali possono essere considerati normali fattori di disturbo che agiscono nell'ambito della dinamica forestale. La presenza umana è il fattore discriminante in quanto, in questo caso, la foresta protegge direttamente l'uomo, le sue attività e interessi, assolvendo dunque ad una "funzione di protezione diretta".

Al contrario della protezione generica, che è assolta dalla foresta con la sua presenza (ma può variare con il

grado di copertura degli strati arboreo, arbustivo ed erbaceo), la protezione diretta può essere svolta efficacemente solo da popolamenti forestali aventi determinate caratteristiche (composizione, densità, stratificazione, tessitura) in funzione dei pericoli naturali presenti. Il mantenimento in modo efficace e sostenibile della protezione diretta è quindi possibile solo attraverso l'applicazione di trattamenti selvicolturali continui e specifici. Le foreste di protezione diretta, pertanto, costituiscono una priorità assoluta nell'ambito della pianificazione e della gestione selvicolturale delle foreste di montagna.

Un pericolo naturale è un “processo naturale potenziale o in evoluzione che può produrre effetti negativi per l'uomo o per l'ambiente”. Non tutti i pericoli naturali interagiscono allo stesso modo con le foreste e quindi sono presi in considerazione solo valanghe, caduta massi, scivolamenti superficiali e lave torrentizie, ossia quelli suscettibili di essere controllati o mitigati dalla presenza di una copertura forestale avente determinate caratteristiche strutturali.

Ogni pericolo naturale è caratterizzato da un'area di influenza e da una probabilità temporale che un evento di una data intensità si verifichi in un determinato periodo di tempo (tempo di ritorno). In molti casi la presenza del bosco di fatto impedisce il verificarsi del pericolo naturale e, quindi, la definizione di pericolo include la potenzialità del suo verificarsi in assenza di bosco. La pericolosità è la probabilità temporale che un evento naturale (potenziale o in evoluzione) di data intensità riguardi una certa area in un determinato periodo di tempo. La pericolosità include condizioni latenti rappresentanti una futura minaccia per l'uomo e l'ambiente e generalmente è espressa in termini di probabilità annuale.

In quest'ambito non sono invece analizzati in modo dettagliato i pericoli naturali (o di origine antropica) che possono potenzialmente distruggere la foresta quali schianti da vento, incendi, pullulazioni di insetti o altri eventi di origine biotica. Il verificarsi di questi eventi può tuttavia compromettere la stabilità della foresta ed il mantenimento della funzione protettiva, quindi la loro presenza (reale o potenziale) deve essere presa in considerazione al momento delle scelte selvicolturali.

Le zone in cui avvengono le cadute di massi in foresta si dividono in:

- *Zona di distacco.* In questa zona i blocchi o massi si staccano. Possono essere presenti pareti rocciose o semplici affioramenti rocciosi con inclinazioni superiori a 30°. Le radici delle piante possono aiutare a contenere il fenomeno stabilizzando il terreno, anche se proprio lo sviluppo delle radici all'interno dei blocchi può accelerare i processi disaggregativi favorendo la caduta di massi. In caso di ribaltamento degli alberi (per vento, neve), i massi, prima bloccati dall'apparato radicale, possono rotolare verso valle. I processi possono essere favoriti dall'orientazione sfavorevole della stratificazione, dalla scistosità e dalla fratturazione della massa rocciosa. A volte la zona di distacco può essere puntiforme, in corrispondenza di blocchi tenuti fermi da alberi instabili che, al diminuire dell'effetto di arresto, ne permettono la caduta verso valle.
- *Zona di transito.* La topografia del versante, la rugosità del terreno, la profondità del suolo caratterizzano la zona di transito. I blocchi o massi rotolano se il versante ha inclinazioni comprese tra 30° e 35°. Al di sopra dei 35° i massi possono rimbalzare con traiettorie e dinamiche di difficile previsione. La stessa perdita di energia dovuta all'impatto col suolo o contro ostacoli, tra cui gli alberi, è ancora di incerta valutazione. I punti di impatto dei massi al suolo sono spesso caratterizzati da dispersione degli strati superficiali del suolo con conseguente innesco di processi erosivi. All'interno dei percorsi preferenziali di transito la crescita stabile della vegetazione è fortemente limitata. Le piante arboree ed arbustive possono formare un ostacolo fisico al transito dei massi, in funzione della specie, della densità, del diametro, della struttura e tessitura del popolamento. Ovviamente la capacità delle piante di ostacolare il transito dei massi è fortemente influenzata dalla loro dimensione. All'aumentare delle dimensioni dei massi diminuisce la capacità degli alberi con piccoli diametri di formare una barriera efficace. Danneggiamenti ripetuti al fusto possono diminuire la stabilità della singola pianta e conseguentemente dell'intero popolamento.
- *Zona di deposito.* Al diminuire dell'inclinazione (ovvero valori inferiori a 25°) i massi ed i blocchi tendono a perdere energia cinetica e pertanto a fermarsi. La combinazione della riduzione dell'inclinazione e della presenza di terreno rugoso e ricco di ostacoli determina una maggiore efficienza della zona di deposito. Diminuendo l'energia dei blocchi e dei massi, anche alberi con piccoli diametri possono fermare massi di grosse dimensioni, cosa che non accade nella zona di transito.



Figura 2.12.1 Foresta di protezione dalla caduta massi

Le aree in foresta interessate dal pericolo naturale sono facilmente individuabili attraverso il riconoscimento dei seguenti fenomeni indicatori:

- pareti rocciose da cui si possono staccare massi o blocchi di diverse dimensioni;
- alberi schiantati o danneggiati sul fusto nel lato di monte a causa dell'impatto con i massi;
- versanti molto ripidi con pendenza superiore all'angolo di naturale declivio dei detriti di falda e dei depositi glaciali;
- presenza di tracce di impatto al suolo di massi e blocchi;
- blocchi a terra al piede degli alberi, di radici o di tronchi abbattuti, in corrispondenza di alberi ribaltati o con danni al fusto, lungo linee preferenziali sulla massima pendenza, di colatoi od impluvi colonizzati da arbusti o da latifoglie di giovane età;

- memoria di eventi pericolosi o dati contenuti in carte tecniche o in piani territoriali;
- presenza di opere a difesa di infrastrutture.

2.12.4 Utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica per la protezione dalla caduta massi (difesa dall'erosione superficiale, miglioramento della capacità drenante dei terreni, rinaturalizzazione e manutenzione dei versanti)

All'interno delle tecniche di ingegneria naturalistica, solo alcune di queste possono svolgere un'effettiva azione di contrasto, attiva o passiva, nei confronti del pericolo naturale di caduta massi.

Tenendo come riferimento l'elenco delle tecniche già riportato nei capitoli precedenti, sono state evidenziate le tecniche ritenute utilizzabili nell'ambito circoscritto del pericolo naturale analizzato.

In questo gruppo di interventi le azioni maggiormente significative (riportate in verde all'interno della **tabella 2.12.7**) sono il rimboschimento e gli interventi selvicolturali.

Difesa dall'erosione superficiale, miglioramento della capacità drenante dei terreni, rinaturalizzazione e manutenzione dei versanti		
Rivegetazione e gestione forestale	Tecniche di inerbimento	Semina manuale a spaglio Idrosemina Semine protette
	Messa a dimora di specie arbustive ed arboree	Rimboschimenti anche con l'ausilio di protezioni
	Cespugliamenti consolidanti	Gradonate vive Cordonate vive
	Interventi selvicolturali	Manutenzione dei versanti Manutenzione di alvei e sponde
Geosintetici e fibre naturali		Geotessili Geomembrane Prodotti correlati

Tabella 2.12.7 Esempi di tecniche utilizzabili

Interventi selvicolturali

All'interno della foresta le radici degli alberi trattengono i blocchi, ma possono altresì esercitare un'azione negativa accelerando l'alterazione delle rocce con il rilascio di essudati radicali e con i processi di decomposizione della lettiera a reazione acida. Le radici possono inoltre svilupparsi nelle fessure della roccia favorendo così un'ulteriore alterazione della stessa. Tali fenomeni sono più marcati quando la stratigrafia della roccia madre è parallela alla pendenza. I blocchi possono inoltre mettersi in moto quando gli alberi subiscono degli

sradicamenti. Il vento, infine, può agire tanto intensamente sulle chiome degli alberi (per lo più se di altezza superiore a 20 m), fino a indurre il movimento dell'apparato radicale e causare il distacco di massi.

Quindi, gli effetti della foresta dipendono non solo dalla natura geologica e dalla topografia del luogo, ma anche dalla composizione specifica, dall'ancoraggio e dall'altezza del popolamento forestale.

Il legno morto a terra, sul breve e medio periodo, esercita un effetto positivo, purché non sia indotto a scivolamento; tale fenomeno è favorito dalla pendenza del versante e dall'azione dei movimenti del manto nevoso.

Sul lungo periodo, la velocità di decomposizione del materiale legnoso al suolo, in funzione delle caratteristiche climatiche del sito, può determinare nuovamente la movimentazione dei massi accumulatisi nel tempo.

Zona di transito

In linea di massima su inclinazioni comprese tra 30° e 35° i massi rotolano o scivolano, mentre su inclinazioni superiori, possono anche rimbalzare al suolo. Al contatto con il suolo o con gli ostacoli, i blocchi dissipano energia e possono variare di direzione o ancora essere fermati nel loro moto. Gli urti con gli alberi dissipano energia rallentando la velocità di caduta del blocco o lo fermano provvisoriamente. La diminuzione della velocità determina anche una minore altezza di rimbalzo.

Gli effetti esercitati dagli alberi dipendono dal loro diametro e dalla dimensione dei blocchi:

- gli alberi di piccolo diametro sono difficilmente colpiti dai massi, il loro effetto è debole;
- gli alberi di maggiori dimensioni possono essere danneggiati o schiantati dai massi, in funzione dell'energia cinetica;
- l'effetto della foresta sulla caduta di massi di grandi dimensioni ($> 5 \text{ m}^3$) è trascurabile;
- prove sperimentali hanno dimostrato che gli alberi in piedi sono in grado di dissipare maggiore energia rispetto ad alberi al suolo, seppure ancorati a ceppaie (reazione dinamica delle radici e delle foglie).

La problematica del diametro minimo efficace riveste una particolare importanza: se il diametro degli alberi è grande, non sarà possibile garantire perennemente nel tempo la presenza di tale struttura della foresta. Di qui nasce la necessità di conoscere quale sia la struttura della foresta maggiormente efficace per garantire la protezione dalla caduta massi. Inoltre, non solo il diametro, ma anche il numero di piante presenti e la loro distribuzione sul versante hanno un ruolo fondamentale.

Infatti, i blocchi possono raggiungere la loro massima velocità ad una distanza di circa 40 m dalla zona di distacco, quindi coprire grandi distanze, rimbalzando anche ripetutamente al suolo.

Ciò significa che una foresta situata a monte di un'apertura di 40 m di lunghezza ha un'influenza trascurabile nei confronti dei massi che attraversano il bosco e giungono nella foresta sottostante. Per assicurare una buona protezione, pertanto, nella definizione delle esigenze minime, è stata indicata la lunghezza massima ammissibile di 20 m lungo la massima pendenza.

Un elevato numero di piante genera poi un gran numero di urti con i blocchi, che dissipano maggiore energia. Il numero di piante/ha che possono coesistere stabilmente in bosco è tuttavia limitato.

Per fermare blocchi di piccole dimensioni sono sufficienti alberi di diametro minore, in numero tuttavia superiore. Nel caso in cui la superficie forestale sia estesa, il ruolo della foresta aumenta, soprattutto nella zona prossima al distacco dei blocchi, in quanto rende possibile l'arresto dei massi prima che raggiungano elevate velocità di caduta.

Zona di arresto e deposito

La velocità di caduta dei blocchi diminuisce lungo il percorso anche in assenza di urti contro gli ostacoli, in quanto i massi possono rotolare, dissipando la loro energia, anche su lunghe distanze, su inclinazioni comprese tra 25° e 30°; essi si fermano in genere entro la breve distanza su inclinazioni inferiori a 25°. I massi che si fermano in assenza di urti non si metteranno nuovamente in movimento. I fattori che contribuiscono all'arresto dei massi sono gli stessi menzionati per la zona di transito. Gli urti contro gli alberi rallentano o fermano definitivamente i massi. In principio, l'effetto degli alberi è lo stesso che nella zona di transito,



Figura 2.12.2 Foresta di protezione contro la caduta dei massi sulla SS 24. Parte terminale intervento selvicolturale a favore dello sviluppo della rinnovazione esistente

pertanto, dal momento che la velocità dei massi è minore, il diametro minimo efficace degli alberi diminuisce. Un elevato numero di alberi, sebbene di modeste dimensioni, provoca un gran numero di urti con i massi. Il legno morto al suolo aumenta la rugosità del versante e i massi sono fermati in modo definitivo.

Dal momento che nella zona di deposito il movimento dei blocchi passa dal rimbalzo allo scivolamento, l'effetto del legno al suolo è particolarmente forte. I tronchi non sramati sono particolarmente efficaci. Nell'analisi del processo di caduta massi è necessario prendere in considerazione le particolarità topografiche locali. In modo particolare nella zona di transito piccole aree con pendenza ridotta, possono essere gestite come aree di arresto e deposito: in questi luoghi il legno morto al suolo riveste particolare importanza.

Determinazione del diametro minimo efficace

Il diametro minimo efficace è quello che le piante debbono avere per contrastare efficacemente la caduta dei massi. I valori indicati come esigenze minime nelle "zone di transito" si riferiscono a versanti la cui inclinazione è prossima a 30°- 35°. Il diametro minimo efficace può variare in funzione di tale fattore, della forma dei massi, della natura del suolo e della rugosità del versante, oltre che delle specie presenti in foresta.

Fattori che fanno aumentare il diametro minimo efficace:

- inclinazione del versante > 35°;
- massi di forma sub-sferica;
- suolo roccioso, superficiale o compatto che limita l'ammortizzamento;
- bassa rugosità del terreno;
- specie con legno di minor consistenza (abete rosso, abete bianco);
- specie sensibili a marciumi e carie del fusto (abete rosso, faggio).

Fattori che fanno diminuire il diametro minimo efficace:

- inclinazione del versante < 30°;
- massi di forma angolare, allungata;
- buon ammortizzamento da parte del suolo (es. suolo poco compatto, presenza di alberi al suolo non sramati);
- forte rugosità del terreno (presenza al suolo di massi stabili, legno morto ben ancorato, ceppaie alte);
- specie con legno meccanicamente resistente (faggio, robinia, querce);
- specie il cui legno è resistente a marciumi e carie del fusto (larice, latifoglie).

Messa a dimora di specie arbustive ed arboree

Per quanto concerne i rimboschimenti essi devono essere effettuati laddove la densità del popolamento forestale non pare in grado di contrastare la caduta dei massi. Per quanto concerne questo aspetto esistono numerosi studi effettuati soprattutto in Francia che evidenziano la necessità di un definito numero di fusti ad ettaro in funzione della tipologia e dimensione dei massi che possono transitare all'interno della foresta.

La permeabilità della struttura forestale può essere ridotta aumentando pertanto il numero di piante

Parametri		Localizzazione	Dimensione massi	Esigenze minime	Esigenze ideali
Composizione		Zona di arresto e di deposito		Specie con legno meccanicamente resistente (robinia, querce, faggio) e specie con legno resistente a marciumi e carie del fusto (larice, latifoglie), compatibilmente con il tipo di stazione	
Densità	n° piante / ha	Zona di transito	Blocchi $\leq 0.05 \text{ m}^3$ (\varnothing 40 cm)	Almeno 400 piante/ha con $\varnothing > 12.5 \text{ cm}$	Almeno 600 piante/ha con $\varnothing > 12.5 \text{ cm}$
		Zona di arresto e di deposito	Blocchi da 0.05 a 0.20 m^3 (\varnothing da 40 a 60 cm)	Almeno 300 piante/ha con $\varnothing > 24 \text{ cm}$	Almeno 400 piante/ha con $\varnothing > 24 \text{ cm}$
			Blocchi da 0.20 a 5.00 m^3 (\varnothing da 60 a 180 cm)	Almeno 150 piante/ha con $\varnothing > 36 \text{ cm}$	Almeno 200 piante/ha con $\varnothing > 36 \text{ cm}$
			Per massi eterogenei, di tutte le dimensioni	Almeno 400 piante/ha con $\varnothing > 12.5 \text{ cm}$	Almeno 600 piante/ha con $\varnothing > 12.5 \text{ cm}$
% Copertura	Zona di transito, arresto e di deposito	Indifferente, purché sia rispettato il n. piante/ha			
Struttura	Aperture	Zona di transito	Per massi di tutte le dimensioni	Aperture lungo la linea di massima pendenza con distanza tra i tronchi $< 20 \text{ m}$	
		Zona di arresto e di deposito		Aperture lungo la linea di massima pendenza distanza tra i tronchi $< 20 \text{ m}$ Eventualmente polloni Tronchi a terra e ceppaie alte come complemento agli alberi in piedi	
Elementi di stabilità	Ancoraggio	Zona di distacco	Assenza di alberi instabili e/o di grandi dimensioni		
		Zona di transito, arresto e deposito	Assenza di alberi instabili		



Figura 2.12.3 Apparato radicale - funzione di trattenuta e consolidamento dei massi in area di protezione lungo viabilità pedonale

Tabella 2.12.8 Tabella riassuntiva degli elementi di interesse per la caduta massi

ad ettaro, riducendo altresì, una volta sviluppate le piante introdotte, le aperture lungo la massima pendenza del versante.

Le piante da utilizzarsi per il rimboschimento devono essere in grado di poter vegetare senza ulteriori stress oltre a quello del trapianto e crescere correttamente nei primi anni di vita. Ecco perché è necessario che il postime forestale sia fornito in pane di terra o in contenitore evitando forniture di piante a radice nuda in quanto l'apparato radicale potrebbe facilmente subire danni non rimarginabili ed in grado di contribuire fortemente ad una riduzione della stabilità futura della pianta medesima.

In caso di versanti in cui la densità della formazione forestale non è in grado di contrastare la caduta dei massi ed in cui la caduta dei massi è frequente si deve prevedere la realizzazione di strutture inerti in grado di opporre un contrasto alla caduta dei massi.

Tali opere definite temporanee, in quanto verranno successivamente sostituite dai fusti delle piante messe a dimora, sono di seguito descritte.

Palificate semplici a pali sovrapposti in legname

Le palificate semplici a pali sovrapposti hanno la funzione di arrestare la caduta verso valle dei massi. Hanno il vantaggio di essere opere economiche ed efficaci soprattutto in caso di popolamenti forestali interessati da alterazioni naturali quali incendi, schianti da vento, ovvero situazioni in cui vi è una grande disponibilità di fusti e di punti di ancoraggio (ceppaie non ribaltate), senza dover approvvigionare il cantiere di materiali ad eccezione del postime forestale in contenitore o pane di terra (**figura 2.12.4**). L'unico limite

strutturale è la durata dell'opera che deve essere compatibile con la capacità di crescita delle piante, cui è affidato il compito di sostituire l'opera temporanea in legname, quando cesseranno per marcescenza le funzioni strutturali.

Trattandosi di opere temporanee se ne consiglia la realizzazione non lungo le curve di livello ma inclinate lungo il versante al fine di non accumulare massi a monte difficilmente stabilizzabili in caso di crollo della struttura. Se le opere invece sono costruite a 45° rispetto alla linea di massima pendenza i massi intercettati andranno a bloccarsi solamente in corrispondenza di micromorfologie del terreno favorevoli conservando la loro stabilità anche quando l'opera cesserà le sue funzioni di trattenuta.

Il rimboscimento andrà realizzato su gradoni sufficientemente grandi e stabili favorendo la crescita ottimale delle giovani piantine.



Figura 2.12.4 Palificate semplici a pali sovrapposti in foresta di protezione dalla caduta massi e percorsa da incendio. Le palificate sono state costruite a monte dei nuclei di rimboscimento

Cavalletti treppiede

I cavalletti treppiede sono una tecnica mutuata dalle opere contro lo scivolamento del manto nevoso (**figura 2.12.5**). Essendo strutture molto stabili, se correttamente realizzate, possono parimenti contribuire ad intercettare massi in transito all'interno del bosco o della zona di intervento. Particolare attenzione dovrà essere posta nella corretta realizzazione del piano di fondazione del puntone e dell'ancoraggio del corrente di ancoraggio a monte al fine di poter contrastare efficacemente l'energia dei massi in caduta. Posti secondo un disegno geometrico definito (losanghe o porzioni di triangoli con il vertice verso monte) devono essere realizzati subito a monte dei nuclei di rimboscimento, ovvero a protezione delle giovani piantine (**figura 2.12.6**). Come per le palificate semplici a pali sovrapposti, sopra descritte, la loro efficacia strutturale e temporale deve essere uguale o superiore alla capacità di crescita delle piante, al fine di garantire la protezione

Figura 2.12.5 Cavalletti treppiede per la stabilizzazione del manto nevoso che in caso di zone di caduta massi possono contribuire alla protezione delle piantine forestali utilizzate nei rimboscimenti



Figura 2.12.6 Cavalletti treppiede visto da monte, posti a protezione della viabilità forestale





Figura 2.12.7 Infissione di picchetti in legno, taglio piante morte in bosco di protezione (caduta massi e caduta valanghe) percorso da incendio, con realizzazione di palizzate in legname



Figura 2.12.8 Pali infissi e ceppi di larice posti a protezione di area oggetto di rimboschimento di protezione



Figura 2.12.9 Interventi selvicolturali all'interno della foresta di protezione dalla caduta massi. I tronchi abbattuti sono disposti a 45° a protezione della rinnovazione naturale in zona di transito ed arresto

auspicata. In alcuni casi in presenza di massi in caduta di piccole dimensioni, ovvero sotto 30-40 cm di diametro, i cavalletti possono essere migliorati attraverso la posa di reti tra i traversi o collocando 2 o 3 correnti vincolati ai traversi al fine di diminuire la permeabilità dell'opera.

Picchetti in legno

Opera estremamente semplice ed economica se realizzata in formazioni forestali in cui vi sia disponibilità di materiale legnoso. I picchetti in legno verranno posti a monte dei gruppi di rimboschimento o a monte della rinnovazione forestale esistente cui si vuole assicurare un periodo di riduzione di impatti con i massi in transito verso valle (**figura 2.12.7** e **2.12.8**). La densità di impianto dipende dalle caratteristiche del bosco ed è inversamente proporzionale alla permeabilità al transito dei massi. In genere si consiglia un impianto che riduca le aperture superiori a 20 m, lungo la massima pendenza, preferendo sestii di impianto a losanga per gruppi di quattro picchetti.

I picchetti devono avere diametro adeguato a resistere all'impatto con i massi e pertanto non inferiore a 20 cm. La profondità di infissione, mai minore a 1 m, è in funzione del substrato presente nel sito di impianto.

Posizionamento di fusti a 45° lungo il versante

Questa tecnica di grande efficacia accompagna sempre gli interventi selvicolturali all'interno delle foreste di protezione diretta. Le piante, abbattute al fine di migliorare la struttura del popolamento, possono essere collocate a 45° lungo la massima pendenza a simulare palificate semplici a pali sovrapposti che passivamente si oppongono alla caduta dei massi, all'interno delle zone di transito in foresta (**figura 2.12.9**). L'efficacia è la medesima delle palificate semplici a pali sovrapposti inclinate sul versante, con il vantaggio di una lavorazione più semplice e pertanto meno costosa, soprattutto quando l'esbosco del legname abbattuto non è possibile o troppo oneroso.

Le piante se abbattute da boscaioli professionali ed esperti vengono fatte cadere nella posizione attesa senza ulteriori aggravii di lavorazioni successive dovute al loro spostamento nella sede corretta. Le piante non vengono sramate al fine di aumentare gli ostacoli alla caduta dei massi. Come per i cavalletti treppiede queste opere sono parimenti impiegate per il controllo dello scivolamento del manto nevoso all'interno delle foreste di protezione diretta. A valle delle piante abbattute vanno posti a dimora i gruppi di rinnovazione artificiale, accanto ai quali trovano favorevoli condizioni di attecchimento le piantine nate per rinnovazione naturale.

2.12.5 Utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica per la protezione dalla caduta massi (ricostruzione strutturale dei versanti, sostegno, contenimento, consolidamento, protezione dall'erosione)

In questo gruppo di interventi le azioni maggiormente significative (riportate in verde all'interno della **Tabella 2.12.9**) sono le palificate semplici, le palificate vive di sostegno e le grate vive.

Ricostruzione strutturale dei versanti, sostegno, contenimento, consolidamento, protezione dall'erosione		
Opere in legname	Palificate semplici	Palificate semplici Palificate semplici a pali sovrapposti Palificate semplici a piloti incrociati
	Palificate vive di sostegno	Palificate vive di sostegno ad una parete Palificate vive di sostegno a doppia parete Palificate vive di sostegno a doppia parete con ancoraggi profondi Sistemi di palificate a gradoni
	Opere di stabilizzazione superficiale	Stecconate Viminate o graticciate Fascinate
	Grate vive	Grate vive a camera semplice Grate vive a camera doppia Grate vive a funi Murature in pietrame Gabbioni

Tabella 2.12.9 Interventi di ricostruzione e sostegno dei versanti

Figura 2.12.10 Palificate semplici all'interno di corpo di frana con potenziale caduta di massi verso la sottostante viabilità forestale



Palificate semplici a pali sovrapposti in legname

Le palificate semplici a pali sovrapposti hanno la funzione di arrestare la caduta verso valle dei massi (**figura 2.12.10**). Il loro impiego è pertanto consigliato all'interno della zona di arresto piuttosto che nella zona di transito dove la pendenza può risultare eccessiva. Hanno il vantaggio di essere opere economiche ed efficaci soprattutto in caso di popolamenti forestali interessati da alterazioni naturali quali

incendi, schianti da vento, ovvero situazioni in cui vi è una grande disponibilità di fusti e di punti di ancoraggio (ceppaie non ribaltate) senza dover approvvigionare il cantiere di materiali ad eccezione del postime forestale in contenitore o in pani di terra. Se esterne alle formazioni forestali deve risultare possibile l'approvvigionamento del cantiere utilizzando strade o percorso pedonali. Come per le palificate descritte nel paragrafo inerente i rimboschimenti il materiale vegetale vivo è rappresentato da postime forestali, alberi o arbusti, talee di salice. Ovviamente maggiore è il diametro che le piante introdotte potranno raggiungere e maggiore sarà nel tempo l'efficacia dell'azione contro la caduta dei massi. Particolare attenzione deve essere riservata alla corretta posa e dimensionamento dei picchetti che non devono mai essere in legname ma in ferro o acciaio di almeno 3 cm di diametro.

Palificate vive di sostegno

Le palificate di sostegno, siano ad una o a doppia parete, possono svolgere un'azione efficace all'interno di nicchie di frana o dissesti in genere in cui nel detrito di falda siano presenti massi potenzialmente in grado di gravitare verso valle. L'azione di queste opere è quella di stabilizzare il versante e di conseguenza i massi in esso inglobati (**figure da 2.12.11 a 2.12.14**). Per necessità costruttive non possono essere costruite con il lato di monte aperto a formare un vallo ad eccezione di quei casi in cui anche il fronte di monte è costruito e consolidato con la medesima tecnica. Alcuni esempi sono stati realizzati sulle alpi piemontesi con risultati interessanti (**figure 2.12.15 e 2.12.16**) anche se da un punto di vista puramente ecologico queste strut-



Figura 2.12.11 Bosco di larice e pino uncinato con funzione di protezione contro la caduta massi. Al piede del versante sono state costruite palificate di sostegno di ausilio alla stabilità del versante e per controllare la caduta massi sulla viabilità forestale (vedi figura seguente)



Figura 2.12.12 Palificate di sostegno a doppia parete in versante con caduta massi. L'opera è funzionale alla stabilizzazione del versante ed a proteggere la viabilità forestale diminuendo la pendenza del versante a monte strada



Figura 2.12.13 Impluvi in frana consolidati con palificate di sostegno con funzione di stabilizzazione del detrito di falda contenute trovanti e massi - situazione prima intervento



Figura 2.12.14 Impluvi in frana consolidati con palificate di sostegno con funzione di stabilizzazione del detrito di falda contenute trovanti e massi - dopo intervento



Figura 2.12.15 Vallo paramassi costruito a protezione di Claviere e realizzato con palificate di sostegno a doppia parete in legname



Figura 2.12.16 Lato esterno del vallo paramassi realizzato con successione di palificate di sostegno

Figura 2.12.17 Grata viva con rete metallica per evitare lo svuotamento dei cassoni in legno (Foto P. Gallo G. Blanchard)



ture risultano estremamente drenanti e pertanto di difficile colonizzazione da parte della vegetazione introdotta artificialmente o presente per rinnovazione naturale, che rappresenta la componente in grado di garantire la stabilità funzionale dell'opera nel tempo e in grado di sostituire il legname quando esso cesserà di svolgere funzioni strutturali.

Grate vive

Le grate vive, essendo realizzate per cicatrizzare dissesti in cui l'inclinazione del fronte di frana è estremamente elevato (superiore a 45°), svolgono una interessante funzione di stabilizzazione e consolidamento di eventuali massi presenti all'interno del ciglio di frana.

Queste opere, per la loro capacità di consolidare pendii estremamente ripidi possono trovare largo impiego all'interno dei dissesti in ambito alpino a condizione che l'ancoraggio sia effettuato a perfetta regola d'arte (figura 2.12.17).

2.12.6 Utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica per la protezione dalla caduta massi (ricostruzione di versanti e difesa passiva dalla caduta di massi)

Ricostruzione di versanti e difesa passiva dalla caduta di massi	
Opere in terra rinforzata	Con funzione di contenimento e difesa passiva
	Con funzione paramassi e paravalanghe
	Con funzione di sostegno

Tabella 2.12.10 Opere in terra rinforzata

Opere in terra rinforzata

Le opere in terra rinforzata vengono normalmente utilizzate per consolidare il piede di pendii in dissesto, in cui l'elevata pendenza non rende possibile realizzare gli interventi tipici di versanti con pendenze limitate (figura da 2.12.18 a 2.12.20). La necessità di realizzare pendii consolidati con fronti di valle con inclinazioni fino a 70° rende estremamente interessanti queste tipologie costruttive. Tali opere consentono inoltre una elevata flessibilità con deformazioni relative qualora si verificassero assestamenti dei terreni e con una buona capacità di assorbimento anelastico di elevate energie cinetiche di impatto, anche dell'ordine dei mega-



Figura 2.12.18 Vallo paramassi realizzato in terra rinforzata - data l'esposizione ai quadranti meridionali e la notevole capacità di drenaggio dell'opera, nonché l'elevata pendenza del fronte, si osservano notevoli difficoltà di attecchimento della vegetazione sia introdotta artificialmente (idrosemia) che per disseminazione naturale

Figura 2.12.19 Vallo paramassi realizzato in terra rinforzata



Figura 2.12.20 vallo paramassi e popolamento forestale sovrastante a funzione di protezione

joule, e pertanto interessanti come vallo paramassi.

Soprattutto a quote elevate ed in genere in ambito montano, i rinverdimenti possono presentare difficoltà di attecchimento a causa dell'elevato drenaggio dell'opera, della notevole pendenza dal fronte esterno e della relativa aridità del substrato non in gradi di trattenere ed accumulare umidità, necessaria per le fasi giovanili delle vegetazione erbacea.

2.12.7 Approfondimenti: cantiere Gran Volta

Il cantiere Gran Volta è stato finalizzato alla definizione di tecniche per il controllo della caduta massi in area di protezione diretta. La superficie forestale interessata dalla caduta massi è un popolamento endalpico di abete rosso e bianco con presenza di pino uncinato larice descritto nelle sue caratteristiche strutturali e dinamiche all'interno della scheda del popolamento riportata in allegato al presente capitolo.

La caduta massi è testimoniata dalla presenza di numerosi massi appoggiati ai fusti, dai numerosi danni presenti sul fusto delle piante e dalla presenza di massi al bordo della strada statale per il Monginevro che transita a valle della formazione forestale. Il cantiere ha interessato due diverse tipologie di interventi: interventi selvicolturali e cavalletti treppiede. Di seguito si riportano i principali aspetti tecnici approfonditi all'interno del cantiere.

Interventi selvicolturali

Dati generali

L'area interessata dall'intervento selvicolturale in oggetto è situata in comune di Cesana Torinese (TO), su superfici di proprietà comunale, corrispondenti alla Particella Forestale n. 85, Foglio di mappa catastale n. 28, Mappale n. 98. Tale area è localizzata sul versante destro della Piccola Dora, in località Gran Volta. Gli interventi selvicolturali hanno interessato solamente parte della superficie della particella forestale, in popolamenti pluriplani con abbondante rinnovazione naturale e a prevalente destinazione di protezione diretta nei confronti della sottostante SS 24 del Monginevro. La gestione delle superfici silvo-pastorali di proprietà comunale è normata dal Piano di Assestamento Forestale del comune di Cesana Torinese, mentre il Piano Forestale Aziendale è in attesa di approvazione.

Sintesi stazionale volta ad evidenziare i problemi connessi alla gestione

I dati descrittivi delle particelle forestali in esame sono desunti dal PFA, che costituisce revisione ed approfondimento del Piano Forestale Territoriale (**tabella 2.12.11**).

Particella n.	85	Quota min (m s.l.m.m.)	1500
Nome particella	Livernea	Quota max (m s.l.m.m.)	1850
Superficie totale (ha)	22.67	Esposizione prev.	NNE
Superficie forestale (ha)	21.4	Pendenza media	66.7% (33.7°)
Altre coperture del suolo (ha)	1.27		
Classe di compartimentazione	Settore 41 Rocca Clari - Massarello		

Tabella 2.12.11 Dati forestali del sito pilota

Le coperture forestali presenti sulla superficie forestale di riferimento (dato catastale) del presente lavoro risultano così ripartite tra le seguenti tipologie forestali: Abetina endalpica; lariceto su rodoreto-vaccinieto, pinete di pino uncinato. L'area interessata dagli interventi selvicolturali è caratterizzata dall'Abetina endalpica, con buona presenza di larice, pino silvestre e pino uncinato. La rinnovazione naturale di abete bianco è particolarmente abbondante, distribuita per gruppi, sporadica e localizzata quella di altre specie.

I suoli presenti sono di seguito descritti.

Suoli bruni mesotrofici colluviali

A partire dai calcescisti costituiscono a tratti disgiunti l'elemento di contatto tra il versante e le piane alluvionali. Attualmente sono presenti formazioni a roverella e pino silvestre, vigneti e castagneti a *Teucrium scorodonia*.

Le pendenze in genere non sono molto accentuate, con frequenti terrazzi. In esposizione nord prevalgono i boschi di castagno, faggio, abete e larice fino a 1 800 m di quota.

Suoli bruni debolmente lisciviati colluviali

Suoli compresi tra 1 500 e 2 000 m di quota, generalmente acidi, formano la continuazione con il tipo precedente. In genere vi si trova prati pascoli, abetine e lariceti e larici cembreti del piano subalpino inferiore, in esposizione nord, nord-est ed in tutti i comuni dell'alta valle Susa.

Il bacino della Piccola Dora è soggetto a fenomeni di dissesto legati all'attività torrentizia dei corsi d'acqua, alla caduta di massi dalle pareti rocciose e alla caduta valanghe, con possibile distacco anche all'interno di popolamenti forestali, che possono interessare la sottostante SS 24 del Monginevro.

In particolare la stazione è interessata da importanti fenomeni di caduta massi che possono interessare la viabilità sottostante (SS 24 del Monginevro), transitabile durante tutto l'anno ed importante via di comunicazione transfrontaliera. Non si escludono limitati fenomeni di scivolamento superficiale, legati all'attività del torrente sul fondovalle, che determina lenti e costanti movimenti del versante, infine le pendenze elevate non escludono la possibilità di distacco di piccole valanghe, localizzate nelle aperture e nei canali presenti all'interno del popolamento forestale.

La compilazione della "Scheda di descrizione e valutazione del ruolo protettivo del popolamento" (**tabella 2.12.13**) relativamente alla foresta oggetto degli interventi selvicolturali analizza dettagliatamente e relazioni che intercorrono tra i pericoli naturali individuati e l'azione mitigatrice esercitata dalle foreste.

Sintetica descrizione del popolamento forestale

La foresta interessata dall'intervento selvicolturale è raggiungibile direttamente dalla strada SS 24 del Monginevro. Poiché non si prevede l'esbosco del materiale legnoso di risulta, bensì l'allestimento dello stesso disposto a 45° lungo il versante, i lavori non interferiscono con il regolare flusso del traffico.

Il popolamento forestale in esame è costituito da un'abetina endalpica st. inferiore (AB51X), caratterizzata da uno strato dominante in cui prevalgono gli esemplari di larice ed abete bianco di grandi dimensioni, accompagnato da uno strato dominato da abbondanti gruppi di rinnovazione naturale di abete bianco, accompagnati da sporadico pino uncinato, pino silvestre e nuclei di larice. Sono pertanto presenti tutte le classi di diametro ed una buona mescolanza specifica, anche se le tendenze evolutive della stazione tendono verso una netta predominanza dell'abete bianco. Alle quote superiori il popolamento evolve verso il larici-cembreto, pressoché monoplano, strutturato per grandi gruppi. L'analisi della situazione evolutivo-culturale della foresta in esame evidenzia un'origine naturale del popolamento, che nel tempo è stato interessato da sporadici interventi selvicolturali, relativi anche ad attività belliche, come denunciato dai numerosi manufatti in pietra presenti in bosco. La discreta fertilità della stazione permette un'evoluzione naturale relativamente rapida di specie sciafile, che si sviluppano sotto la copertura dello strato dominante, pertanto gli interventi selvicolturali assecondano ed accelerano tali tendenze, anche se occorre essere piuttosto cauti nel prelievo di biomassa salendo verso il piano subalpino caratterizzato dal larici-cembreto. La composizione specifica evidenzia le caratteristiche di una stazione endalpica e moderatamente fresca, in cui l'abete bianco tende a prevalere sul larice nel lungo periodo; queste due specie sono accompagnate dal pino uncinato e dal pino silvestre nelle situazioni più secche, quindi da sporadico abete rosso. Le specie arboree presenti sono: larice; abete bianco; pino uncinato; pino silvestre; abete rosso; ginepro; sorbo degli uccellatori; salici.

I tipi strutturali riferiti alla fustaia presenti sulla particella forestale sono i seguenti:

- MM – monoplana a prevalenza di diametri medi (32.5 ÷ 47.5 cm);
- GP – pluripiana per gruppi a prevalenza di diametri piccoli (12.5 ÷ 32.5 cm);
- GM – pluripiana per gruppi a prevalenza di diametri medi (32.5 ÷ 47.5 cm).

Le formazioni monoplane prevalgono alle quote superiori dell'abetina, laddove la rinnovazione naturale non è ancora presente sotto copertura, fino alla transizione verso il larici-cembreto, strutturato per gruppi. Gli alberi di grandi dimensione sono poco abbondanti, mentre prevalgono strutture per gruppi con buona presenza di piante di diametro medio e piccolo. L'area in esame in passato è stata interessata da interventi selvicolturali di modesta entità, riconducibili per lo più ad assegnazioni ad uso focatico o utilizzazioni in periodo bellico, cui è seguito lo sviluppo di una buona prerinnovazione in popolamenti forestali piuttosto radi, anche in seguito alla cessazione del pascolamento in bosco. Attualmente il Piano Forestale Aziendale in corso di approvazione prevede i seguenti interventi selvicolturali nell'area in esame:

- sistema selvicolturale prevalente: evoluzione controllata;
- sistema selvicolturale secondario: aglio a scelta colturale per gruppi;
- lavorazione del suolo: no.

L'evoluzione controllata richiede il monitoraggio costante dei pericoli naturali nei confronti della sottostante SS 24 del Monginevro, unitamente alla valutazione del contributo potenziale della foresta; solamente nei siti di più agevole accesso ed in presenza di prerinnovazione è possibile prevedere il taglio a scelta, con l'esclusiva finalità di migliorare la destinazione protettiva del popolamento forestale, in quanto non è ipotizzabile una gestione di tale foresta a fini strettamente economici (tabella 2.12.12).

Tabella 2.12.12 Piano dei tagli per la particella 85

Particella 85	Priorità			
	Breve (0÷3 anni)	Media (3÷6 anni)	Durevole (6÷9 anni)	Oltre il periodo di piano
Superficie percorsa (ha)	9	0	0	0
Ripresa sulla particella (m ³)	153	0	0	0
Macchiatico	neg	-	-	-

I danni da ungulati selvatici sono particolarmente evidenti sulla rinnovazione di abete bianco (brucamento e scortecciamento), compromettendo in tal modo lo sviluppo di nuovi gruppi di rinnovazione naturale, il loro ottimale sviluppo e, sul lungo periodo, il complessivo portamento e stato fitosanitario degli alberi.

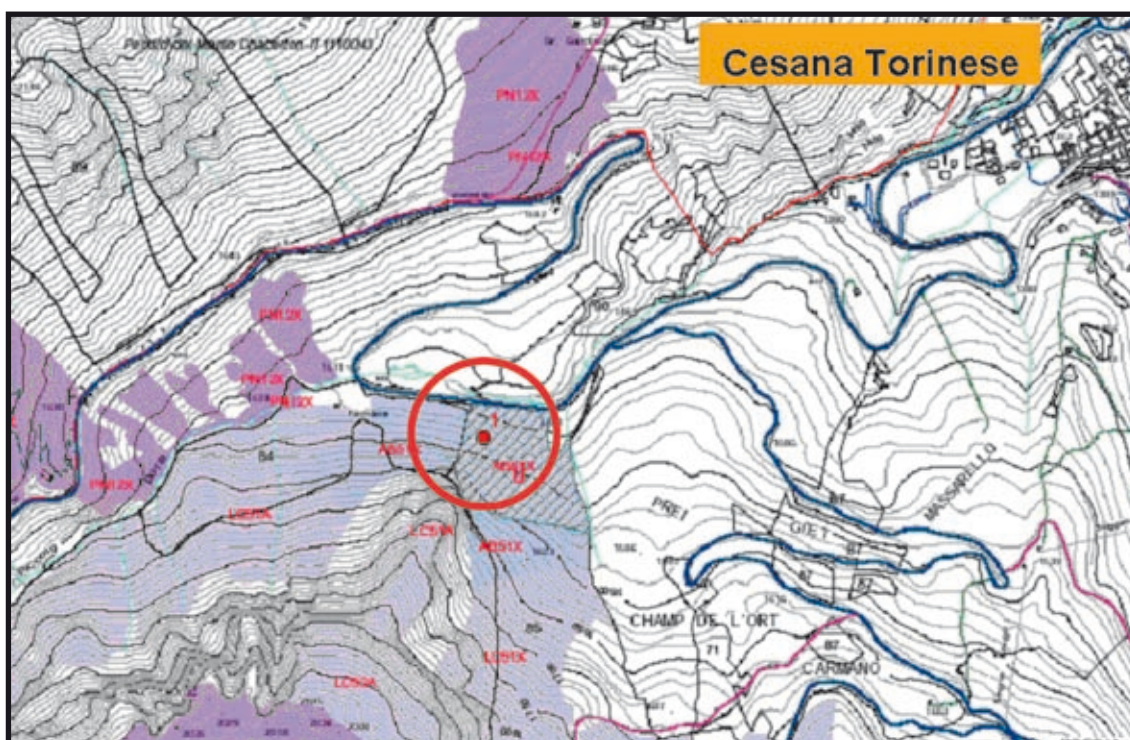


Figura 2.12.21 Localizzazione intervento pilota

Obiettivi ed interventi selvicolturali

L'intervento selvicolturale effettuato sul versante destro del torrente Piccola Dora, in comune di Cesana Torinese, persegue gli obiettivi definiti nel Piano Forestale Aziendale, come illustrati nel paragrafo precedente. La foresta denuncia una evidente tendenza evolutiva verso l'abetina, mentre la presenza di rinnovazione naturale affermata all'interno del popolamento forestale garantisce un'ottima potenzialità di sviluppo di un soprassuolo idoneo a garantire una buona efficienza in termini di protezione dai pericoli naturali.

Destinazioni funzionali prevalenti assegnate al popolamento in esame			
Foglio	Mappale	Destinazione	Superficie (m ²)
02800	98	PT	1 863 115.80

Alle quote superiori rispetto all'area oggetto del presente lavoro prevale l'evoluzione controllata della componente forestale, in stazioni caratterizzate da forti condizionamenti di edifici.

Gli interventi selvicolturali hanno perseguito i seguenti obiettivi:

- limitare il rotolamento di massi in prossimità della SS 24 del Monginevro, mediante l'abbattimento di soggetti anche di grandi dimensioni, instabili e deperienti e la collocazione dei fusti trasversalmente rispetto al pendio, ancorandoli alle ceppaie;
- apertura sui gruppi di rinnovazione al fine di favorirne un rapido sviluppo, tale da incrementare il numero di piante di diametro medio, in grado di ostacolare il rotolamento di massi di dimensioni medio-piccole;
- mantenere un elevato livello di biodiversità, conservando esemplari di larice, pino uncinato, pino silvestre ed abete rosso, in un popolamento in evoluzione verso l'abetina. Tale fattore favorisce anche la resistenza del popolamento nei confronti dei pericoli naturali.





Mediante la scheda di valutazione del ruolo protettivo del popolamento forestale è stato possibile calibrare interventi selvicolturali localizzati in grado di indirizzare la futura evoluzione verso strutture che meglio possano rispondere alla destinazione di protezione assegnata al bosco principalmente nella zona di transito, arresto e deposito, congiuntamente al mantenimento di una buona mescolanza specifica, che favorisca la biodiversità.

In seguito alla scelta del criterio selvicolturale in base al quale procedere alla martellata, nell'area di intervento è stata allestita un'area di saggio di 2 600 m², localizzata sulla cartografia CTR 1:10 000 mediante un ricevitore GPS e identificata sul territorio con segni di vernice rosa sui primi fusti esterni all'area campione. Di tutte le piante dell'area di saggio è stato misurato il diametro con soglia di cavallettamento a 7.5 cm e un numero di altezze di riferimento per il calcolo delle masse legnose. All'interno dell'area le piante da abbattere sono state martellate.

Area di saggio n. 1: vedi **figura 2.12.21**

Dimensioni: 55 m · 55 m
 Inclinazione: 30°
 Superficie: 2 618.8 m²

Tabella 2.19.13 Scheda di descrizione e valutazione del ruolo protettivo del popolamento

   		SCHEDA DI DESCRIZIONE E VALUTAZIONE DEL RUOLO PROTETTIVO DEL POPOLAMENTO Versione 2006			
Comune Cosana - Gran Valta		Particella abetina endalpica ceduta messi		Secondario: distacco di piccoli scivolamenti in bosco	
1. Tipo forestale AB51X		Principale: arbutifera selvalfai		Insufficiente	
2. Pericoli naturali		3. Condizioni		Interventi proponibili	
3a. Contributo potenziale della foresta		4. Stato attuale, tendenze evolutive e individuazione misure adeguate:		8. Obiettivi con parametri verificabili nel breve periodo	
Caratteristiche del popolamento e degli alberi		Stato attuale		Stato e tendenze evolutive nel breve periodo 10 - 20 anni e medio periodo 50	
4 A-Composizione - (espressa in volume %) AA 50% LD 30% PA, PC, PU, PS 20%		Esigenze minime AA 60-80% PA-LD-PC 20-40%		Esigenze ideali AA 20-40% PA-LD-PC min 40%	
4 B-Densità n° piante/ha % copertura		200 piante/ha prima della saliv, 210 piante/ha dopo l'irri 50%		x blocchi da 40 a 60cm diam almeno 400 piante/ha diam >24 cm indifferenti, purché sia rispettato il n piante/ha	
4 C-Struttura - Numero stadi (verticale) - Tassatura (orizzontale) - Aperture		3 fasce 3 stadi per picco d'albero e per gruppi iposporazione > 100 m		3 fasce 3 stadi per picco d'albero e per gruppi <20 m tra i tronchi	
4 D-Elementi di stabilità - Profondità chioma - Simmetria chioma - Ancoreggio		AA > 94, LD e PU > 92 < 10% circa 10% alberi instabili		> 12 < 20% piante fortemente attemerate < 10% assenza di alberi instabili e, nella zona di distacco, di alberi di grandi dimensioni	
4 E-Rinnovazione - Letto di germinazione - Piantale (< 10 cm alt.) Rimov. in via di affermaz.: - da 10 a 40 cm altezza Rinnovazione affermat.: - da 40cm alti a 12,5cm diam.		< 70 assenza fogliare, danni bruciamento su fusti vivi		< 70 assenza	
5. Costi giustificati		6. Necessità d'intervento		10. Riepiлого intervento:	
bassa (> 10 anni)		media (5-10 anni)		Taglio a scala di media densità a carico di larve ed abeti bianchi instabili o di grandi dimensioni, localizzati all'interno di nuclei di rinnovazione affermati di abete bianco. I tronchi saranno eliminati al suolo, disposti a 45° nelle aperture. Al fine di stabilizzare il suolo vicino e prevenire il distacco di piccole valanghe in bosco è prevista la realizzazione di troppi per formare nelle aperture o a protezione dei nuclei di rinnovazione	
alta (< 5 anni)		alta (< 5 anni)		Taglio a scala di media densità a carico di larve ed abeti bianchi instabili o di grandi dimensioni, localizzati all'interno di nuclei di rinnovazione affermati di abete bianco. I tronchi saranno eliminati al suolo, disposti a 45° nelle aperture. Al fine di stabilizzare il suolo vicino e prevenire il distacco di piccole valanghe in bosco è prevista la realizzazione di troppi per formare nelle aperture o a protezione dei nuclei di rinnovazione	
nulla		nulla		Taglio a scala di media densità a carico di larve ed abeti bianchi instabili o di grandi dimensioni, localizzati all'interno di nuclei di rinnovazione affermati di abete bianco. I tronchi saranno eliminati al suolo, disposti a 45° nelle aperture. Al fine di stabilizzare il suolo vicino e prevenire il distacco di piccole valanghe in bosco è prevista la realizzazione di troppi per formare nelle aperture o a protezione dei nuclei di rinnovazione	
minima		minima		Taglio a scala di media densità a carico di larve ed abeti bianchi instabili o di grandi dimensioni, localizzati all'interno di nuclei di rinnovazione affermati di abete bianco. I tronchi saranno eliminati al suolo, disposti a 45° nelle aperture. Al fine di stabilizzare il suolo vicino e prevenire il distacco di piccole valanghe in bosco è prevista la realizzazione di troppi per formare nelle aperture o a protezione dei nuclei di rinnovazione	
massima		massima		Taglio a scala di media densità a carico di larve ed abeti bianchi instabili o di grandi dimensioni, localizzati all'interno di nuclei di rinnovazione affermati di abete bianco. I tronchi saranno eliminati al suolo, disposti a 45° nelle aperture. Al fine di stabilizzare il suolo vicino e prevenire il distacco di piccole valanghe in bosco è prevista la realizzazione di troppi per formare nelle aperture o a protezione dei nuclei di rinnovazione	

Ad ettaro		N piante/ha rilasciate		G rilasciate		V rilasciate		N piante/ha togliere		G togliere		V togliere	
SPECIE	CL diam	Vive	Morte	Vive	Morte	Vive	Morte	Vive	Morte	Vive	Morte	Vive	Morte
Abete bianco	10	38	4	0.24	0.02	1.69	0.13	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	15	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	4	0	0.08	0.00	0.47	0.00
	20	8	8	0.27	0.21	1.79	1.64	4	0	0.13	0.00	0.92	0.00
	25	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	4	0	0.22	0.00	1.73	0.00
	30	15	0	1.03	0.00	8.91	0.00	4	0	0.31	0.00	2.75	0.00
	35	8	0	1.12	0.35	10.92	2.69	15	4	1.06	0.35	12.06	2.69
	40	27	4	3.27	0.48	34.80	3.88	8	0	1.03	0.00	10.09	0.00
	45	19	0	3.12	0.00	37.16	0.00	8	0	1.30	0.00	13.64	0.00
	50	8	0	1.53	0.00	18.44	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	55	11	0	2.62	0.00	30.12	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	60	11	0	3.27	0.00	36.60	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
65	8	0	2.61	0.00	30.33	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
Abete rosso	30	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	4	0	0.29	0.00	2.36	0.00
Larice	40	4	0	0.53	0.00	7.22	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	45	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	4	0	0.61	0.00	7.22	0.00
	55	4	0	0.94	0.00	10.88	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	60	4	0	1.15	0.00	12.32	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	65	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	4	0	1.19	0.00	12.70	0.00
	75	4	0	1.73	0.00	18.25	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
80	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	4	0	1.97	0.00	17.68	0.00	
Maggiociondolo	10	8	0	0.04	0.00	0.59	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Pino cembro	15	0	4	0.00	0.07	0.00	0.33	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Pino uncinato	10	4	0	0.02	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	15	0	4	0.00	0.06	0.00	0.35	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	4	0	0.13	0.00	1.01	0.00
	25	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	8	0	0.39	0.00	2.81	0.00
	30	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	4	0	0.31	0.00	1.73	0.00
	35	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	4	0	0.37	0.00	2.74	0.00
40	4	0	0.46	0.00	4.38	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
Totale complessivo		183	23	23.95	1.17	264.41	9.02	80	4	9.37	0.35	89.93	2.69

Tabella 2.12.14 Area di saggio n. 1

La martellata forestale ha seguito le linee di intervento proponibile emerse dalla compilazione della scheda di descrizione e valutazione del ruolo protettivo del popolamento e dall'allestimento delle aree di saggio, cui ha fatto seguito la stima delle masse da prelevare.

Il volume delle conifere è calcolato mediante le formule di cubatura valide sul territorio dell'alta valle Susa, mentre in assenza di tavole dendrometriche per le latifoglie, i volumi sono calcolati secondo la formula

$$V = G \cdot H \cdot F \quad (2.12.1)$$

dove:

G area basimetrica (m²)

H altezza (m)

F viene stimato in funzione della rastremazione e della ramosità dei soggetti

Il pedilista di martellata dell'intervento complessivo è il seguente:

N	SPECIE	H (m)	D diametro (cm)
1	<i>Pinus uncinata</i>	8	22
2	<i>Larix decidua</i>	20	48
3	<i>Abies alba</i>	16	29
4	<i>Pinus uncinata</i>	7	27
5	<i>Pinus uncinata</i>	13	29
6	<i>Larix decidua</i>	21	39
7	<i>Pinus uncinata</i>	10	27
8	<i>Abies alba</i>	18	32
9	<i>Abies alba</i>	17	33
10	<i>Abies alba</i>	15	29
11	<i>Pinus uncinata</i>	16	32
12	<i>Abies alba</i>	7	16
13	<i>Abies alba</i>	17	39
14	<i>Abies alba</i>	10	27
15	<i>Abies alba</i>	16	41
16	<i>Abies alba</i>	10	34
17	<i>Larix decidua</i>	18	45
18	<i>Abies alba</i>	16	4
19	<i>Abies alba</i>	18	50
20	<i>Pinus uncinata</i>	12	19
21	<i>Larix decidua</i>	20	68
22	<i>Abies alba</i>	18	51
23	<i>Abies alba</i>	18	46
24	<i>Abies alba</i>	15	44
25	<i>Larix decidua</i>	21	39
26	<i>Larix decidua</i>	23	44
27	<i>Pinus silvestre</i>	24	57
28	<i>Larix decidua</i>	17	66
29	<i>Picea abies</i>	15	36
30	<i>Picea abies</i>	14	29
31	<i>Pinus uncinata</i>	13	35
32	<i>Pinus uncinata</i>	13	23
33	<i>Pinus uncinata</i>	11	28
34	<i>Pinus uncinata</i>	10	38
35	<i>Pinus silvestre</i>	12	37
36	<i>Pinus silvestre</i>	16	47
37	<i>Pinus silvestre</i>	15	45
CROCI (= piante con diametro inferiore a 7 cm) n.	15		

Nell'area di intervento sono state abbattute 37 piante per un volume complessivo di circa 34 m³ su un'area di circa 3 ha, che corrisponde ad un tasso di prelievo di circa 11 m³/ha.

Il legname di risulta è stato in parte rilasciato in bosco, sramato ed allestito a 45° lungo il pendio, con lo scopo di fermare il rotolamento di massi ed il potenziale distacco di valanghe e scivolamenti superficiali in bosco. È stata poi attuata la realizzazione di treppiedi fermaneve all'interno delle maggiori aperture, utilizzando tronchi abbattuti.

Sporadiche piante localizzate in prossimità della strada statale verranno assegnate ad uso focatico. L'esbosco di piccole quantità di legname non è economicamente vantaggioso, peraltro tale materiale è utile da rilasciare in foresta al fine di incrementarne il ruolo protettivo. Gli assortimenti ritraibili sono di dimensioni eterogenee e mediamente presentano un cattivo portamento forestale.

Foto 2.12.22 Apertura lato Ovest dell'area di saggio



Foto 2.12.23 Rinnovazione naturale



Foto 2.12.24 Interventi selvicolturali di stabilizzazione del popolamento con posizionamento dei tronchi abbattuti a contrastare la caduta massi



Foto 2.12.25 Porzione terminale area di intervento a ridosso della viabilità internazionale del Monginevro



Foto 2.12.26 Funzione di protezione della foresta contro la caduta massi

Realizzazione di cavalletti treppiede in legname

La tecnica della costruzione di cavalletti treppiede è stata codificata dall'istituto Federale Svizzero per lo Studio della Neve e delle Valanghe di Davos (Leuenberger, 1992).

Sebbene questa tecnica assolvga pienamente alla funzione attesa di stabilizzazione del manto nevoso all'interno di formazioni forestali rade del piano subalpino o montano appare possibile che tale struttura in legno

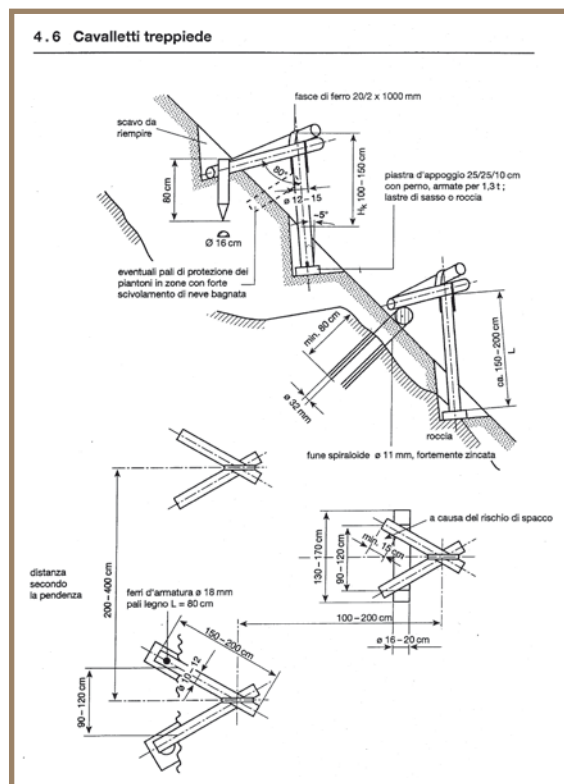


Figura 2.12.27 Tecnica di costruzione dei cavalletti (Leuenberger, 1992)

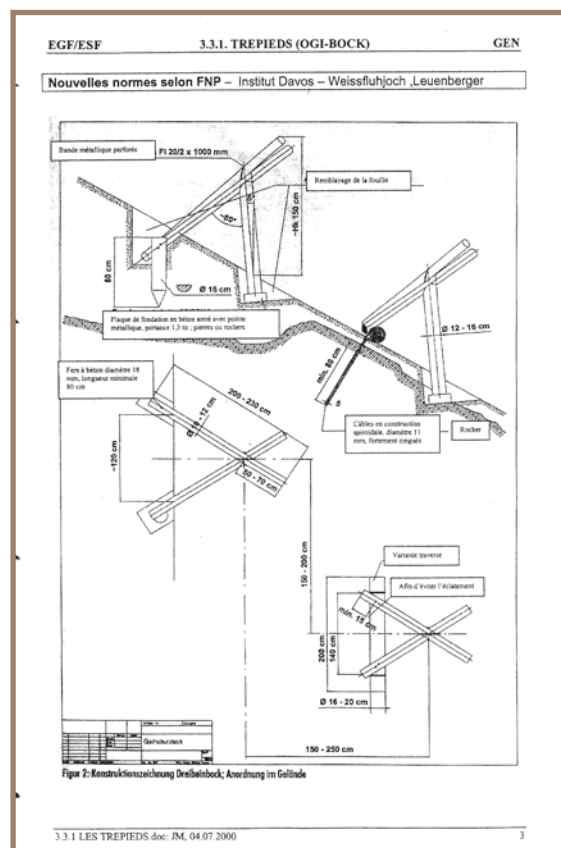


Figura 2.12.28 Tecnica di costruzione dei cavalletti (Leuenberger, 1992)

permetta di intercettare anche i massi in caduta, aumentando la densità di fusti e conseguentemente di urti e pertanto la possibilità che i massi in caduta vengano intercettati e possibilmente rallentati o fermati.

In questa ottica sono stati realizzati alcuni cavalletti, nella parte sommitale del bosco al fine di contribuire alla riduzione del rischio di caduta massi verso la strada statale sottostante.

I materiali necessari per la realizzazione dei cavalletti treppiede sono i seguenti:

- 1 soglia o traversa di diametro 16-20 cm per l'ancoraggio di monte;
- 2 traverse di diametro 15-20 cm e di lunghezza non inferiore a 1.5-2 m per la porzione esterna del cavalletto in grado di stabilizzare il manto nevoso o di intercettare i massi in caduta. Rispetto alle opere fermane tali elementi devono essere di diametro maggiore in quanto l'urto dinamico dei massi può arrecare danni alla struttura;
- puntone di appoggio di diametro 20 cm e lunghezza 1.5-2 m; anche in questo caso il diametro deve essere maggiore rispetto alla versione fermane per i motivi sopra esposti; il vincolo con gli elementi superiori del cavalletto può essere attuato con foro passante e spezzatura metallica diametro 14 mm, risultando più solido rispetto alla fascia passante esternamente, più funzionale nel caso di strutture fermane;
- 1 piastra di appoggio in ferro o cemento debolmente armato di dimensioni 25 cm · 25 cm · 10 cm.

Particolare attenzione deve essere posta nel corretto collocamento della piastra di appoggio al fine di determinare l'effettiva stabilizzazione dell'opera in caso di urto con massi.

Nel caso del cantiere in esame sono stati realizzati cavalletti con il legname proveniente dagli interventi selvicolturali, opportunamente scorciato e lavorato sul letto di caduta.

L'aggiornamento delle norme tecniche elvetiche redatto nell'anno 2000, prevede un maggior sbalzo, 50-70 cm, delle opere rispetto al puntone. Tale sbalzo conferisce maggiore stabilità e permette al contempo un maggior consolidamento del manto nevoso, aumentando la superficie interessata dal consolidamento indotto dal legname. Nel caso di opere contro la caduta dei massi, tale accorgimento risulta superfluo. Sono stati altresì ridotti gli angoli di incidenza dei traversi rispetto al puntone, al fine di migliorare la stabilizzazione del manto nevoso. Tale accorgimento risulta efficace anche nel caso di caduta massi. Si tenga conto che in montagna la presenza congiunta di più pericoli naturali, come la caduta valanghe e la caduta massi, non consente un uso esclusivo delle opere di protezione. Pertanto si consiglia di realizzare le opere secondo i più aggiornati dettami tecnici.

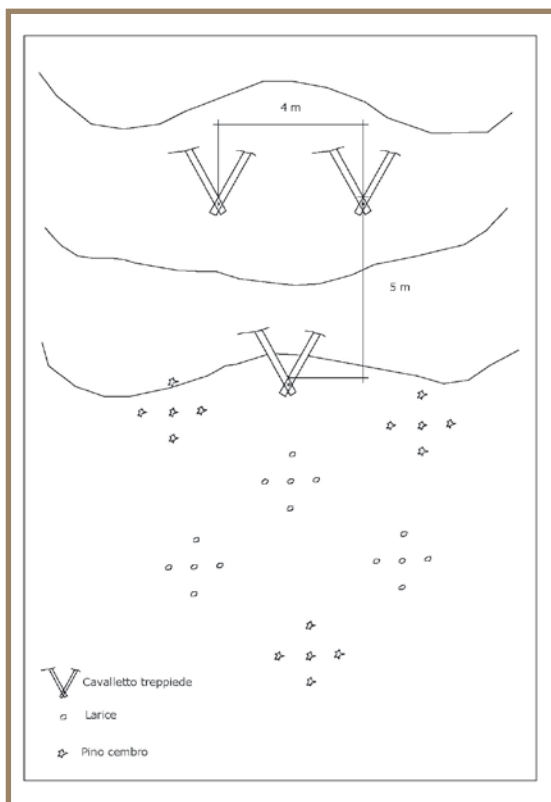


Figura 2.12.29 Schema di impianto per collettivi protetto da cavalletti treppiede



Foto 2.12.30 Realizzazione di cavalletti treppiede in aree di potenziale caduta massi e di scivolamento del manto nevoso



Foto 2.12.31 Realizzazione di cavalletti in aree di bosco rado e pertanto non funzionale al controllo della caduta massi e dello scivolamento del manto nevoso



Foto 2.12.32 Cavalletti treppiede a valle di potenziale dona distacco massi di piccole dimensioni - Gran Volta

2.12.8 Approfondimenti: cantiere Claviere

Rilevato paramassi

Il rilevato paramassi di Claviere è stato progettato dall'Ing. Livio Martina e dal dr. Geol. Eugenio Zanella con la collaborazione del Consorzio Forestale Alta valle Susa nel 1998. Finalità del progetto è stata la riduzione del rischio di caduta massi provenienti dai versanti del complesso dello Chaberton verso l'abitato di Claviere. Le pareti rocciose a monte del centro abitato sono caratterizzate da numerose fratture con potenziali cadute e crolli in grado di arrecare pericolo alle case sottostanti. Sulla base di un'attenta analisi delle dimensioni dei blocchi potenzialmente instabili è stata effettuata, a cura del dr. Zanella, un'analisi cinematica del processo di caduta massi. L'analisi è stata effettuata mediante analisi numerica su modello matematico computerizzato (programma Masco ver 1.3 – Program Geo) sulla base delle equazioni di moto di un masso in movimento lungo il versante (Piteau e Clayton, 1976) sviluppando le possibili traiettorie in relazione alle caratteristiche fisico-meccaniche del masso e del versante.

Sulla base del profilo topografico più sfavorevole è stata effettuata la modellazione attesa (**figura 2.12.33**) tenendo conto delle caratteristiche morfologiche e di copertura della sezione di riferimento. Nella parte alta della sezione il substrato roccioso è affiorante mentre nella parte bassa si ha detrito di falda di varia pezzatura e variamente vegetato. Il detrito di falda può essere suddiviso in tre categorie a seconda del grado di inerbimento e di copertura forestale, benché rada e per gruppi tipici del piano subalpino.

Sulla base delle verifiche si è passati alla fase progettuale ipotizzando la costruzione di un rilevato il cui lato di valle fosse consolidato con tecniche miste parzialmente afferenti all'ingegneria naturalistica, al fine di risolvere il problema dell'assorbimento degli urti e del consolidamento del paramento di valle la cui pendenza, ben superiore al natural declivio, necessitava di interventi strutturali per la sua stabilità.

La tecnica utilizzata è quella della palificata in legname vincolata con pali a rapida infissione parzialmente cementati. L'impiego di tipologie afferenti all'ingegneria naturalistica ha permesso di realizzare un'opera potenzialmente meno impattante tenuto anche conto della sua progressiva rinaturazione in parte favorita da un rimboschimento di pino uncinato ed in parte tramite rinnovazione naturale di specie erbacee, arbustive ed arboree.

Figura 2.12.33 Schema di verifica del rilevato paramassi

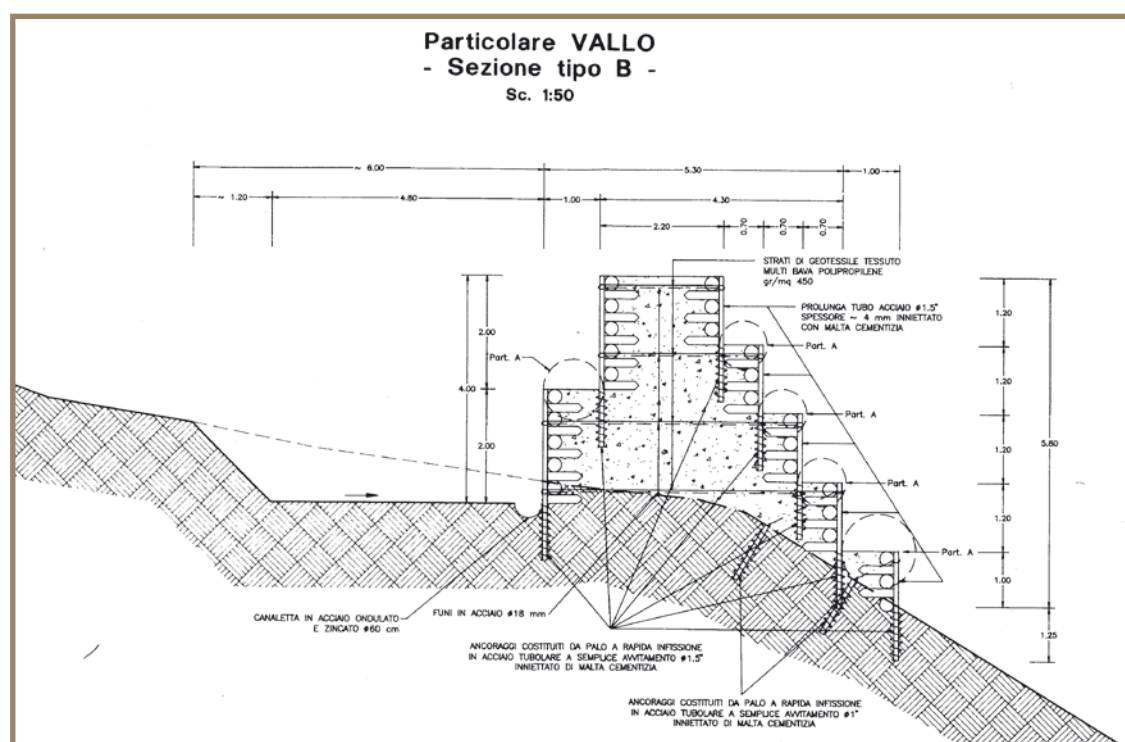
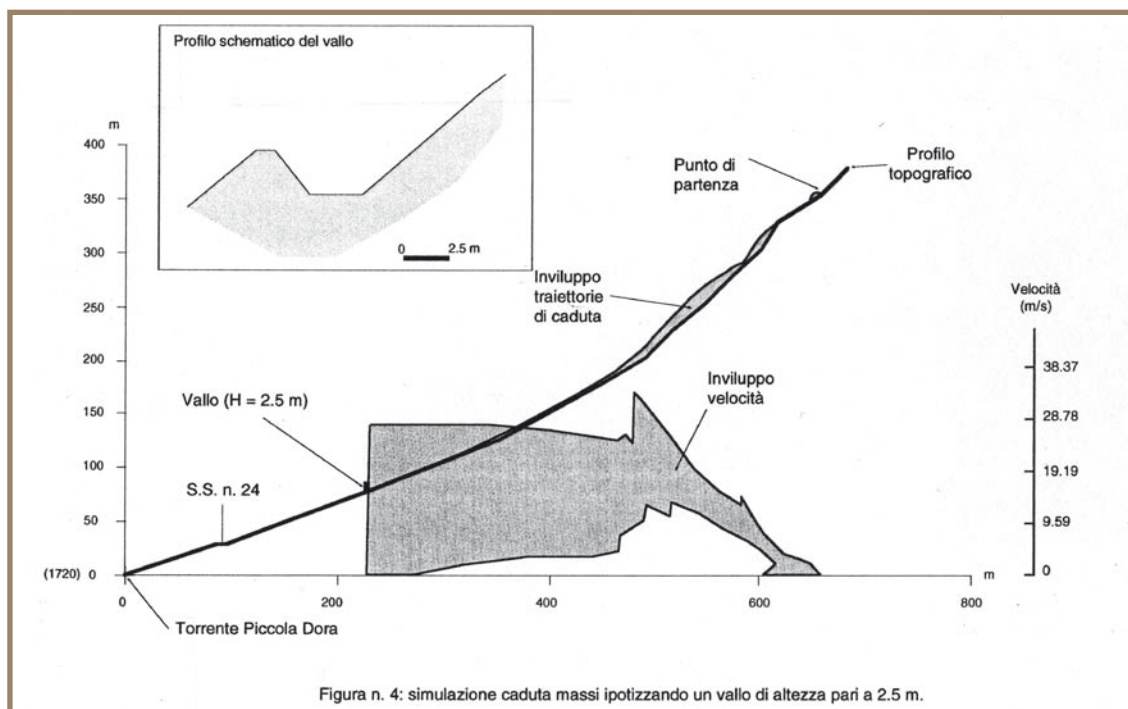


Figura 2.12.34 Schema tipo costruttivo del rilevato paramassi



Come per i cavalletti treppiede, anche questa tecnica si trova ai margini dell'ingegneria naturalistica in quanto la componente vegetazionale non pare elemento costruttivo imprescindibile per la funzionalità nel breve e medio periodo dell'opera. Tali opere possono comunque risultare prodromiche all'innesco di processi di colonizzazione maggiormente stabili ed efficaci sia a sostituire l'opera quando questa cesserà la sua funzione strutturale e sia a contribuire al suo consolidamento e durabilità.

Figura 2.12.35 Fronte di valle del rilevato paramassi





Figura 2.12.36 *Visione panoramica del rilevato paramassi di Claviere*



Figura 2.12.38 *Visione panoramica del rilevato paramassi di Claviere*



Figura 2.12.37 *Vista frontale del rilevato paramassi ed inserimento nel contesto forestale preesistente*



Foto 2.12.39 *Centro abitato di Claviere e struttura paramassi a monte delle abitazioni*

2.13 CADUTA DI MASSI IN FORESTA E ANALISI DENDROCRONOLOGICA

Lucia Caffo, Alberto Dotta - Consorzio Forestale Alta Valle di Susa

2.13.1 Introduzione

Il presente lavoro ha come obiettivo l'analisi di possibili correlazioni tra lo sviluppo fisiologico degli alberi e la caduta di massi in bosco, alla luce di studi effettuati sulle foreste di protezione diretta, mediante osservazioni che si riallacciano alla dendrocronologia.

La dendrocronologia (parola che deriva dal greco: *dendron* = albero; *kronos* = tempo; *logos* = discorso) è una scienza recente che studia l'accrescimento delle piante arboree nel tempo, le modalità con cui questo si sviluppa e i fattori esterni che lo influenzano.

Nei climi temperati in cui si ha l'alternanza di stagioni calde e stagioni fredde gli alberi crescono formando nella sezione trasversale del fusto una serie di anelli concentrici dovuti alla differenza fra il legno prodotto in primavera (legno primaverile o primaticcio - cellule con lume ampio e parete sottile) e quello prodotto in estate e nel primo autunno (legno estivo o tardivo - cellule con lume più stretto e pareti più spesse).

Lo spessore di ogni singolo anello dipende da diversi fattori fra quelli biologici (la specie, l'età della pianta, la posizione sociale, eventuali avversità), stagionali (altitudine, suolo, esposizione, pendenza del versante ecc.) e climatici (temperatura, umidità, precipitazioni ecc.).

L'albero reagisce immediatamente al variare di questi fattori producendo, per quell'anno, un diverso quantitativo di legno e quindi una diversa ampiezza dell'anello; mettendo in grafico tali ampiezze è possibile tracciare delle curve dette "curve dendrocronologiche".

In determinate condizioni ambientali la pianta può produrre "falsi anelli" (un secondo anello nello stesso anno) oppure omettere l'anello di un anno (in caso di periodo vegetativo troppo breve). Collegando fra loro curve dendrocronologiche di piante cresciute in tempi successivi è possibile creare "curve standard" o "master", cioè curve che riguardano periodi di secoli o anche millenni di determinate zone geografiche (esiste una curva del genere *Quercus* valida per l'Europa del nord che abbraccia gli ultimi 10 000 anni).

Ad esempio, utilizzando tali curve è possibile determinare il periodo in cui è cresciuto un determinato campione di legno contenente una serie di anelli "leggibili" prelevato da un manufatto del quale si vuole conoscere l'epoca. Attraverso la lettura degli anelli si ricava una curva dendrocronologica, confrontando questa con una curva standard (metodo detto "cross-dating" o "datazione incrociata") mediante osservazione visuale o attraverso elaborazione a computer si ricercano le coincidenze fra le ampiezze anulari del campione in esame e la curva standard così da determinare di conseguenza il periodo in cui è vissuta la pianta che ha fornito il campione. (Dott. Sandro Svaluto - ITAS Parma).

In montagna la presenza di pareti rocciose o di semplici affioramenti determina, a causa dell'azione combinata degli elementi naturali e della natura delle rocce, il rotolamento verso valle di blocchi o massi. Tali massi possono assumere forme e dimensioni estremamente variabili in funzione della loro composizione e origine. Soprattutto in montagna l'azione dell'acqua e del gelo-disgelo agevola l'instabilità delle pareti o degli affioramenti rocciosi favorendo la caduta verso valle dei blocchi o massi. La quota, l'esposizione e, soprattutto, lo stato di fratturazione della roccia e la presenza di infiltrazioni d'acqua, determinano la frequenza e la gravità del fenomeno.




2.13.2 Presentazione lavoro

L'analisi si svolge in tre siti dell'alta valle di Susa e precisamente:

- Beaume (comune di Oulx);
- Gran Volta (comune di Cesana Torinese);
- Rouas (comune di Bardonecchia).

Si tratta di boschi che rivestono una funzione di protezione diretta nei confronti delle infrastrutture sottostanti, costituite da strade statali, che rappresentano reti permanenti di collegamento transfrontaliero, oppure di centri permanentemente abitati nel corso dell'anno.

Nell'ambito del Piano di sviluppo Rurale 2000 – 2006, Misura I Azione 7, sono state condotte indagini conoscitive e descrittive di alcune foreste di protezione dell'alta valle di Susa, tra cui i siti oggetto del presente lavoro. Per ogni popolamento forestale è stata compilata la "Scheda di descrizione e valutazione del ruolo protettivo del popolamento", unitamente ad una descrizione del sito, che risulta maggiormente dettagliata nel caso in cui sia emersa la necessità di interventi selvicolturali. Per quanto riguarda le modalità di compilazione della scheda si rimanda al manuale "Selvicoltura nelle foreste di Protezione – Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e valle d'Aosta" (Regione Autonoma valle d'Aosta – Regione Piemonte, 2006).

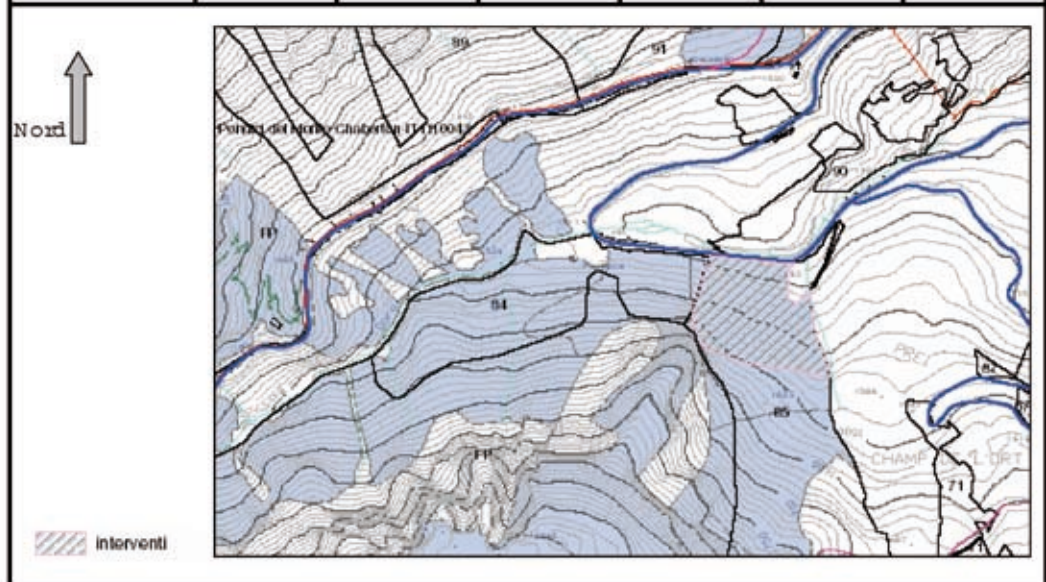
 REGIONE PIEMONTE Regione Autonoma Valle d'Aosta		 aicotra		 UNIONE EUROPEA Versione 2006		
Selvicoltura nei boschi di protezione Regione Autonoma Valle d'Aosta						
Comune: Oulx (Torino) Località: Beaurme		Particella: 168 del Comune di Oulx		Data: Giugno 2006		
1. Tipo forestale (Principale): Pianta endopica basifila di pino silvestre Principale: caduta massi						
2. Pericoli naturali Principale: caduta massi						
3. Condizioni: sporadici massi di grandi dimensioni - prevalenti, diametro circa 40 cm - pendenza elevata - incendi su versante sud - ungulati svernamento						
3a. Contributo potenziale della foresta Grande <input type="checkbox"/> Medio <input checked="" type="checkbox"/> Insufficiente <input type="checkbox"/>						
4. Stato attuale, tendenze evolutive e individuazione misure adeguate:						
Caratteristiche del popolamento e degli alberi	Stato attuale	Esigenze minime	Esigenze ideali	Stato e tendenze evolutive nel breve (20 anni) e medio (50 anni) periodo	Interventi proponibili	8. Obiettivi con parametri verificabili nel breve periodo
4 A - Composizione (espressa in volume %) 4 B - Densità 4 C - Struttura	pino silvestre 95% latifoglie 5% 471 p/ha 65 % 3 fasce 2 strati prevalentemente per pino d'abete qualche apertura di max 20m pino silvestre > 1/2 latifoglie > 1/2 pino silvestre 27%, chiome largamente asimmetriche latifoglie 23% chiome largamente asimmetriche piante instabili < 20% presenza di alberi 60 latifoglie 69 presenza di alberi da incendio ed erbaceo assenza concorrenza erbacea, presenza erosione sporadiche diffuse in modo non uniforme sulla superficie	pino silvestre max 100% altre conifere 0-10 % latifoglie 0-10 % almeno 400 p/ha con Ø > 12,5 cm indifferente purché sia rispettato il numero piante/ha 2 fasce 2 strati per pino d'abete < 20 m > 1/2 < 50% chiome largamente asimmetriche assenza di alberi instabili < 80 presenza sporadica di liquisiti/giardinieri superficie con forte concorrenza della vegetazione < 2/3 della superficie complessiva abbondante su suolo minerale diffusa su suolo minerale, nelle aperture sporadica su suolo minerale nelle aperture	pino silvestre max 90% altre conifere e latifoglie max. 10% almeno 600 p/ha con Ø > 12,5 cm indifferente purché sia rispettato il numero piante/ha almeno 2 fasce almeno 2 strati per pino d'abete e piccoli gruppi < 20 m > 1/2 < 30% chiome largamente asimmetriche assenza di alberi instabili < 70 assenza di fitopatologidanni superficie con forte concorrenza della vegetazione < 1/3 della superficie complessiva abbondante su suolo minerale diffusa su suolo minerale, nelle aperture diffusa su suolo minerale nelle aperture	pino silvestre max 90% altre conifere e latifoglie max. 10% almeno 600 p/ha con Ø > 12,5 cm indifferente purché sia rispettato il numero piante/ha almeno 2 fasce almeno 2 strati per pino d'abete e piccoli gruppi < 20 m > 1/2 < 30% chiome largamente asimmetriche assenza di alberi instabili < 70 assenza di fitopatologidanni superficie con forte concorrenza della vegetazione < 1/3 della superficie complessiva abbondante su suolo minerale diffusa su suolo minerale, nelle aperture diffusa su suolo minerale nelle aperture	Abbattimento di sporadici alberi di grande diametro per evitare gruppi di rinnovazione, modalità come in 4E. Assenza di interventi	aumento n° p/ha con Ø > 12,5 cm
4 D Elementi di Stabilità 4 E Rinnovazione	presenza di alberi da incendio ed erbaceo assenza concorrenza erbacea, presenza erosione sporadiche diffuse in modo non uniforme sulla superficie	presenza sporadica di liquisiti/giardinieri superficie con forte concorrenza della vegetazione < 2/3 della superficie complessiva diffusa su suolo minerale diffusa su suolo minerale, nelle aperture sporadica su suolo minerale nelle aperture	assenza di fitopatologidanni superficie con forte concorrenza della vegetazione < 1/3 della superficie complessiva abbondante su suolo minerale diffusa su suolo minerale, nelle aperture diffusa su suolo minerale nelle aperture	Assenza di interventi	Assenza di interventi	Assenza di interventi
5. Costo giustificati: sì <input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> 6. Necessità d'intervento: sì <input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/>						
7. Priorità: bassa (> 10 anni) <input type="checkbox"/> media (5-10 anni) <input type="checkbox"/> alta (< 5 anni) <input type="checkbox"/>						
9. Prossima valutazione del popolamento (indicativa): anno 2026						

ALLEGATO alla Scheda di descrizione e valutazione del popolamento

Note
Forte impatto della fauna selvatica sulla rinnovazione naturale di altezza inferiore a 2 m
Nelle aperture in cui l'entità spazzata della neve possono danneggiare il popolamento della rinnovazione naturale, pertanto è auspicata la realizzazione di siepi
Abbondanza di tronchi danneggiati da caduta di massi di medie e grandi dimensioni
Foresta di protezione diretta sulla SS 24 del Monghevo
Intervento selvicolturale localizzato alle quote inferiori del versante, laddove la rinnovazione naturale è affievolita; alle quote superiori il popolamento è pressoché monoplano

Cartografia - intervento selvicolturale

Comune	Località	Particella	Scala			
Cesana	Gran Vola	85	1:10.000			



2.13.3 Materiali e metodi

Lo studio dell'interazione tra lo sviluppo fisiologico degli alberi e gli urti causati dal rotolamento di massi in foresta richiede analisi di campioni di legno, che sono stati prelevati da alberi sulla cui corteccia sono visibili cicatrici più o meno recenti, con differenti modalità in funzione della tipologia di bosco e di gestione selvicolturale.

Le modalità di campionamento si possono pertanto suddividere in:

- non invasive: prelievo di 2 campioni dendrometrici per ogni albero, mediante succhiello di Pressler, uno in corrispondenza della cicatrice dovuta all'urto di un masso, l'altro disposto a 90° o 180° rispetto al primo;
- distruttive: prelievo di sezioni trasversali di legno dal fusto di alberi abbattuti, in corrispondenza di urti visibili a livello di corteccia.

Di ogni albero è stata rilevata altresì la specie, il diametro e l'altezza di prelievo del campione, che è correlata alla presenza di urti con cicatrici visibili sulla corteccia.

La numerosità del campione risulta esigua in quanto i tre siti presentano una importante funzione protettiva e non è risultato necessario, in questa fase dello studio, prelevare campioni che, seppure non invasivi, potrebbero sul lungo periodo influire negativamente sullo stato fitosanitario degli alberi.

Il prelievo di sezioni trasversali (rotelle) è stata limitata invece ad alberi abbattuti che presentassero ferite riconducibili all'urto di massi, senza prevedere l'abbattimento di altri soggetti, che avrebbe determinato una eccessiva riduzione del numero minimo di piante/ha considerato efficace per garantire la destinazione protettiva della foresta. I campioni sono stati levigati per agevolarne l'osservazione, rendendo più visibili gli anelli di accrescimento annuale e le loro caratteristiche.

L'analisi dei campioni si è limitata ad osservazioni di natura visiva, pertanto non è stata effettuata la misurazione degli anelli di accrescimento annuali, che sarà tuttavia possibile in futuro.

2.13.4 Analisi

I campioni lignei sono prelevati nelle tre stazioni sopra citate, che presentano peculiarità ecologiche, strutturali, dinamiche e selvicolturali diversificate (**tabella 2.13.1**). In modo particolare le stazioni di Beaume e di Melezet sono pinete di pino silvestre, con strutture rade, alberi senescenti e a grandi diametri, percorse da incendio all'inizio degli anni '80 nel primo caso, mentre a Bardonecchia siamo di fronte ad un popolamento giovane, monoplano a prevalenza di diametri medio piccoli. In comune di Cesana i campioni lignei sono prelevati da un'abetina endalpica nella quale l'abete bianco si trova in mescolanza con larice e pino uncinato; quest'ultimo caratterizza le stazioni più difficili e risulta maggiormente interessato dalla caduta di massi in foresta.

	Comune	Inclinazione media	Tipo forestale	Tipo strutturale	Litotipo prevalente	Dimensione media dei massi (cm)
Beaume	Oulx	35°	Pineta endalpica basifila di pino silvestre	Monoplano a prevalenza di diametri grandi	Micascisti Quarziti	60
Melezet	Bardonecchia	32°	Pineta endalpica basifila di pino silvestre	Monoplano a prevalenza di diametri piccoli	Carniole Gessi	20
Gran Volta	Cesana Torinese	34°	Abetina endalpica	Pluripiano per gruppi a struttura equilibrata	Marmi Dolomie	70

Tabella 2.13.1 Descrizione siti

Nei tre casi esaminati le foreste sono localizzate ai piedi di pareti rocciose, tuttavia si osservano differenti frequenze di distacco di massi, in funzione della matrice rocciosa: le pinete di Beaume presentano una elevata percentuale di alberi colpiti e gli accumuli di massi al suolo sono frequenti, così in località Gran Volta a Cesana, ma le dimensioni medie dei blocchi sono maggiori. Diversa si presenta la situazione a Melezet, dove i massi in foresta sono sporadici e di piccole dimensioni, mentre le piante che presentano i danni maggiori sono localizzate al limite di aperture che costituiscono le vie privilegiate di caduta di blocchi.

A Beaume e a Melezet il campionamento si è limitato al prelievo di una o due carote da alberi colpiti dai massi, secondo le indicazioni fornite nelle tabelle sottostanti, mentre alla Gran Volta, grazie alla disponibilità

di tronchi al suolo in seguito ad un intervento selvicolturale, sono state prelevate intere sezioni trasversali in corrispondenza degli urti (**tabella 2.13.2**).

Beaume – prelievo di campioni dendrometrici con succhiello di Pressler					
N	SPECIE	DIAMETRO (cm)	H prelievo (cm)	Direzione	Note
1	PS	45	60	N-W	N in cicatrice
2	PS	30	120	NE-NW	NE in cicatrice laterale
3	PS	25	120	N	Testimone non colpito
4	PS	45	70	NE-NW	NE piccola cicatrice, NW carinata
5	PS	42	100	NW-S	NW in cicatrice larga 20 cm
6	PS	50	90	N-W	N urti, poi passaggio fuoco
8	PS	55	50	N-W	N urti parzialmente cicatrizzati

Melezet – prelievo di campioni dendrometrici con succhiello di Pressler					
N	SPECIE	DIAMETRO (cm)	H prelievo (cm)	Direzione	Note
1	PS	24	80	N-S	N in cicatrice
2	PS	14	100	N	N a monte di ferita
3	PS	25	130	N	N in pianta con ferita laterale E, non campionata
4	PS	12	100	N-W	W in vecchia ferita laterale, su callo cicatriziale
5	PS	10	120	NE-NW	NW su ferita laterale, su callo cicatriziale
6	PS	24	70	N-S	N in cicatrice
7	PS	32	60	N-S	N in cicatrice

Gran Volta – prelievo di sezioni trasversali					
N	SPECIE	DIAMETRO (cm)	H prelievo (cm)	N campioni	Note
1	PU	32	80-60	2	Sezione tangenziale all'urto
2	AA	35	40-50	2	Sezione tangenziale all'urto
3	PU	30	30-35-70-75	4	Sezione tangenziale all'urto
4	PU	37	10-90	2	Sezione tangenziale all'urto, morto
5	PU	30	20	2	Sezione tangenziale all'urto
6	PU	15	10-50	1	Sezione tangenziale all'urto, morto
7	PU	12	10-50	1	Sezione tangenziale all'urto

Tabella 2.13.2 Campioni prelevati (PS: pino silvestre, AA abete bianco, PU pino uncinato)

L'analisi dei campioni dendrometrici prelevati con succhiello di Pressler si è limitata ad osservazioni visive e non è stata fatta la misurazione dei singoli anelli e la sincronizzazione, pertanto non abbiamo a disposizione dei parametri che permettano una valutazione statistica del campione. Le osservazioni visive si sono limitate al conteggio e all'osservazione degli anelli di accrescimento, permettendo la compilazione di una tabella di valutazione dell'ampiezza degli anelli, codificandola con i seguenti parametri:

- + Anello mediamente grande rispetto alla dimensione degli anelli della carota
- ++ Anello grande rispetto alla dimensione degli anelli della carota
- +++ Anello molto grande rispetto alla dimensione degli anelli della carota
- Anello mediamente piccolo rispetto alla dimensione degli anelli della carota
- Anello piccolo rispetto alla dimensione degli anelli della carota
- Anello molto piccolo rispetto alla dimensione degli anelli della carota
- c Carie del fusto
- x Centro
- 0 Presunto anello mancante

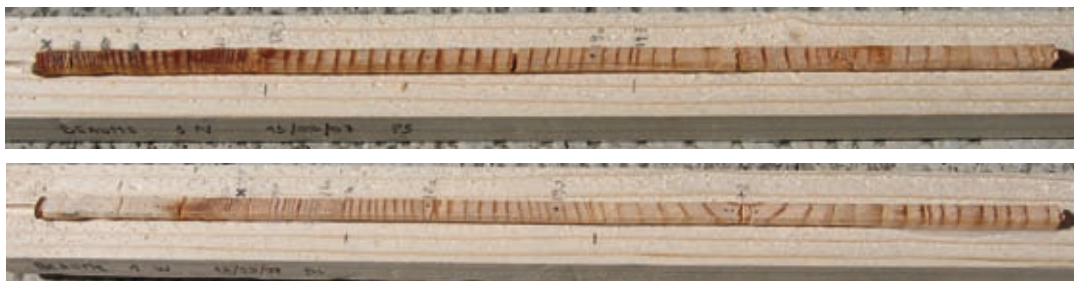
Un foglio di calcolo ha permesso di attribuire la datazione ai singoli anelli e in alcuni casi si è giunti ad una probabile datazione degli urti, basandosi per lo più su anelli significativi facilmente identificabili (**tabella 2.12.3**).

Documentazione fotografica del campionamento mediante succhiello di Pressler

Sito di Beaume

Campione n. 1

Sincronizzazione presunta mediante anelli caratteristici, datazione incerta a causa delle ridotte dimensioni degli ultimi anelli



Campione n. 2

Buona sincronizzazione, favorita dalla modesta età dell'albero e da anelli facilmente visibili



Campione n. 4

Sincronizzazione e datazione impossibili a causa di carie del fusto



Campione n. 5

Buona sincronizzazione dei campioni su anelli caratteristici e presunta datazione dell'urto



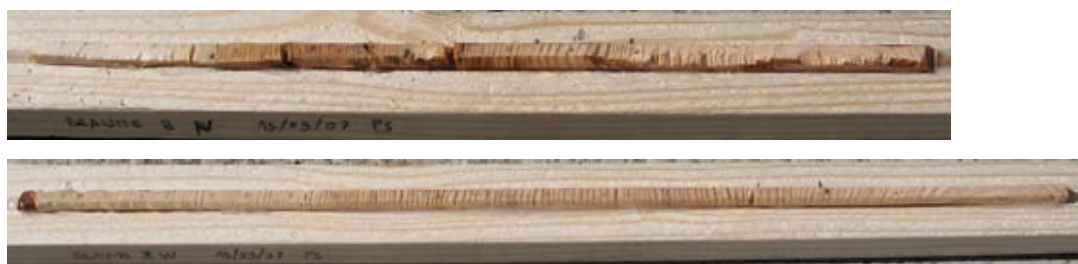
Campione n. 6

Buona sincronizzazione dei campioni su anelli caratteristici e presunta datazione dell'urto



Campione n. 8

Buona sincronizzazione dei campioni su anelli caratteristici e presunta datazione dell'urto

**Sito di Melezet****Campione n. 4**

Buona sincronizzazione dei campioni su anelli caratteristici e presunta datazione dell'urto

**Campione n. 5**

Buona sincronizzazione dei campioni su anelli caratteristici e presunta datazione dell'urto

**Campione n. 6**

Buona sincronizzazione dei campioni su anelli caratteristici e presunta datazione dell'urto

**Campione n. 7**

Buona sincronizzazione dei campioni su anelli caratteristici e presunta datazione dell'urto



Dall'analisi dei campioni dendrometrici si osserva come negli alberi più longevi, che caratterizzano la stazione di Beaume, gli accrescimenti siano ridotti e gli anelli abbiano dimensioni particolarmente limitate rispetto a quanto osservato nel giovane popolamento di Melezet, tuttavia su serie cronologiche piuttosto lunghe (alcuni secoli) è più semplice riconoscere anelli caratteristici e trend di accrescimento diversificati nel tempo.

Tale differenza è riconducibile in parte alla fisiologia degli alberi, che nei soggetti più vecchi determina accrescimenti ridotti, sia alla gestione selvicolturale, pertanto interventi di diradamento, prelievi di legname e schianti per cause naturali, garantendo una maggiore disponibilità di luce alle chiome degli alberi rilasciati a garantire la continuità del soprassuolo, favoriscono accrescimenti più marcati (anelli più ampi), che diminuiscono con la chiusura della copertura forestale e l'invecchiamento del soprassuolo.

Si può quindi osservare come il bosco di Melezet non sia stato interessato da passati interventi selvicolturali e gli schianti siano sporadici, pertanto i campioni dendrometrici mostrano anelli di ampiezza discreta

Sito Gran Volta

Documentazione fotografica del prelievo di intere sezioni trasversali

**Campione n. 1**

Urti ripetuti su pino uncinato, carie del fusto

**Campione n. 1**

Dettaglio del callo cicatriziale

**Campione n. 2**

Ferita completamente cicatrizzata su abete bianco

**Campione n. 2**

Dettaglio del callo cicatriziale

e regolare, che solamente negli ultimi decenni, con la chiusura della copertura forestale, riducono la loro ampiezza.

Il campionamento della foresta della Gran Volta costituisce un caso a parte, in quanto l'osservazione degli urti e delle reazioni delle singole piante al disturbo è osservabile su intere sezioni tangenziali di alberi abbattuti nel corso di un intervento selvicolturale pianificato.

Si possono apprezzare, in funzione della dimensione delle ferite al fusto e all'epoca del danno, diverse situazioni e reazioni delle singole piante:

- completa cicatrizzazione e anelli di forma circolare, sulla corteccia si osserva solamente una piccola cicatrice di una ferita un tempo molto più estesa;
- ferite in corso di cicatrizzazione, perfettamente visibili sulla corteccia;
- urti ripetuti nel tempo con differenti stadi di cicatrizzazione;
- urti tangenziali al fusto con sfibratura del legno e fessurazione del tronco, la cui cicatrizzazione appare complessa e lenta.



Campione n. 2
Cicatrice visibile su
corteccia



Campione n. 2
Influenza del punto di prelievo sul
campionamento dendrocronologico



Campione n. 3
Urto su pino uncinato, cicatrizzato, carie del fusto incipiente



Campione n. 3
Dettaglio del callo cicatriziale in sezione e su corteccia



Campione n. 4
Pino uncinato interessato da urti ripetuti nel tempo, mancato accrescimento di circa metà della sezione tangenziale, pianta morta



Campione n. 4
Dettaglio del callo cicatrizziale



Campione n. 4
Sulla direttrice interessata dagli urti si contano pochi anelli rispetto all'elevata età della pianta, verificabile sulle altre direttrici



Campione n. 4
Dettaglio dell'assenza di cambio in prossimità degli urti



Campione n. 5
Urto di importanti dimensioni su pino uncinato, non si osservano sostanziali variazioni di accrescimento dell'albero nei settori non interessati dall'urto



Campione n. 5
Dettaglio della conformazione della ferita e del rilevante tasso di accrescimento del callo cicatrizziale rispetto alle sezioni non interessata dall'urto



Campione n. 5
Cicatrizzazione



Campione n. 6
Urto su pino uncinato di piccole dimensioni che ha causato la sfibratura dell'intero fusto, senza peraltro sradicare, troncare o portare a morte la pianta



Campione n. 6
Cicatrizzazione della ferita



Campione n. 6
Dettaglio della ferita



Campione n. 6
Ferita limitata sulla sezione trasversale, ma importante longitudinalmente



Campione n. 7
Ferita di piccole dimensioni in sezione trasversale, ma estesa lungo il fusto, buona cicatrizzazione

2.13.5 Osservazioni

Percorrendo i popolamenti forestali esaminati nell'ambito del presente lavoro si può osservare una differente incidenza degli urti sul popolamento forestale, in modo particolare sulla frequenza delle piante danneggiate:

- 90% piante diametro > 30 cm danneggiate a Beaume;
- 10% piante diametro > 30 cm danneggiate a Melezet;
- 40% piante diametro > 30 cm danneggiate a Gran Volta.

Tale fenomeno è da correlare principalmente alle caratteristiche di ogni singola stazione e in modo particolare al litotipo presente, alla pendenza del versante, alla distanza della parete rocciosa dalla foresta e dalle infrastrutture sottostanti, quindi alla densità del popolamento forestale e alla presenza di ostacoli in grado di intercettare i massi in caduta.

Secondariamente si nota che gli urti possono avvenire a qualunque altezza sul tronco, fino ad avere piante troncate ad altezze anche notevoli, fino a 10 m dal suolo, tuttavia gli urti più frequenti colpiscono gli alberi entro 150 cm dal terreno.

Il presente lavoro si è limitato a valutare gli urti che hanno avuto luogo alla base dei fusti.

Alcuni urti particolarmente intensi (per massi di grandi dimensioni e tipologia dell'urto) possono determinare la destabilizzazione della pianta a livello di apparato radicale (alberi inclinati), peraltro lo sradicamento di piante con apparato radicale fittonante (larice, pino silvestre, abete bianco) è decisamente raro. Gli alberi colpiti nelle porzioni più alte del fusto sono spesso troncati.

Le ferite causate dagli urti sul fusto e sui rami e i danni agli apparati radicali e al colletto sono la via preferenziale di ingresso di patogeni che, sul lungo periodo, possono causare carie del fusto, come si è potuto osservare su alcuni campioni (Beaume, campione n. 4 e Gran Volta, campioni n. 1 - 4 - 7), per lo più nelle stazioni caratterizzate da alberi mediamente vecchi.

2.13.6 Conclusioni

L'analisi visiva dei campioni dendrometrici prelevati nei tre siti permette di giungere a considerazioni di carattere generale, vista la metodologia adottata, con peculiarità proprie di ogni sito, alla luce delle differenze stazionali, gestionali e di campionamento.

In modo particolare nel sito di Beaume appare possibile, mediante il prelievo di due campioni dendrometrici di un albero, rilevati uno in corrispondenza dell'urto e uno in corrispondenza di una sezione non colpita, risalire alla datazione del distacco di massi. È inoltre possibile sincronizzare correttamente i campioni prelevati dal medesimo albero, anche mediante analisi visiva, basandosi sulla presenza di anelli caratteristici.

Sui campioni prelevati in una data stazione, per lo più se gli alberi sono vecchi, è possibile osservare una buona sincronizzazione delle variazioni repentine di accrescimento (*abrupt growth change*), che, assieme alla presenza di anelli caratteristici, permettono di sincronizzare i differenti campioni dendrometrici.

In stazioni con alberi giovani, quale ad esempio il sito di Melezet, è più difficile osservare variazioni repentine di accrescimento e anelli caratteristici, pertanto le sincronizzazioni sono decisamente labili.

Ritornando alla problematica della caduta di massi in foresta, mediante la sola osservazione dei campioni dendrometrici prelevati con il succhiello di Pressler, non appare possibile cogliere alcuna differenza di accrescimento dell'albero negli anni prossimi all'epoca dell'urto, benché le ferite particolarmente ampie non siano del tutto cicatrizzate a distanza di parecchi decenni, sebbene la reazione cicatriziale della pianta sia stata positiva e efficace fino a chiudere le ferite di dimensioni più modeste.

Nonostante il grande numero di piante colpite dai massi nella stazione di Beaume, anche in modo pesante e ripetuto nel tempo, con ferite mai completamente chiuse, non si osservano carie del fusto frequenti o particolarmente estese all'interno della sezione. Tale fatto potrebbe essere correlato alla abbondante resinazione del pino silvestre, facilmente osservabile sulle ferite recenti.

Le osservazioni effettuate in foresta portano a ipotizzare inoltre una elevata resistenza meccanica del pino silvestre agli urti: le piante troncate (soprattutto a grande altezza lungo il fusto) o sradicate a causa degli

urti sono decisamente sporadiche, grazie presumibilmente all'apparato radicale fittonante e alle caratteristiche tecnologiche e meccaniche del legno.

Su campioni numerosi si ipotizza la possibilità di verificare se ci siano stati periodi di particolare intensità della caduta di massi in foresta o se tale pericolo sia pressoché costante nel tempo.

Queste considerazioni derivano dalla datazione di urti che risalgono agli anni prossimi agli anni 1890 e 1920.

La metodologia di campionamento scelta per il sito della Gran Volta, consistente nel prelievo e nell'analisi di intere sezioni trasversali, porta invece a considerazioni di più ampia valenza, che condizionano le osservazioni presentate circa l'analisi dei campioni dendrometrici prelevati con il succhiello di Pressler.

Mentre è possibile confermare appieno l'ottima risposta meccanica e fisiologica del pino silvestre agli urti (cicatrizzazione rapida, limitati schianti, sporadiche carie del fusto), si possono estendere analoghe osservazioni sulle risposte dell'abete bianco, la cui cicatrizzazione delle ferite, soprattutto in individui adulti ma non vecchi, appare decisamente rapida e efficace, fino ad ottenere nuovamente anelli circolari, con ferite appena evidenti sulla corteccia.

In seguito alla levigatura dei campioni e all'analisi visiva condotta, si può risalire con maggiore semplicità rispetto al campionamento con il succhiello di Pressler al numero di urti che ha interessato il singolo albero, anche prelevando più campioni da uno stesso individuo, quindi si possono analizzare le reazioni fisiologiche dell'albero.

In modo particolare, pur non osservando repentine variazioni di accrescimento a livello di pianta correlabili con l'evento di caduta massi in foresta, si può valutare quanto incida il punto di campionamento sulla corretta interpretazione dei campioni prelevati con il succhiello. Nelle sezioni trasversali si possono apprezzare le forti reazioni cicatriziali in corrispondenza della ferita, con ampiezze degli anelli decisamente elevate in corrispondenza del trauma e di ampiezza confrontabile con gli anelli adiacenti nelle altre sezioni.

Nel campione numero 4 della Gran Volta si può osservare come gli urti possano asportare, anche con eventi differiti nel tempo, importanti porzioni della sezione del fusto dell'albero, senza tuttavia portarlo alla morte o allo sradicamento, se non sul lungo periodo, con cause plurime, che appare difficile indagare appieno e valutarne le reciproche incidenze.

Le piante di piccole dimensioni colpite dai massi possono presentare importanti ferite longitudinali sul fusto, tuttavia la reazione cicatriziale appare buona, anche se non è ipotizzabile una completa chiusura del trauma. È importante sottolineare che ai fini del mantenimento della funzione protettiva è importante mantenere un numero di piante sufficientemente elevato, ben distribuite sulla superficie in modo da non avere aperture della copertura forestale lungo la massima pendenza, con diametri dei fusti sufficientemente grandi in modo da poter contrastare il moto di massi in foresta.

Il confronto tra i due metodi di lavoro permette di concludere che il campionamento mediante il succhiello di Pressler è fortemente influenzato dal punto di prelievo sul fusto, mentre non pare evidenziare variazioni repentine di accrescimento, pur permettendo di datare gli urti, se campionati con sufficiente accuratezza. La reazione degli alberi agli urti pare pertanto essere prevalentemente di carattere meccanico piuttosto che fisiologico, fatta eccezione per la risposta mediante callo cicatriziale. Il prelievo di sezioni è maggiormente esaustivo, in quanto permette di apprezzare e descrivere, anche a differenti altezze lungo il fusto, l'effetto dei danni causati dal rotolamento di massi e le risposte dell'albero, senza escludere la possibilità di una misurazione del campione mediante tecniche proprie della dendrocronologia.

Concludendo, si può pertanto affermare che il presente lavoro non può che essere propedeutico ad un'analisi di dettaglio secondo i criteri della dendrocronologia, con misurazione e sincronizzazione dei campioni con curve di riferimento al fine di dare una rilevanza statistica e una maggiore accuratezza alle osservazioni qui presentate. Il metodo di campionamento tuttavia pare avere un peso rilevante, in quanto su campioni prelevati con il succhiello si osservano esigue porzioni di fusto, senza compromettere la presenza dell'albero in foresta, mentre la tecnica adottata alla Gran Volta, mediante l'abbattimento di alberi e il prelievo di sezioni trasversali, consente osservazioni accurate e permette di condurre le misurazioni in sezioni più o meno influenzate dall'urto, tuttavia deve essere valutata in funzione dei criteri gestionali delle foreste di protezione, dei costi e dell'iter autorizzativo di tali lavori.

2.14 ATTIVITÀ DI FORMAZIONE E DIVULGAZIONE SVOLTA CON IL COLLEGIO DELLE GUIDE ALPINE DEL PIEMONTE

Alberto Giolitti¹, Carlo Troisi²

¹Collegio Guide Alpine del Piemonte, ²Arpa Piemonte

2.14.1 Generalità

Conformemente a quanto previsto negli elaborati progettuali il progetto PROVIALP ha previsto una serie di attività di formazione e divulgazione che hanno coinvolto le Guide Alpine del collegio piemontese.

Il Collegio Guide del Piemonte raccoglie circa 150 professionisti operativi sul territorio regionale. La loro presenza, distribuita uniformemente sulle aree alpine e subalpine del Piemonte, costituisce una preziosa risorsa per il monitoraggio quotidiano del territorio. La formazione della Guida Alpina prevede un percorso che la rende capace di muoversi su ogni genere di terreno di tipo alpino, in qualsiasi stagione dell'anno. La professione della Guida negli anni è evoluta passando dal ruolo di accompagnatore sulle montagne a quello di istruttore di tecniche per affrontarle in sicurezza. L'iter che prepara alla professione si è modificato per dare ai nuovi professionisti la capacità didattica per formare singoli clienti e gruppi nelle tecniche delle discipline alpine.

La significativa presenza delle Guide nelle valli alpine e lo stretto rapporto con il territorio in cui svolgono la loro attività rendono la figura della Guida Alpina un possibile attore nei temi della sicurezza e del territorio. Si aprono quindi interessanti possibilità di intervento per quel che riguarda il monitoraggio, il supporto alla gestione di situazioni di emergenza, la diffusione di informazioni e il processo di formazione; la Guida Alpina si colloca in posizione ideale nella filiera in quanto esperto riconosciuto dalla propria comunità. Conoscitore del territorio e delle sue caratteristiche peculiari si trova ad interagire con singoli e gruppi che vengono quindi ad essere avvicinati a questi temi con competenza e professionalità.

In tale contesto il progetto PROVIALP ha dunque perseguito l'obiettivo di:

- favorire il processo di integrazione sul territorio della Guida Alpina con un rinnovato profilo professionale per giocare un importante ruolo nell'ambito della gestione ambientale e della sicurezza;
- fornire le conoscenze e un metodo di lavoro affinché la Guida Alpina possa essere impiegata in attività di supporto al monitoraggio territoriale ed alla gestione delle emergenze dagli enti che si occupano di fenomeni di dissesto;
- inserire questa figura nella filiera della divulgazione e sensibilizzazione delle comunità che vivono in contesti interessati dal problema.

Quanto sopra nasce dall'esperienza operativa delle strutture di Arpa Piemonte, precedentemente parte della Direzione Regionale Servizi Tecnici di Prevenzione, che hanno operato ed operano nel campo delle valutazioni di pericolosità e rischio geologico ed hanno preso direttamente parte alle fasi di gestione dell'emergenza nel corso dei numerosi eventi alluvionali degli ultimi 15 anni.

Tali esperienze hanno dimostrato il ruolo indispensabile delle guide in situazioni quali:

- valutazioni di pericolosità, in parete, relative a crolli che interessano abitati e vie di comunicazione;
- gestione di situazioni di crisi relative alla viabilità;
- gestione di situazioni che comportano una profonda conoscenza del territorio.

2.14.2 Attività sviluppate nel corso del progetto

Corso di formazione

L'attività si è svolta nella primavera 2006 ed ha interessato circa 20 Guide che hanno seguito un corso teorico e pratico di 64 ore che ha presentato i diversi aspetti del problema del dissesto in ambiente alpino: crolli in roccia, colate detritiche e processi glaciali.

Le lezioni sono state perlopiù tenute da tecnici di Arpa Piemonte, con interventi specialistici da parte di due

Guide Alpine-geologi (provenienti dalla Lombardia e dalla Valle d'Aosta) e da parte del CNR-IRPI di Torino, per gli aspetti glaciologici.

Le uscite sul terreno sono state dedicate all'approfondimento degli aspetti presentati in aula e si sono svolte nelle zone tra le più rappresentative, per quanto riguarda le Alpi piemontesi, dei diversi fenomeni: la valle d'Ossola, per i crolli in roccia; i ghiacciai del Monte Rosa, a Macugnaga, per gli aspetti glaciali; e la valle di Susa per quanto concerne le deformazioni gravitative profonde e le colate detritiche.

Supporto in frana

Alle giornate di formazione hanno fatto seguito uscite pratiche in cui i tecnici di Arpa Piemonte sono stati affiancati dalle Guide Alpine nelle attività di installazione di sistemi di misura, per il monitoraggio di situazioni di dissesto, e di misurazione sui siti già strumentati. Le Guide Alpine hanno così potuto avvicinarsi alle diverse tecniche utilizzate, collaborando in particolare in quei siti dove sono necessarie manovre alpinistiche e apprendendo le nozioni necessarie per poter proseguire nel tempo in modo autonomo le attività di misura, in particolare in caso di emergenza.

2.14.3 Attività di divulgazione delle Guide Alpine

L'attività di divulgazione delle Guide Alpine nell'ambito del progetto PROVIALP, si è articolata in diverse tipologie di interventi:

- presso gli enti locali (Comunità Montane);
- nelle scuole di tutti i gradi (elementari, medie e superiori);
- presso operatori del Soccorso Alpino.

Le finalità dell'intervento sono variate in funzione del pubblico, ma hanno avuto come elemento comune una introduzione alle problematiche dei dissesti idrogeologici, con una particolare attenzione a quelli più significativi per le aree in cui l'evento era organizzato.

Gli interventi presso le comunità montane si sono svolti con la presenza di amministratori locali, di coloro che operano a vario titolo sul territorio (tecnici comunali, volontari Protezione Civile e Antincendi Boschivi) e, talora, con la popolazione locale. I temi trattati hanno riguardato le tematiche del progetto nonché la presentazione della figura della Guida Alpina con preparazione specifica su temi del dissesto, del monitoraggio preventivo e del coinvolgimento in situazioni di emergenza.

Presso le scuole invece si è dato maggior spazio alla presentazione dei fenomeni e in parecchi casi si è scelto di compendiare l'attività teorica svolta in aula con una giornata organizzata sul terreno per approfondire la conoscenza del territorio e degli eventi potenziali che potrebbero interessarlo. Trattandosi spesso di scuole di valle, si è potuto confrontare quanto visto in aula con la realtà delle aree circostanti e questo ha reso particolarmente interessante l'esperienza dei ragazzi.

Infine nelle giornate dedicate ad incontri con volontari del Soccorso Alpino si è dato rilievo agli aspetti di prevenzione che possono essere messi in atto e a quelli da tenere in considerazione in caso di emergenza/soccorso.

La **tabella 2.14.1** riassume gli interventi divulgativi effettuati dalle Guide, sia presso le scuole che presso le comunità locali.

Giorno	Località	Sede	Relatori	Temi	Durata intervento (h)	Pubblico	Numero approssimativo partecipanti
23/4/2007	Domodossola (VB)	Volontari del soccorso alpino	Pettinaroli	Rischi valanghe conoscenza della neve	3	Volontari CNSA (Corpo Naz. Soccorso Alpino)	50
29/4/2007	Domodossola (VB)	Volontari del soccorso alpino	Pettinaroli	Approfondimento sulle conoscenze della neve, trasformazioni e comportamenti	3	Volontari CNSA (Corpo Naz. Soccorso Alpino)	50
22/5/2007	Varzo (VB)	Comunità Montana Valli Antigorio Formazza e Divedro	Giolitti, Pettinaroli	Rischio idrogeologico e ruolo delle guide	2	Amministratori e tecnici locali	10
23/5/2007	Baceno (VB)	Scuola Media di Baceno	Pettinaroli, Monari	Rischio idrogeologico e problemi relativi alla neve	6	Ragazzi di I,II,III media	40
23/5/2007	Crodo (VB)	Istituto Agrario di Crodo	Pettinaroli, Monari	Rischio idrogeologico e problemi relativi alla neve	6	Ragazzi di I,II,III media superiore	40
24/5/2007	Varzo (VB)	Scuola Media di Varzo	Pettinaroli, Monari	Rischio idrogeologico e problemi relativi alla neve	6	Ragazzi di I,II,III media	30
24/5/2007	Crevoladossola (VB)	Scuola Elementare	Pettinaroli, Monari	Rischio idrogeologico e problemi relativi alla neve	6	Ragazzi di III,IV,V elementare	60
31/5/2007	Locana (TO)	Comunità Montana Valle Orco e Soana	Giolitti	Rischio idrogeologico in valle Locana e ruolo delle guide	1	Amministratori e tecnici locali	20
31/7/2007	Paesana (CN)	Comunità Montana Valle Po	Giolitti, Gallo	Rischio idrogeologico e ruolo delle guide	2	Amministratori e tecnici locali	10
1/10/2007	Perosa Argentina (TO)	Scuola Elementare di Perosa	Mattiel	Elementi di geologia, di cartografia e di orientamento	2	Ragazzi di III-IV elementare	40
22/10/2007	Mondovi (CN)	Liceo Scienze Sociali Mondovi	Dho, Canova	Manovre di soccorso in montagna	3	Ragazzi di I superiore	25
29/10/2007	Mondovi (CN)	Liceo Scienze Sociali Mondovi	Dho, Canova	Manovre di soccorso in montagna	3	Ragazzi di I superiore	45
5/11/2007	Boves (CN)	Scuola Media di Boves	Ferrero	Presentazione dell'ambiente geologico naturale e trasformazioni del territorio	4	Ragazzi di II media	20
7/11/2007	Boves (CN)	Scuola Media di Boves	Ferrero	Presentazione dell'ambiente geologico naturale e trasformazioni del territorio	4	Ragazzi di II media	20
23/11/2007	Gravellona Toce (VB)	Istituto C. " G. Galilei"	Pettinaroli, Monari	Rischio idrogeologico e problemi relativi alla neve	3	Ragazzi di I,II,III media	15
24/11/2007	Gravellona Toce (VB)	Istituto C. " G. Galilei"	Pettinaroli, Monari	Uscita sul terreno	6	Ragazzi di I,II,III media	15
30/11/2007	Valduggia (VC)	Scuola Media Valduggia	Monari	Rischio idrogeologico e problemi relativi alla neve	3	Ragazzi di I,II,III media superiore	40
30/11/2007	Valduggia (VC)	Scuola Media Valduggia	Monari	Uscita sul terreno	6	Ragazzi di I,II,III media superiore	40

Tabella 2.14.1 Prospetto riassuntivo degli interventi divulgativi promossi dalle Guide Alpine

2.14.4 Monitoraggio sentieri

Nella fase finale del progetto è stata effettuata, a scopo sperimentale, una attività di descrizione e classificazione dei sentieri, con particolare riferimento agli aspetti relativi ai rischi naturali. Un monitoraggio della rete sentieristica, in tal senso, risulta di grande importanza in quanto il sempre maggior numero di escursionisti che percorre annualmente i sentieri alpini aumenta esponenzialmente le possibilità di incidenti dovuti a crollo o ad altri fenomeni naturali.

A tale scopo si è predisposta una scheda di raccolta dati sui sentieri, di facile compilazione, quale strumento per descrivere i potenziali pericoli che interessano un determinato sentiero.

La scheda comprende i dati descrittivi sulla tipologia di sentiero e dati geografici, necessari per delimitare tratti con caratteristiche omogenee e tratti soggetti a potenziali dissesti, il tutto integrato da immagini fotografiche georiferite.

Un costante aggiornamento di questi dati potrebbe diventare un importante strumento per chi si occupa della gestione della sicurezza sul territorio.

È stata individuata una serie di sentieri di particolare significato turistico o comunque ad alta percorrenza in tre diverse valli (valle Sesia, valle Orco, valle di Susa) e sono state applicate le procedure di osservazione concordate.

Di seguito, a titolo di esempio, viene proposta la scheda di rilievo del sentiero per il Bivacco Ravelli-Passo Tailly che si sviluppa nel comune di Alagna Valsesia (VC).

SCHEDA RILEVAMENTO CRITICITÀ RETE SENTIERISTICA

Provincia _Vercelli_ Comunità Montana _Valle Sesia_

Comuni interessati _Alagna_

Gruppo montuoso _Del Corno Bianco_

Partenza da _Alagna_ Arrivo a _Alagna_

Segnavia _3_

Eventuale denominazione _Sentiero per il Bivacco Ravelli e traversata al Passo Tailly_

Compilatore Paolo Pettinaroli

Segnalazione avuta da Andrea Enzo e Michele Cucchi (gruppo Guide Alagna)

Allegati su supporto digitale

Allegato file traccia _____ (*)

Allegato file *waypoint* Tailly (**)

Allegato fotografie Cartella Tailly_Ravelli

Nota:

L'obiettivo è quello di fornire una descrizione dettagliata ed esauriente sul sentiero oggetto dell'osservazione tramite la compilazione delle tre seguenti schede:

- Una presentazione completa del sentiero, suddiviso per tratti le cui caratteristiche siano omogenee (*Scheda Sentiero*).
- Una segnalazione dei tratti critici sui quali si potrebbero verificare (o si sono verificati) eventi di dissesto idro-geologico (*Scheda Criticità*).
- Una documentazione fotografica per illustrare tali eventi (*Scheda Fotografia*) a commento delle immagini da fornire in formato digitale.

(*) File che riporta la traccia del sentiero, oggetto dell'indagine, nella sua interezza

(**) In tutte le caselle in cui deve essere riportata una coordinata GPS, sarà sufficiente riportare il nome relativo al *waypoint*, di cui il file allegato.

Scheda Sentiero

Tratto	Coordinate GPS		Classe sentiero	Descrizione sentiero
	da	a		
T1	042	044	M	Dalla strada a monte della località Rasiga diparte un'ampia mulattiera (cartelli e segnavia 3) ben tenuta e di facile reperimento all'interno del bosco
T2	044	047	M	Ampia mulattiera che si svolge sui prati
T3	047	050	M	Nuovo tratto di mulattiera che taglia il costone a est degli alpeggi di Otro in leggera salita. Alle case di Pianmisura abbandonare la mulattiera e scendere nel valloncetto sottostante circa una ventina di metri e reperire il sentiero in leggera discesa verso sud est
T2	050	068	TS	Sentiero con una prima parte pianeggiante poi sale scavalcando alcuni canali tra gli ontani fino al torrente
T4	068	067	TS	(Bivio per Alpe Cuttiri). Senza attraversare il torrente proseguire sulla destra idrografica del torrente seguendo l'impluvio fino al pianoro soprastante
T5	067	066	TS	Dal pianoro piegare a sud, rimontare una pietraia (ometti e segnavia bianco rosso) fino a ritrovare una bella traccia che risale fino al laghetto
T6	066	Ravelli	TS	Piegando verso nord seguire la dorsale; in breve al bivacco
T7	Ravelli	069	TS	Verso sud seguendo i segnavia rosso gialli si scende di qualche metro e si punta allo sperone roccioso soprastante
T8	069	070	TS	Su pietraia si segue a mezzacosta una vaga traccia con ometti fino a raggiungere la sommità della morena sinistra del ghiacciaio d'Otro
T9	070	071	TS	Si prosegue in piano sulla pietraia con direzione sud sud-est fino a grandi blocchi scendere qualche metro per attraversare a valle della lingua di ghiacciaio
T10	071	072	TS	Proseguire senza percorso obbligato su pietre instabili, qualche ometto e segnavia
T11	072	073	TS	Alcune tracce conducono immediatamente sotto il colle
T12	073	Colle	TS	Tracce più evidenti e alcuni segnavia conducono facilmente al colle
T13	Colle	065	TS	Dal colle andare subito verso nord senza perdere quota per circa una ventina di metri (molto esposto)
T14	065	074	TS	Traccia di sentiero in direzione sud molto ripida, fino ad un canaletto incassato
T15	074	075	TS	Scendere ora per una traccia più evidente e comoda fino al lago Tailly superiore

Note per la compilazione scheda sentiero:

Ogni riga corrisponde ad un tratto del sentiero con caratteristica omogenea. In caso di un maggior numero di sezioni del sentiero, aggiungere altre righe continuando la numerazione di conseguenza (T20, T21, ...).

Questo è il significato dei vari campi:

- **Coordinate GPS:** inserire le coordinate GPS di inizio e termine del tratto rilevato.
- **Classe sentiero:** inserire le caratteristiche del tratto rilevato utilizzando le seguenti abbreviazioni: TS - traccia di sentiero; sentiero; SA - sentiero attrezzato con corde fisse; VF - via ferrata; M - strada mulattiera; ST - strada sterrata; SC - strada cementata; SF - strada asfaltata.
- **Descrizione sentiero:** breve descrizione delle caratteristiche del sentiero

Scheda criticità

Criticità	Coord. GPS		Descrizione Criticità	Classe fenomeno	Rif. Scheda Fenomeno (se necessaria)
	da	a			
C1	043	043	Piccolo smottamento a monte della mulattiera	FS	
C2	050	050	Colata detritica sulla quale è già stato realizzato un intervento di bonifica. Il fenomeno però interessa una superficie più ampia, sono visibili alcuni segni di inizio di distacco anche all'esterno del fenomeno	CO	
C3	071	071	In questo punto è rilevabile la presenza del ghiacciaio d'Otro		
C4	071	Passo	Il materiale lasciato sul pendio dal ritiro del ghiacciaio è instabile e si rilevano molte piccole frane. In particolare si rileva che alcuni segnava pitturati su grossi blocchi sono rotondi a valle e ora si trovano completamente fuori strada.	FS	

Note per la compilazione scheda criticità:

Ogni riga corrisponde ad un tratto del sentiero interessato con criticità di carattere idro-geologico. Questa può aver dato già atto a fenomeni ed in questo caso si compilerà anche una scheda fenomeno Monitoralp. In caso di un maggior numero di sezioni di criticità si aggiungeranno altre righe continuando la numerazione di conseguenza.

Questo è il significato dei vari campi:

- **Coordinate GPS:** inserire le coordinate GPS di inizio e termine del tratto interessato dalla criticità. Un file allegato permette la decodifica.
- **Descrizione criticità:** Completa e sintetica descrizione della criticità.
- **Classe fenomeno:** inserire il tipo di fenomeno che ha costituito o può costituire una criticità nel tratto rilevato (FR: frana in roccia, FS: frana in materiale sciolto, CO: colata detritica, VA: valanga, GL: evento glaciale).
- **Rif. Scheda Fenomeno:** inserire eventuale numero di riferimento della scheda fenomeno Monitoralp compilata per il tratto rilevato indicando in sequenza PROVINCIA/SEGNAVIA/TRATTO (es. Provincia di Torino, Segnavia IT41, Tratto T-5 = TO/IT41/T-5).

Scheda fotografie

Foto	Coordinata GPS del punto di scatto	Direzione vista	Nome file	Descrizione foto
F1	Ravelli	nord-est	Ravelli	Bivacco con evidenza della piazzola elicotteri
F2	067	nord	Stambecco	Esemplare di stambecco anziano
F3	070	sud	Ghiacciaio	Ghiacciaio di Otro
F4	050	sud e nord	Pm01,pm02,pm03	Sistemazioni della colata di Pianmisura
F5	Passo	sud	Tailly verso sud	Vista del primo tratto di discesa
F6	073	sud	Passo Tailly	Blocchi instabili verso il passo
F7	Passo	sud	Laghi Tailly	Vista dei laghi dal passo
F8	070	nord	Rosa	Vista del monte rosa dal ghiacciaio di Otro
F9	071	sud-est	Corno bianco	Parete nord del Corno Bianco
F10	044	nord-ovest	Otro	Vista del primo agglomerato di Otro
F11	043	nord	Sotto otro	Piccolo smottamento a sud di Otro

Note per la compilazione scheda fotografie:

Ogni riga corrisponde ad una fotografia che documenta gli eventi rilevati che illustrino le criticità rilevate (almeno uno o due per ogni evento). Si chiede di porre attenzione a dare una scala di riferimento dimensionale cercando di comprendere nell'immagine un oggetto di misure certe (persona, zaino, bastoncino, ...). In caso di un maggior numero di fotografie di criticità si aggiungeranno altre righe.

Questo è il significato dei vari campi:

- **Coordinate GPS:** inserire le coordinate GPS del punto di ripresa della fotografia.
- **Direzione vista:** inserire la direzione verso cui è stata scattata la fotografia (Es. nord, sud-est, ecc.)
- **File foto:** nome dei file fotografici digitali presentati per illustrare il fenomeno.
- **Descrizione foto:** Sintetica descrizione della immagine.



Figura 2.14.1 Estratto della carta dei sentieri IGC

Figura 2.14.2 Bivacco Ravelli; in primo piano la piazzola per l'atterraggio degli elicotteri (F1)





Figura 2.14.3 Pianmisura; sistemazione della colata mediante opere di bioingegneria (F4)



Figura 2.14.4 Passo di Tailly; blocchi instabili in prossimità del passo (F6)



LA CONTRIBUTION DU CEMAGREF **3**



Contexte général

Principe de localisation du
risque de chutes de pierres

Le génie biologique pare pierre

Présentation des études de cas

3.1 CONTEXTE GÉNÉRAL

Frédéric Berger, Luuk Dorren - Cemagref

L'homme a de tout temps eu besoin de la forêt. La forêt est une formation végétale où prédominent les arbres et autres végétaux ligneux poussant relativement près les uns des autres. Cette formation végétale est affectée à la production de bois d'œuvre et (ou) d'autres produits forestiers (baies, etc.); elle est également maintenue boisée pour en tirer des avantages divers tels que la protection des bassins-versants, la récréation, etc. (Dictionnaire forestier multilingue, 1975). L'homme l'a ainsi exploitée régulièrement en lui confiant des fonctions particulières (production, protection, détente, etc.). Les forêts de montagne sont donc des écosystèmes dont les aspects patrimoniaux sont les plus marqués. Un patrimoine est l'ensemble des biens, droits et charges d'une personne. Depuis des siècles la population montagnarde a cherché la protection (des biens et des personnes) que lui offre la forêt vis-à-vis des aléas naturels (avalanche, chute de pierre, etc.) mais elle a également été une source d'approvisionnement (bois, gibier, etc.). A ces deux fonctions traditionnelles de la forêt de montagne, l'évolution de la société a ajouté celles de protection de l'environnement et d'accueil du public. Leur valeur économique, les fonctions qu'elles doivent assurer et la gestion qu'il est nécessaire de mettre en œuvre pour conserver et améliorer ces fonctions font qu'elles sont un véritable patrimoine. Cette notion de patrimoine est une des expressions de la plurifonctionnalité de ces forêts.

L'évolution de la société et la part importante des loisirs au sein de celle-ci ont conféré aux forêts de montagne ou de plaine de nouvelles richesses patrimoniales telles que la protection des paysages, de la biodiversité et une nouvelle fonction récréative basée sur l'accueil du public. Ainsi elles ne doivent plus être considérées seulement comme des unités de production primaire (production de bois et de revenu financier) servant des intérêts particuliers, mais également comme des biens patrimoniaux et culturels. Elles servent ainsi les intérêts de la collectivité. Ces nouvelles fonctions doivent être prises en compte lors de l'élaboration des aménagements et des modes de gestion de ces forêts. Mais la forêt évolue (dynamique) et seuls certains stades de son développement naturel remplissent les diverses fonctions que l'on attend d'elle.

Les notions de développement durable, biodiversité et de multifonctionnalité, sont devenues incontournables pour la gestion du milieu naturel. La gestion est "l'art de prendre des décisions" concernant l'activité d'une entreprise. Cette prise de décision est guidée par la recherche d'objectifs qui varient en fonction de l'entreprise (Larousse agricole, 1981). La gestion forestière est donc l'ensemble des moyens et méthodes employés pour gérer une forêt afin d'assurer l'équilibre biologique de celle-ci et lui permettre d'assurer au mieux ses différentes fonctions (production de bois d'œuvre, récréation, etc.). La gestion des forêts de montagne, influencée par de fortes contraintes du milieu naturel, est devenue plus difficile et délicate du fait de l'homme et de ses activités. Notamment les activités de loisirs (sports d'hivers, randonnée, etc.) qui créent de nouvelles contraintes en matière d'aménagement et gestion du territoire.

Le simple fait de gérer les forêts selon le principe du rendement soutenu pris au sens de n'exploiter pas plus que ce que la forêt peut produire, ne suffit plus pour garantir ces nouvelles tendances.

Or, si les biens et les activités humaines menacés par les aléas naturels sont majoritairement et de plus en plus situés hors des zones naturelles et en aval de celles-ci: nous les appellerons "zones cibles"; les aléas trouvent par contre leurs origines dans les milieux naturels situés plus en amont et qui subissent souvent un abandon de l'activité agricole, forestière ou pastorale du fait du contexte économique et de la migration urbaine: nous les appellerons "zones sources".

La prévention peut dans ce schéma passer par deux politiques complémentaires:

- une défense active par une gestion adaptée des milieux naturels à la source de l'aléa, dont l'objectif est d'empêcher le phénomène de ce produire;
- une défense passive et rapprochée des "zones cibles", dont l'objectif est d'empêcher les aléas naturels de nuire. Dans ce cadre d'action les ouvrages de protection ont un rôle d'obstacle favorisant la déperdition d'énergie et le piégeage des matériaux en mouvement.

C'est ce deuxième volet qui est plus particulièrement abordé dans cet ouvrage.

Les coûts élevés d'implantation et d'entretien des ouvrages de génie civil et la volonté d'optimiser les investissements publics ont ré-initié dans les pays de l'arc alpin une réflexion sur l'adoption de mesures préventives et de valorisation des milieux naturels en tant qu'ouvrage naturel de protection.

Il faut souligner que dans ce contexte de réaffirmation du rôle de la végétation forestière, la baisse relative de la valeur du bois mène à la simplification ou même à l'abandon de la sylviculture en diverses régions de montagne. La production de bois y est non seulement plus faible, mais aussi de moindre qualité. Ainsi, par analogie avec le secteur agricole, on peut parler de déprise forestière et d'une concentration des activités forestières sur les zones les plus favorables, économiquement parlant.

Des fonctions essentielles de protection risquent donc de ne plus être assurées par des peuplements forestiers trop grossièrement exploités ou insuffisamment entretenus. Or bien souvent, seule la disparition des peuplements forestiers permet aux gestionnaires d'apprécier à posteriori leur rôle de protection. Pour anticiper ces évolutions catastrophiques et éviter de "courir derrière l'urgence", il est donc nécessaire, dans une optique de gestion minimale, de cibler au mieux le lieu et la nature des interventions à réaliser. Afin de remplir ces exigences il est nécessaire de disposer de connaissances scientifiques solides pour localiser, qualifier et quantifier le rôle de protection de la végétation forestières.

Reprenant ce constat pour la plupart des pays européens, la conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe, organisée en décembre 1990 à Strasbourg, et toujours en vigueur, a préconisé dans sa résolution n° 4, une adaptation de la gestion des forêts de montagne aux nouvelles conditions d'environnement.

Parmi les projets identifiés, la résolution insistait sur les points suivants:

- meilleure appréciation et meilleure prise en compte des problèmes de stabilité (capacité à résister aux agressions biotiques et abiotiques);
- approfondissement des différentes fonctions, en particulier de la fonction de protection contre les risques naturels;
- cartographie des différentes données du milieu grâce, en particulier, à l'utilisation des systèmes d'information géographique permettant l'élaboration de différents scénarios d'évolution, en fonction des choix de gestion retenus.

La forêt peut maîtriser partiellement ou totalement les conséquences des divers aléas en retenant des blocs en mouvement, en luttant contre l'érosion et les glissements superficiels, en évitant le départ d'une avalanche, etc. Un peuplement forestier a des modes d'actions qui diffèrent en fonction du type de phénomène, de sa localisation par rapport à l'aire prospectée par un aléa, de l'échelle d'analyse (échelle de l'arbre, du versant, du bassin versant) des essences présentes (diamètre, âges, etc.) et de l'organisation spatiale des arbres. Même si la forêt ne peut pas tout éviter, elle agit au moins selon le principe de "diviser pour mieux régner" envers les divers types d'aléas.

A ce sujet, nos connaissances scientifiques actuelles, en matière de recherche, d'observations, etc., sont relativement bonnes envers certains types d'idées et lacunaires envers d'autres. Dans la majorité des cas, ces connaissances et leurs applications pratiques ne sont malheureusement pas assimilées par les gestionnaires de terrain qui doivent prendre les décisions. Un des objectifs de cet ouvrage est d'apporter à ces gestionnaires des méthodes et des outils leur permettant de mobiliser et d'utiliser les connaissances actuellement disponibles sur le génie biologique pare pierre.

Le choix d'une stratégie de prévention et protection des risques naturels, nécessite donc en zone de montagne une réflexion sur la protection que peut offrir la forêt. Cela nécessite entre autre la classification et la caractérisation des peuplements en fonction de leur rôle de "protection", la réalisation d'une cartographie de ces peuplements et la détermination des zones prioritaires d'interventions sylvicoles.

Ces zones doivent comprendre à la fois la notion de priorité en fonction de la nature des enjeux menacés et la notion d'urgence en fonction du degré de stabilité des peuplements. La fonction de protection d'une forêt est maximale quand elle maintient un aléa naturel à une activité potentielle. Il est par conséquent important pour le gestionnaire forestier de pouvoir recenser les zones soumises à ce type d'aléa (zone de départ, zone d'écoulement, zone d'arrivée). Là encore, cette localisation a pour objectif final la mise en œuvre d'une sylviculture adaptée au maintien et à l'amélioration de la fonction de protection de ces peuplements.

Dans le cadre général de la gestion des forêts de montagne, cet ouvrage apporte, dans ce contexte du génie biologique pare pierre, une contribution à la fois méthodologique et appliquée.

Avant de présenter les méthodes et les outils qui ont été utilisés et développés dans ce projet, nous allons définir certains concepts et notions relatifs aux risques naturels et à leur prévention.

3.1.1 Le risque de chutes de pierres et de blocs: définition et importance

Les principales notions relatives à la prévention des risques naturels

La notion de phénomène naturel

Un phénomène naturel est un fait naturel constaté susceptible d'étude scientifique et pouvant devenir un sujet d'expérience (GDEL, 1983). Ainsi les précipitations (pluie, neige), les avalanches, les chutes de pierre, les glissements de terrain, les inondations, les séismes, le vent, les tempêtes, les raz de marée, le feu sont des phénomènes naturels.

La notion d'aléa naturel

Le terme d'aléa désigne le tour imprévisible pris par les événements (GDEL, 1983), et lié à l'activité, l'action d'un phénomène naturel. Le vocable d'aléa naturel est donc associé à celui de phénomène naturel mais il véhicule en plus les concepts de probabilité d'occurrence, d'éventualité défavorable et d'importance.

Dans cet ouvrage la définition d'un aléa naturel a été limitée à:

un phénomène naturel caractérisé par l'individualisation, la mobilisation d'un matériau et son déplacement avec ou sans agent de transport (vent, eau, etc.). Le facteur essentiel mis en jeu est, ici, la gravité, aidée par l'eau sous toutes ses formes (Derruau, 1974).

La notion d'enjeu socio-économique

Les enjeux socio-économiques sont les résultats des activités humaines et ses conséquences. Ils correspondent donc aux biens et aux personnes. Dans le cadre de cet ouvrage nous avons décidé de ne pas considérer le milieu naturel comme un enjeu.

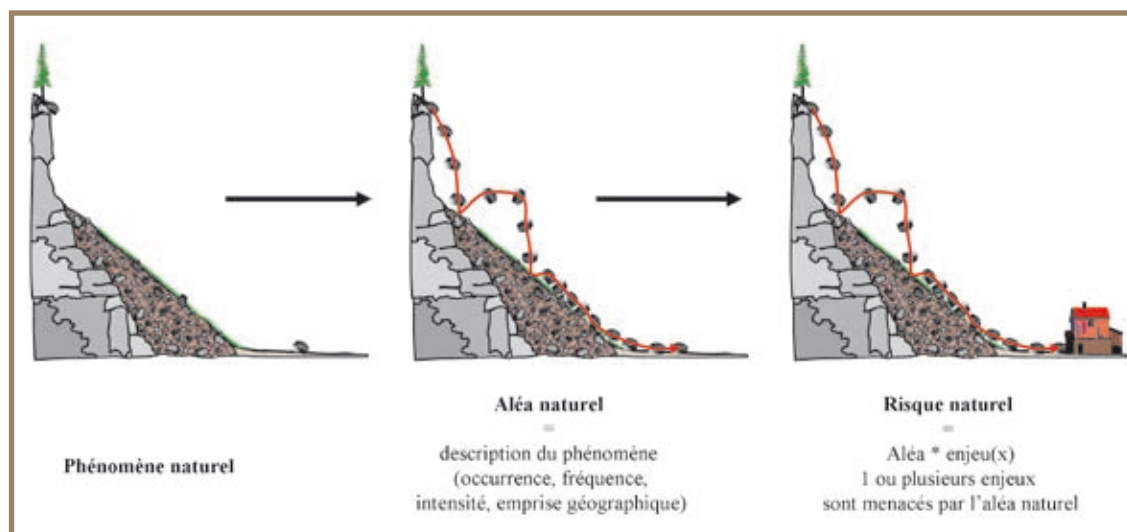
Un risque est la situation résultante de la menace qu'exerce quelqu'un ou quelque chose sur la sûreté ou l'existence d'une personne ou d'une chose. Cette menace est aussi appelée danger. Par conséquent un risque naturel n'existe que si un enjeu est exposé à un aléa naturel. Les gestionnaires des services chargés de la protection des biens et des personnes donnent une définition similaire. Pour ces derniers, le risque est le résultat du croisement (**figure 3.1.1**):

$$\text{Risque} = \text{Enjeux socio-économiques} \cdot \text{Aléas naturels}$$

Dans le cadre des risques naturels, le danger est synonyme de préjudice ou sinistre éventuel. Il s'exprime par l'extension géographique d'un aléa naturel résultant de son activité. Ce dernier peut détruire en partie ou complètement les enjeux qu'il menace. Afin de pouvoir élaborer une politique de prévention et de protection pour un site donné, il faut être en mesure de localiser, de déterminer, la nature et d'apprécier l'ampleur de la menace.

Figure 3.1.1

Représentation schématique des notions de phénomène, d'aléa et risque naturel



La notion de protection

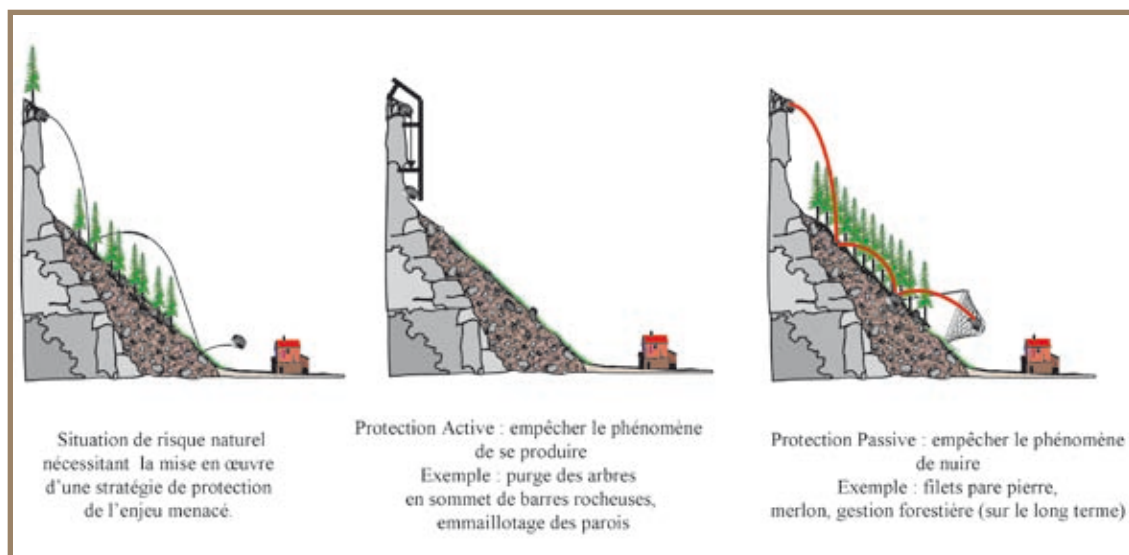
Le concept de protection est obligatoirement lié à celui de risque. C'est en effet l'action qui permet de garantir la sécurité des enjeux menacés. Il faut garder à l'esprit qu'en matière de risque naturel il n'existe pas de moyen de protection efficace à cent pour cent.

En matière de protection, on peut agir à deux niveaux (**figure 3.1.2**):

- protection active: empêcher les phénomènes redoutés de se produire;
- protection passive: accepter que le phénomène se produise mais l'empêcher de nuire.

Figure 3.1.2

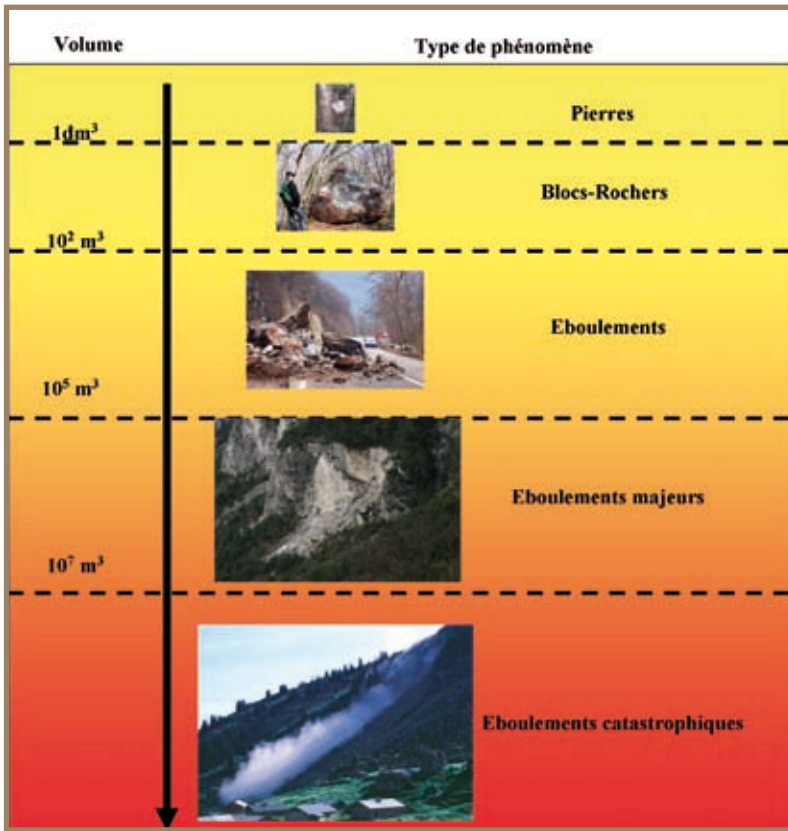
Représentation schématique des notions de protection active et passive



La meilleure des protections est la prévention. Cette prévention doit empêcher le déclenchement, limiter l'ampleur des aléas ou les localiser de façon précise afin d'éviter l'implantation de nouveaux enjeux. Les moyens dont dispose le gestionnaire pour mettre en œuvre une action de protection sont basés sur le génie civil (ouvrage paravalanche, etc.), le génie biologique (reboisement, etc.) et l'utilisation d'outil juridique (réglementation, etc.).

Les risques liés aux mouvements rocheux

Il existe différents types de mouvements rocheux. Ils sont généralement classés en fonction des volumes qui se propagent, comme indiqué sur le schéma suivant. En particulier, un bloc (aussi dénommé rocher dans la littérature) se caractérise par un volume situé entre le décimètre cube et la centaine de mètre cube (**figure 3.1.3**). Une pierre quant à elle a un volume inférieur au décimètre cube.



Comme pour tous les types d'aléas, la cartographie des mouvements rocheux représente la spatialisation de la dynamique de ce phénomène. Elle nécessite une bonne connaissance des critères et conditions nécessaires à la naissance de cet aléa naturel. Il ne faut pas confondre la cartographie des aléas naturels avec le zonage de ceux-ci. En effet, le zonage est un processus réglementaire qui organise la répartition d'un territoire en zones homogènes et qui fixe pour chacune d'elles le genre et les conditions de l'utilisation du sol.

La dynamique des mouvements rocheux se décompose en trois phases: une phase de mobilisation des matériaux in situ, une phase de mouvement et une phase d'arrêt de ce mouvement. Cette dynamique s'exprime par une décomposition du secteur géographique soumis à l'aléa naturel en trois zones (figure 3.1.4):

- la zone de départ: secteur contenant les matériaux mobilisables;
- la zone d'écoulement, de transit ou de propagation: secteur où les matériaux mobilisés sont en mouvement;
- la zone d'arrêt, de dépôt ou d'épandage: secteur où prend fin le déplacement des matériaux mobilisés.

Figure 3.1.3 Classification des mouvements rocheux, (d'après Rochet, 1987; Mourer, 1999)



Figure 3.1.4 Processus en œuvre et leur expression cartographique

La dynamique des mouvements rocheux se caractérise donc par la mise en mouvement d'un matériau lors d'une rupture d'équilibre, suivie d'une propagation dans la pente associant mouvements horizontaux et verticaux, puis d'un arrêt par un retour à l'équilibre.

Pour une prise en compte du risque, occasionné par cet aléa, dans la gestion et l'aménagement du territoire, il faut être en mesure de pouvoir localiser chacune de ces zones. La plus importante est la zone de départ. Sa détermination est basée sur la localisation des secteurs où les matériaux sont mobilisables. Elle intervient dans la définition des moyens de protection à adopter pour garantir la sécurité des biens et des personnes. En effet, le volume de matériaux contenus dans cette zone ainsi que les données topographiques sont utilisés pour estimer les dimensions (largeur et longueur) des zones de transit et d'arrivée.

L'objectif de la cartographie est de pouvoir répertorier les zones assujetties à un aléa naturel. Elle doit aussi bien répertorier les aléas dits potentiels qu'actifs. Un aléa potentiel est un phénomène qui n'a jamais été observé à ce jour e passé.

La cartographie d'un aléa déclaré est facilitée par la présence sur le terrain ou dans les archives d'indices de son activité actuelle ou passée. Par contre, pour un phénomène potentiel on ne dispose a priori d'aucun élément d'information. Il faut donc pouvoir établir un pronostic sur l'éventualité du phénomène. Pour ce faire, il faut être en mesure de repérer et localiser les zones d'instabilité potentielle, puis de déterminer l'acuité du risque de rupture de la stabilité (appelé aléa de rupture par Rochet, 1987) et enfin d'analyser les conditions de propagation des matériaux ainsi mobilisés. Cette analyse doit permettre de définir la zone d'arrêt du phénomène.

La phase de mobilisation des matériaux

L'analyse de "l'aléa de rupture" est déterminante mais délicate. Elle nécessite de bien apprécier l'état de stabilité actuel et de prévoir sa phase ultime. Cette appréciation est entachée d'une incertitude. En effet, on estime que le déclenchement de la rupture est aléatoire. En utilisant le résultat de ces deux analyses (stabilité actuel et phase ultime), on est en mesure d'estimer la masse de matériaux mobilisables et les conditions de rupture. Ces deux données peuvent donc être utilisées dans des modèles numériques de simulation trajectographique. L'utilisation des modèles numériques permet, en fonction du modèle utilisé, d'estimer les trajectoires, les distances d'arrêts et l'énergie dissipée par le phénomène naturel. L'ensemble de ces résultats est utilisable pour l'élaboration des mesures de prévention ou de protection nécessaires à la mise en sécurité des biens et des personnes.

La phase de mobilisation se caractérise par la constitution d'un gisement de matériaux mobilisables: les altérites. Ce gisement provient de la dégradation sur place des roches. Elle commence par leur désagrégation (processus mécaniques) et/ou leur altération (processus chimiques). Les altérites qui en résultent peuvent être ultérieurement mobiles (Campy et Macaire, 1989). Ceci dépend, entre autres, de la pente.

La désagrégation provient de l'augmentation et de la multiplication des fissures existant dans la roche initiale (diaclyse). Toutes les masses rocheuses sont prédécoupées par des systèmes de discontinuités. Celles-ci résultent de la genèse des roches, des phases tectoniques ultérieures et du façonnement des reliefs durant les ères géologiques. Les masses rocheuses d'origine sédimentaire sont caractérisées par la présence de joints stratigraphiques de grande extension et de réseaux de diaclases perpendiculaires. Les masses rocheuses d'origine magmatique, non tectonisées, sont généralement prédécoupées par 3 familles directionnelles de discontinuité. Les masses rocheuses d'origine métamorphique sont affectées de systèmes de discontinuités plus complexes, hiérarchisés en fonction de phases tectoniques multiples. Une direction d'anisotropie majeure (schistosité, foliation) y est généralement présente.

La désagrégation va donc favoriser l'altération par l'augmentation de la surface de contact entre la roche mère et les agents d'altération (le principal étant l'eau). L'altération modifie, quant à elle, la composition chimique des roches. Cette modification va se traduire par une solubilisation de certains sels et l'effondre-

ment des structures cristallines.

La roche en surface subit deux grands types d'altérations:

- une altération physique due à l'eau accumulée dans les fissures qui gèle et dégèle et provoque ainsi une désagrégation des roches. C'est la gélifraction. Lorsqu'il y a du vent, un effet de levier est exercé par les arbres. Cela se traduit par un agrandissement des fissures (diaclasses) prospectées par leurs racines;
- une altération chimique provoquée par l'eau et les substances dissoutes (CO₂, acides humiques): hydrolyse (dislocation chimique par l'eau) et disparition chimique des calcaires.

Un grand nombre de facteurs interviennent sur ces processus. Ils ont été regroupés en deux familles:

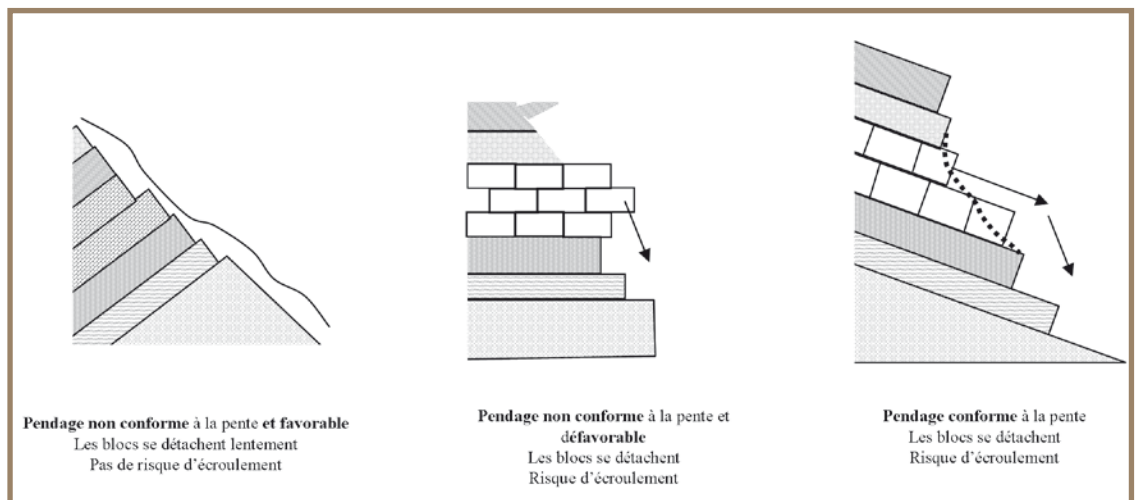
- facteurs passifs liés à la nature du substrat et de ses produits dérivés (pendage, fracturation, orientation, etc.);
- facteurs actifs liés aux agents d'érosion (climat, action biologique, etc.).

Les roches sont aussi soumises à des contraintes internes. Ces contraintes ont varié avec les temps géologiques. Initialement, les roches en profondeur étaient soumises à:

- des contraintes verticales dues aux poids des roches;
- des contraintes horizontales dues aux forces tangentielles s'exerçant dans la croûte terrestre.

La perturbation de ces contraintes lors de l'émergence des roches peuvent être assimilées à une détente des contraintes verticales et d'un déséquilibre des contraintes horizontales (Campy et Macaire, 1989). Enfin, en fonction des versants le façonnement du relief conduit à une décompression (par appel au vide) de ces masses rocheuses et à l'ouverture de leurs discontinuités. L'inclinaison des couches (le pendage) influe alors sur le détachement des blocs (**figure 3.1.5**).

Figure 3.1.5 Influence du pendage sur le départ des blocs (d'après Le Hir, 2005)



Ces déséquilibres vont donc favoriser l'écartement des diaclasses et la création d'un nouveau réseau de fissuration (néodiasclase) indépendant du réseau initial et parallèle au versant.

L'importance de ces phénomènes est donc liée:

- aux contraintes initiales (nature et intensité) donc au contexte lithologique;
- à la disposition structurale initiale: degré de fracturation, inclinaison des pendages, etc.;
- à la nature de la roche;
- au dénivelé du versant.

Si ce sont les causes principales de départ des blocs il existe cependant de nombreuses autres causes (foudre, tremblement de terre, etc.) qui ne sont pas détaillés dans cet ouvrage.

Dans cette phase de mobilisation, 3 paramètres sont à déterminer (Corominas et Moya, 1999):

- la position des zones sources, la taille et la forme des blocs (fonction des types de roches) susceptibles de se détacher;
- les intensités des phénomènes (volumes unitaires susceptibles de se détacher);
- la fréquence ou la probabilité d'occurrence associée à chaque intensité.

Pour une prévention adaptée, Guzzetti et Carrara (1999) insistent sur la nécessité d'identifier le lieu où le phénomène risque de se produire, de pouvoir appréhender son ampleur ou son intensité (caractéristiques et conséquences) et d'estimer sa fréquence d'occurrence (Guzzetti et Carrara, 1999). Compte tenu de l'incertitude des estimations des différents paramètres et de l'état d'avancement des travaux dans ce domaine, la cartographie des aléas naturels laisse apparaître la notion de probabilité. En effet, l'homme n'est pas à l'abri de catastrophes naturelles dont l'ampleur dépasse son imagination.

Il existe de nombreux documents sur les zones à risques. Cependant, ils ne donnent aucune information sur les éléments cités précédemment. L'occurrence ne peut être précisément déterminée. On peut par contre associer à chaque zone une estimation de la probabilité d'occurrence. Guzzetti et Carrara (1999) proposent une estimation à partir de la morphologie (5 types de terrains ont été choisis: terrains plats, vallons, collines, montagnes, haute montagne), la sismicité régionale et les conditions climatiques locales. Les zones de tests se trouvent en Italie. L'étude concerne les éboulements mais le protocole peut s'appliquer aux chutes de blocs. Néanmoins il reste difficile de cartographier les risques d'éboulement, la validation des résultats ne pouvant se faire que dans le temps.

Hantz *et al.* (2001) présentent une approche probabiliste alliant les études historiques et géomécaniques pour estimer le risque de rupture de masses rocheuses potentiellement instables. C'est la méthode HGP (*Historic Geomechanic Probability*). La dimension historique permet de déterminer une fréquence globale dans les zones où il existe un inventaire des éboulements; la géomécanique permet de détecter les masses rocheuses potentiellement instables. Elles sont réparties par classes selon leur probabilité d'éboulement. En combinant les 2 approches on obtient une fréquence individuelle par classe de risque de chutes. La hiérarchisation des instabilités potentielles n'est pas encore satisfaisante et nécessiterait que l'on s'y attarde à l'avenir. Si cette méthode utilise un protocole intéressant, elle implique qu'il existe un inventaire historique des éboulements sur le site étudié, or il est rare que ce soit le cas. Cela demande un effort de collecte et de traitement de l'information qui est très rarement fourni mais qui est pourtant nécessaire.

D'autres méthodes sont recensées et décrites dans l'ouvrage résultant des travaux du projet "Interreg IIC, Falaises, 2001" (p.62-66) ainsi que dans le premier chapitre de cet ouvrage.

Finalement, Besson (1996) souligne que l'état des connaissances ne permet pas de répondre de manière satisfaisante à la question: "quand le bloc va-t-il tomber?". Si l'état de la roche a un rôle prépondérant, il reste difficile de déterminer la fréquence d'occurrence des chutes. Il convient donc de s'attacher à l'étude de la protection et par conséquent, de considérer le risque comme étant acquis. Le terme risque acquis signifie que l'on considère que quoiqu'il arrive un projectile d'un volume donné (déterminé en fonction des blocs présents dans la zone de départ et de ceux observables dans les zones de propagation et de dépôt) se détachera de la zone de départ du site étudié.

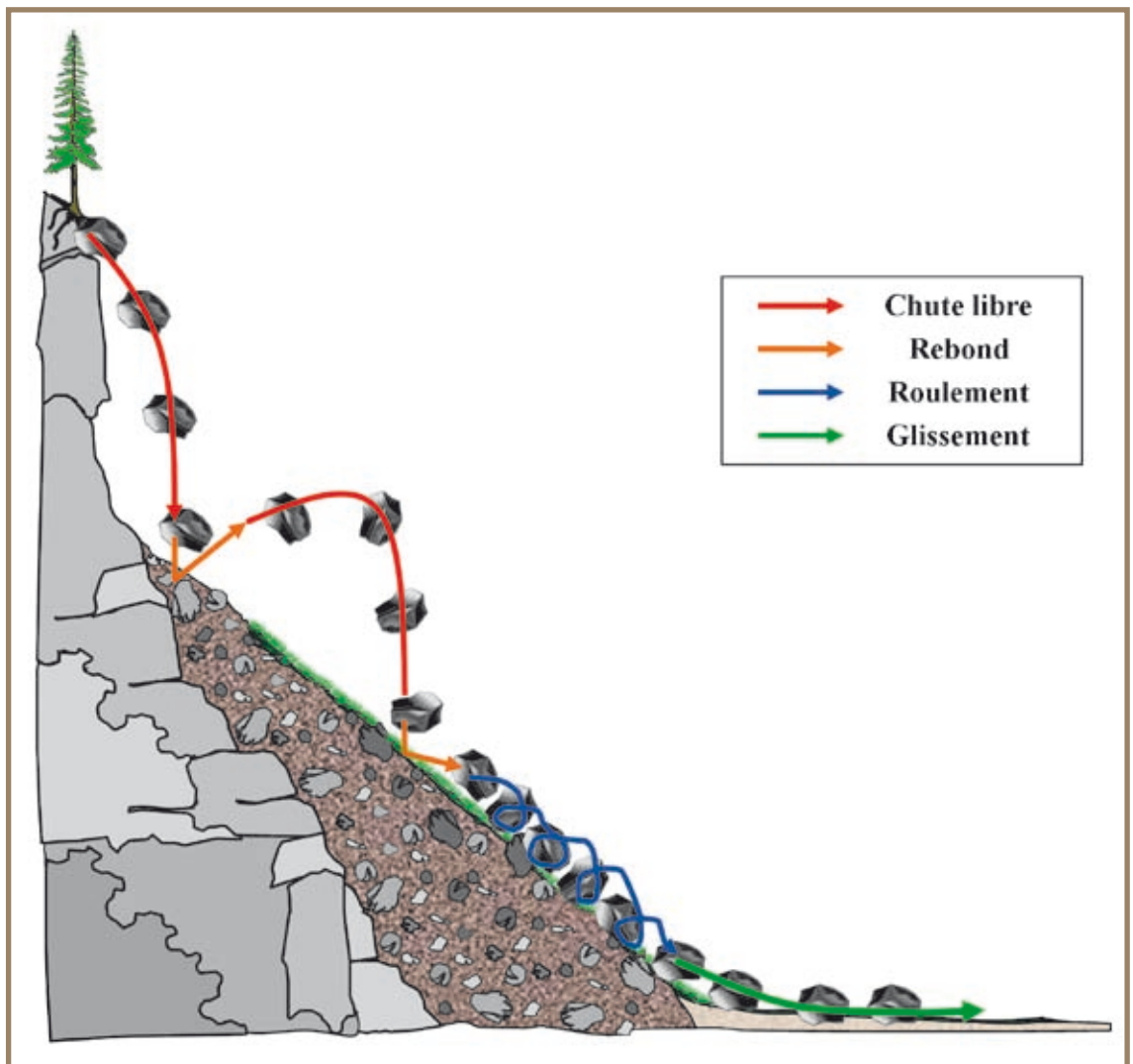
Le mouvement des matériaux mobilisables

La phase de propagation représente la mise en mouvement des matériaux mobilisables. Pour ce faire, il faut qu'il y ait extraction (ablation) puis déplacement des matériaux le long du versant. Ce déplacement est brutal et rapide. Le résultat de cette dynamique est la mise en place d'un versant stable, possédant une pente d'équilibre. Mais cette notion de stabilité n'est que temporaire pour l'homme. En effet, l'échelle de temps nécessaire à son acquisition n'a aucune commune mesure avec la durée de vie d'un homme.

La mise en mouvement ne peut s'effectuer que si la pente sur laquelle sont situés les matériaux mobilisables est supérieure à la pente d'équilibre du versant.

La pente d'équilibre au-dessus de laquelle un bloc est mis en mouvement par la gravité dépend du type de matériau. On qualifie d'instabilité rocheuse une masse proche de sa limite d'équilibre. Pour un éboulis elle est de l'ordre de 45° (Châtain et Payany, 1994). Pour des falaises, la valeur de pente critique est plus élevée. Pour des micaschistes, par exemple, elle est de l'ordre de 50° (Interreg IIC, Falaises, 2001), mais elle reste malgré tout fortement dépendante des conditions structurales de la masse rocheuse. Lorsque le projectile est mobilisé, sa propagation peut faire appel à 4 types de mouvements (Guzzetti et Carrara, 1999; Rochet, 1987), (figure 3.1.6).

Figure 3.1.6 Les 4 grands types de mouvement d'un bloc en propagation (d'après Guzzetti et Carrara, 1999)



La propagation de ces phénomènes est basée sur la dissipation d'énergie. Au départ, l'énergie est stockée sous la forme d'énergie potentielle qui est libérée lors de la rupture des conditions de stabilité du substrat rocheux. Elle se transforme ainsi en énergie cinétique au cours de la propagation.

Au cours de sa chute, et dans le référentiel du bloc, celui-ci peut avoir un mouvement de translation et un mouvement de rotation. Ces deux types de mouvement influent sur la trajectoire du projectile. Deux énergies caractérisent un bloc à chaque instant de son mouvement: les énergies potentielle E_p et cinétique E_c . Cette dernière énergie est elle-même composée d'une énergie de translation et d'une énergie de rotation. La phase d'arrêt correspond au retour à une situation d'équilibre qui se traduit par une énergie cinétique

nulle ($E_c=0$). L'équilibre du système qui en résulte peut être stable ou instable. S'il est instable, le bloc peut repartir sous certaines conditions. A l'opposé s'il est stable alors le projectile ne peut pas se remettre en mouvement. Lors de la propagation d'un bloc rocheux, l'ensemble des auteurs s'accorde à considérer que les frottements de l'air sont considérés comme négligeables. Ils n'ont donc pas d'influence sur la trajectoire du bloc (Bozzolo et Pamini, 1986). Au cours du mouvement, le projectile peut perdre une partie de son énergie. Les causes de cette dissipation d'énergie du bloc sont multiples, ce sont:

1. les frottements;
2. les déformations plastiques du sol;
3. les fragmentations éventuelles du bloc;
4. le transfert d'énergie de translation en énergie de rotation;
5. l'onde de déformation élastique transmise au terrain;
6. les obstacles, naturels ou non.

Cette dissipation d'énergie met donc en jeu des mécanismes complexes (bond, rebond, frottement, etc.) qui sont fonction des variations des conditions locales (topographie, plasticité du sol, présence d'obstacles, etc.).

Au final quand le projectile a dissipé toute son énergie cinétique, la zone où il s'arrête correspond à la zone de dépôt, quelque fois dénommée aussi zone d'épandage.

L'importance du risque de chutes de pierres et de blocs dans le département de la Savoie

Dans les départements français plusieurs organismes recensent les phénomènes de chutes de pierres et de blocs rocheux qui se produisent. Ce sont soit des services en charge de la mise en œuvre de la politique de prévention des risques naturels tels que la Direction Départementale de l'Équipement (DDE), le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) soit des gestionnaires de réseau tel que l'Électricité de France (EDF) et Réseau Ferré de France (RFF). Chacun de ces organismes a développé une fiche de recensement des phénomènes observés. Malheureusement l'accès à ces informations n'est pas toujours possible et ce pour différente raison (confidentialité, propriété des données, problème d'archivage et de stockage). Pour le département de la Savoie, nous avons pu consulter les fiches événements sur service départemental RTM. L'intérêt de ces fiches est qu'elles sont exhaustives pour les phénomènes ayant occasionnés des dégâts dans des secteurs où des enjeux socio-économiques sont menacés. Les dégâts ont été occasionnés au milieu naturel, et/ou à des habitations & infrastructures, et/ou à des voies de communication. Au total 162 dégâts à des enjeux ont été répertoriés. La classe milieu naturel correspond aux cas pour lesquels les projectiles se sont arrêtés avant les enjeux socio-économiques menacés. Un même événement a pu causer des dégâts à différents type d'enjeux. Ces fiches couvrent la période 1989-2006.

Ainsi pour le département de la Savoie au total 140 événements de chutes de pierres et de blocs rocheux ont été inventoriés. Ces 140 événements ont occasionné 162 dégâts à une des trois classes d'enjeux. La

figure 3.1.7 représente le diagramme de répartition des dégâts par années et par classes d'enjeux.

Au regard de ce graphique on s'aperçoit que depuis 1999 il y a une forte augmentation du nombre d'événements recensés. Ceci est à mettre en corrélation avec les conditions climatiques. En effet l'année 1999 a été marquée par un hiver rigoureux et une sécheresse estivale et 2003 par une forte sécheresse estivale. Ceci illustre l'importance du facteur climatique sur la mobilisation des matériaux.

Dans cette population d'événements, la répartition des dégâts par classe d'enjeux socio-économique est donnée dans la **figure 3.1.8**.

Ainsi, 25% des dégâts a touché les voies de com-

Figure 3.1.7 Courbe des effectifs cumulés des dégâts par chutes de pierres pour chacune des classes d'enjeux et total par année et pour la période 1989-2006 (source fiche événement RTM 73)

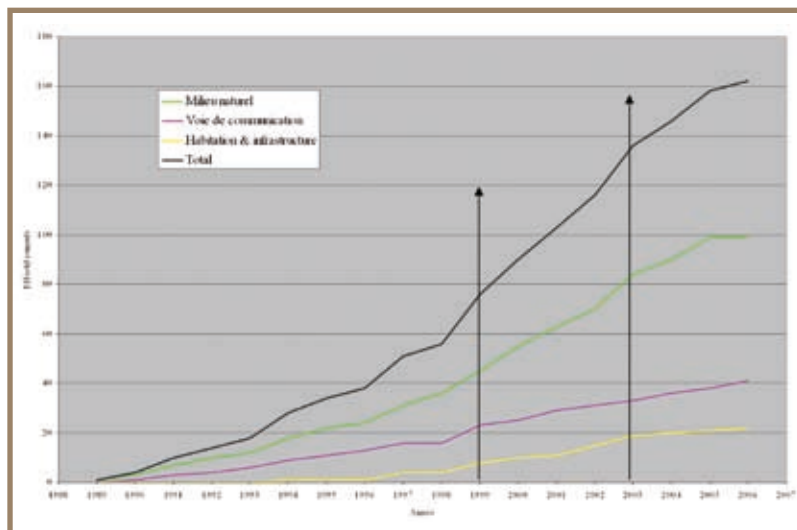
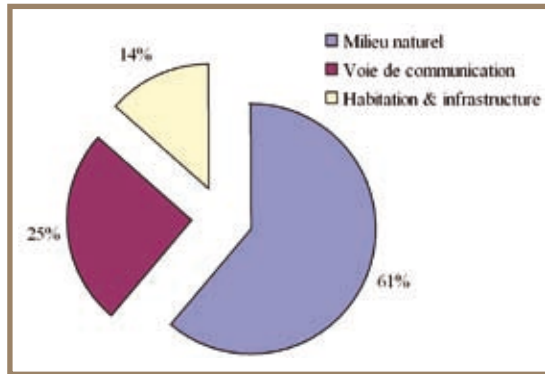


Figure 3.1.8 Répartition des événements en fonction des enjeux socio-économiques atteints. Le pourcentage correspond à: nombre de fiches par classe d'enjeu/162, 162 étant le nombre total de dégâts



munications du département de la Savoie. Il ressort de ce graphique et pour la période étudiée que les voies de communication sont deux fois plus concernées que les habitations et les infrastructures (réseau électrique, d'eau et de téléphone).

La **figure 3.1.7** met en évidence l'importance des accidents climatiques des années 1999 et 2003. Il semble que les conditions climatiques de l'année 1999 ont favorisé l'altération des matériaux ce qui se traduit par un plus fort taux d'événements recensés par année pour la période 1999-2006. Pour valider ces résultats il conviendrait de mener des études sur l'impact des accidents climatiques et de l'évolution du climat sur le risque de chutes de pierres et de blocs rocheux.

Au regard de ces différents graphiques, on s'aperçoit, qu'en nombre de fiches événements du RTM, les voies de communication sont la classe d'enjeu la plus concernée par le risque rocheux. Il convient donc d'aider les gestionnaires de ces infrastructures de communication afin qu'ils puissent établir une stratégie de prévention et de protection la plus efficace possible. Pour ce faire, il faut leur fournir des méthodes et des outils afin de localiser et caractériser au mieux les secteurs concernés par ce type de risque.

3.1.2 Modèles et préventions des risques par l'affichage

En matière de prévention des risques, la politique française est basée sur l'affichage du risque. Cet affichage nécessite de cartographier les phénomènes déclarés ou potentiels afin de délimiter l'emprise vraisemblable totale des territoires menacés, d'évaluer le montant des biens menacés et de déterminer le risque prépondérant. L'estimation de cette zone d'atteinte, est essentiellement basée sur l'étude des phénomènes passés par le biais des documents historiques disponibles et des traces de passage et de dépôts observables sur le terrain. Il est impossible, dans ce contexte de cartographie des zones assujetties à un risque, de procéder à des expériences grandeur nature de terrain. De plus, lorsque le risque est "masqué" par la présence d'éléments qui le recouvrent, comme la végétation par exemple, le savoir-faire des experts de terrain n'est plus suffisant. Il convient alors d'utiliser des outils permettant de lever cet effet de masque de la végétation pour apprécier ce qui pourrait arriver en absence de végétation. Une solution existe: l'utilisation de modèles de simulation de propagation.

Définitions

Un modèle peut se définir comme étant une représentation numérique et simplifiée des relations existants entre les paramètres caractéristiques d'un phénomène ou d'un processus naturel. C'est une abstraction du monde réel qui met en évidence des éléments spécifiques et permet d'explorer numériquement de nombreux scénarios d'événements (Pouliot, 1999). Thériault et Claramunt (1999) précise que les modèles servent à organiser les connaissances. De même que Pouliot, il met en garde sur les différents sens du terme modèle selon les champs d'application. En mathématiques et en physique, un modèle est une représentation du phénomène par une série d'équations ou par une fonction. En informatique on parlera de modèles de données par exemple. On représente les entités du monde réel de sorte qu'on puisse les traiter par ordinateur. Le terme modèle a autant d'acceptions et il existe autant d'expressions que de disciplines dans lesquelles il est utilisé.

Quatre éléments constituent les modèles (Pouliot, 1999; Jorgensen, 1990):

- les variables: ce sont les entités qui décrivent le système à un instant donné. Elles prennent plusieurs valeurs dans un domaine défini. On distingue 3 types de variables: les variables d'entrée (commande du système), les variables de sortie (conséquences) et les variables d'état (comportement du système);
- les relations: c'est ce qui caractérise les interactions entre les variables;

- les paramètres: ce sont des éléments fixés qui ajustent les relations entre les variables. Ils sont déterminés à partir d'observations, et à dire d'experts;
- les constantes universelles: ce sont des valeurs fixées telles π , la constante de gravité etc.

La modélisation quant à elle est l'action de représenter un phénomène à l'aide d'un modèle. Elle répond à des objectifs particuliers et elle est mise en œuvre selon un processus spécifique.

La modélisation pour quoi faire?

Les principales motivations pour la modélisation, telles que décrites par Walliser (1977) et complétées par Thériault et Claramunt (1999) et Pouliot (1999) sont les suivantes:

- formuler un diagnostic pour mieux comprendre le fonctionnement de l'univers;
- vérifier des hypothèses sur le fonctionnement du système afin de déterminer l'importance des paramètres;
- prévoir ou prédire le comportement futur du système;
- fournir des informations aux décideurs pour éclaircir les décisions;
- assurer une représentation idéale ou souhaitable d'un système.

Ainsi dans le contexte des mouvements rocheux, les objectifs de la modélisation sont une meilleure compréhension et analyse du fonctionnement d'un versant, la reproduction et la simulation des phénomènes afin de déterminer ses conditions de propagation. Ces conditions se traduisent, entre autres, par la détermination des zones d'extension probables de cet aléa et les caractéristiques limites des trajectoires (hauteur de passage des blocs, énergie des blocs, impacts, etc.) des blocs.

Ces données sont nécessaires dans un premier temps pour déterminer si un site est menacé ou non par ce phénomène, puis dans un deuxième temps pour le dimensionnement et le positionnement des ouvrages de protection. Les modèles de propagation de mouvements rocheux sont basés sur les bilans énergétiques aux points d'impact.

Ainsi, les paramètres pris en compte pour la modélisation de ce phénomène sont de quatre types:

- les données topographiques, afin de rendre en compte en deux ou trois dimensions de la morphologie (pente, relief, profil en long et en travers) du secteur d'étude;
- les éléments du terrain (présence de dalles rocheuses, etc.) intervenant sur les échanges d'énergie lors des impacts et dans la fragmentation des blocs;
- les caractéristiques des blocs: leur forme, leur volume et leur composition qui intervient dans leur capacité à se fragmenter lors d'un choc;
- la présence d'obstacles naturels ou non sur le trajet.

La morphologie des versants intervient sur les déviations latérales des trajectoires. Plus un versant aura une morphologie irrégulière, plus ces déviations seront brutales et importantes. Dans de tel cas, l'étude de la propagation nécessitera l'emploi de modèles rendant compte du caractère tridimensionnel du phénomène. A l'opposé, un versant dont la morphologie est régulière pourra être modélisé par des profils caractéristiques. Les modèles utilisant de tels profils sont dits bidimensionnels.

Comment modéliser?

La modélisation, dans le domaine du risque en particulier, suit un processus précis (Pouliot, 1999; Jorgensen, 1999; Walliser, 1977). Il se décline selon les 6 étapes suivantes:

1. réflexion préalable pour établir le cahier des charges;
2. analyse pour déterminer le domaine de validité;
3. conceptualisation (mise en équations...);
4. transcription du modèle en langage informatique;
5. utilisation pour effectuer des simulations;
- 6 analyse critique des résultats obtenus et confrontation à la réalité

Les étapes 2 et 6 sont deux des plus importantes de ce processus. De plus, ce processus doit être impérativement régi par une démarche qualité afin de pouvoir assurer à la fois la traçabilité des outils (les modèles) utilisés, les protocoles de caractérisation des paramètres et des variables d'entrées (relevés de terrain, modalité de définition des coefficients, etc.). L'objectif de cette démarche qualité est de permettre à n'importe quel expert de pouvoir reconstruire le processus et de réaliser l'analyse critique des résultats obtenus par simulation.

Définition des objectifs de la modélisation: la raison d'être du modèle

La définition des objectifs de la modélisation doit permettre à la fois à la personne en charge des travaux de modélisation et aux utilisateurs des résultats, de pouvoir répondre aux questions suivantes:

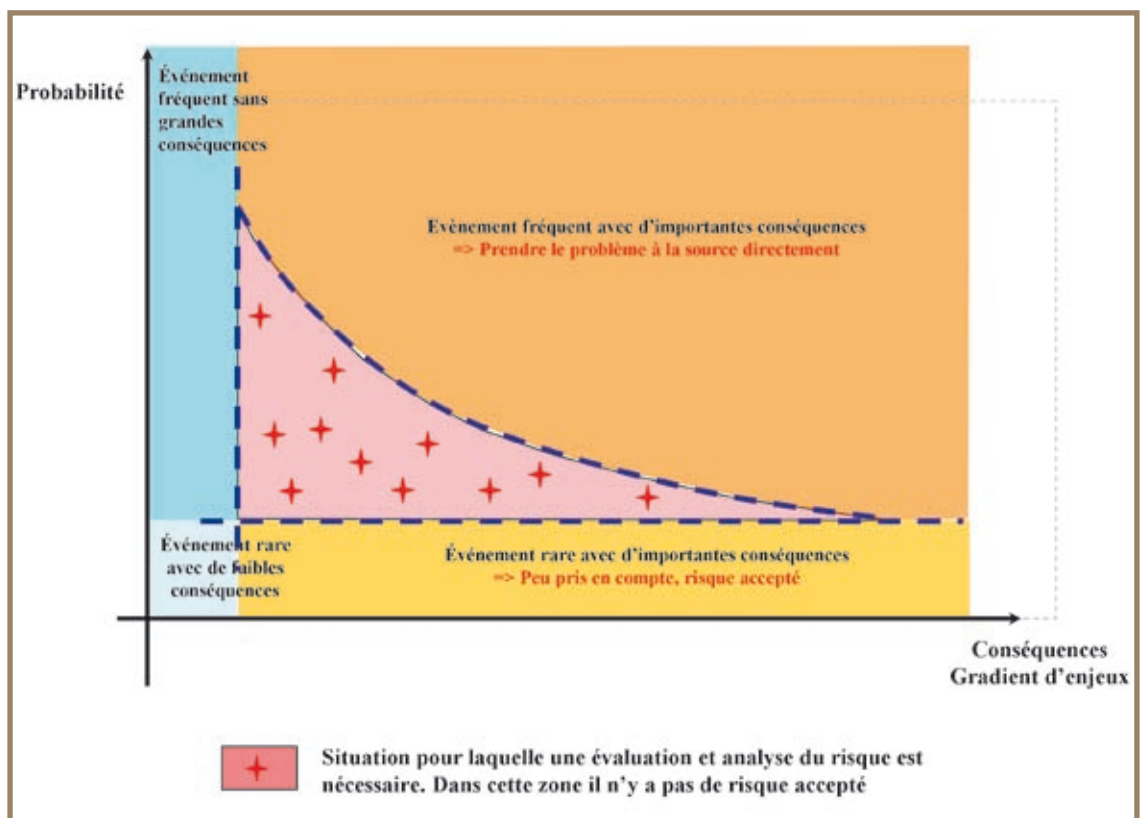
- Quel risque est analysé?
- Que souhaite-t-on déterminer (propagation, vulnérabilité, prévision, occurrence, risque maximal)?
- Avec quelle précision et résolution?
- Sous quelle forme les résultats seront ils présentés (cartes, abaques, règles de gestion...)?
- Qui utilisera la modélisation?
- Quel est le domaine de validité des résultats?

Analyse du système, pour identifier le domaine de validité du modèle

Lors de cette étape on formule les hypothèses et on détermine les variables et leurs gammes de variation. Pour Kirchsteiger (1999), l'analyse du risque consiste en l'identification des facteurs de risque, des intensités et probabilités d'occurrence associées, et en la recherche de moyens de contrôle et de diminution du risque. Pour évaluer les risques, il propose un raisonnement basé sur la probabilité et les conséquences (faible probabilité mais conséquences importantes). Une zone est ainsi déterminée où le risque doit être analysé (figure 3.1.9). Cette zone est par définition celle où l'utilisation des modèles est la plus pertinente et justifiée.

De même qu'on n'effectue pas une analyse systématique de tous les risques, on ne cherche pas, car cela est actuellement impossible en fonction de niveau actuel des connaissances scientifiques, en modélisation

Figure 3.1.9 Condition d'analyse du risque, adapté de Kirchsteiger, (1999)



à reproduire toutes les situations possibles. A ce titre, la modélisation n'est qu'une représentation simplifiée et limitée du réel. Dans ce contexte, un modèle a donc un domaine de validité qu'il est important de définir. Ce domaine peut être déterminé en fonction des objectifs de la modélisation.

Prenons l'exemple des chutes de blocs. Si l'on souhaite estimer le risque d'atteinte d'une zone par un bloc, le modèle développé devra permettre de prendre en compte un volume de bloc compris dans un intervalle spécifié. Il ne sera pas adapté par exemple à l'étude des éboulements. Un des domaines de validité de ce modèle sera donc le volume des blocs considérés.

Conception des modèles

Une fois les objectifs de la modélisation fixés et le domaine de validité déterminé, on peut initier la phase de construction du modèle. Cette étape consiste à bâtir une représentation abstraite du système, du phénomène étudié. C'est la conceptualisation. Le choix de cette représentation est guidé par les objectifs auxquels doit répondre la modélisation. Une même réalité peut être assimilée à des représentations différentes. Prenons l'exemple d'une forêt, et en particulier d'une forêt à rôle de protection vis-à-vis des risques naturels. Pour le risque de crue, le couvert arboré (la canopée) intervient directement sur la quantité d'eau qui atteindra le sol. En modélisation, on représentera donc la forêt par la surface couverte par son feuillage. Tandis que pour le risque chutes de blocs, la position des arbres, leur répartition et leurs caractéristiques dendrométriques sont les paramètres qui interviennent sur la trajectoire des blocs. La forêt peut donc être représentée a priori comme un ensemble de points avec des données attributaires et/ou par un coefficient de dissipation d'énergie.

On identifie des variables et on fixe donc les paramètres qui régissent les interactions que l'on souhaite étudier. L'analyse de la cohérence interne du modèle intervient à ce niveau de conception.

Implantation sur une plateforme adaptée

Cette phase du processus de modélisation permet de traduire le modèle dans un langage de programmation. Elle comprend aussi l'acquisition de données à intégrer dans le modèle pour le tester et le calibrer.

Utilisation et analyse des résultats de la modélisation

Dernière étape du processus, le modèle est exploité. On effectue alors des simulations. Si bien souvent simulation et modélisation sont confondues, il existe une nuance entre ces deux termes. La simulation est l'utilisation du modèle pour comprendre l'influence et les variations des caractéristiques du système (Pouliot, 1999; Hill, 1993). Les résultats de la simulation apportent finalement une meilleure compréhension du système. Cette dernière étape n'est valide que si les résultats des travaux de simulations sont comparés à un jeu de données tests. Dans le domaine des risques naturels, ces données tests correspondent à des phénomènes passés parfaitement documentés. Cela signifie, que ce jeu de données contient la valeur de tous les paramètres, de toutes les données d'entrées nécessaires aux travaux de simulation ainsi que des informations permettant de calculer certains ou la totalité des données cinématiques et la cartographie de l'extension réelle du phénomène à la date d'observation. Ce n'est qu'avec de telles données que l'on peut prétendre analyser la validité et la robustesse du ou des travaux de simulations.

Les 6 étapes de processus de modélisation présentées sont bien distinctes, mais elles ne sont pas cloisonnées. De nombreuses passerelles se dessinent entre les étapes au cours du processus. Par exemple les résultats obtenus après simulations peuvent révéler des incohérences ou générer d'autres besoins, il sera alors nécessaire de revenir aux étapes précédentes.

Conclusion

Dans le domaine de l'analyse du risque, la modélisation présente l'avantage de caractériser l'influence de certains paramètres sans avoir systématiquement recours à des expériences grandeur nature qui pourraient s'avérer dangereuses, et de pouvoir proposer une cartographie exhaustive à l'échelle d'un territoire permettant de compléter les données historiques. Ce dernier point est essentiel. En effet, dans cadre de la protection des biens et des personnes, l'utilisation d'outils de simulation permet d'optimiser les actions

de prévention en proposant une anticipation des évènements. Toutefois, si l'utilisation de modèles peut enrichir les connaissances, il ne reste pas moins essentiel de conserver les dires d'experts. Nous avons mis en avant que le processus de modélisation ne consiste pas uniquement en la réalisation de simulations. Il faut aussi savoir quelles sont les limites de validité des modèles utilisés et la démarche employée pour réaliser en particulier l'abstraction du système. L'interprétation des résultats dépend également du processus de modélisation qui a été mis en œuvre. De même, tout au long de ce processus il est important de connaître la disponibilité et la précision des données. Guzzetti et Carrara (1999) soulignent par exemple que les résultats de simulations obtenus avec des données d'une trop grande précision ne correspondent finalement pas à une réalité. Les modèles utilisés sont adaptés à des données, dont la précision est fixée lors du processus de modélisation. L'utilisation de données non adaptées peut générer des erreurs d'interprétation des résultats. Prenons le cas d'un modèle en hydrologie par exemple, qui calcule des hauteurs d'une précision centimétrique. Si l'utilisateur dispose d'un modèle numérique de terrain avec un pas de 250 m, les résultats du modèle au centimètre ne seront très vraisemblablement pas valables dans des zones très accidentées.

Ainsi, en matière de gestion de risque, la modélisation améliore la compréhension des phénomènes et permet de limiter les phases de terrain coûteuses et qui peuvent parfois s'avérer dangereuses. Dans un objectif d'affichage du risque, l'apport des modèles est encore plus intéressant lorsqu'ils sont utilisés conjointement avec des systèmes de représentation des informations spatialisées tels que peuvent proposer les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG). Cependant, la connaissance du type de modèle utilisé et de ses limites est primordiale pour l'analyse des résultats. Le choix du type de modèle est déterminé par la disponibilité des données et des connaissances sur le risque étudié. Il serait toutefois dangereux d'affirmer que la modélisation se suffit à elle-même et que l'on peut s'affranchir complètement des observations in situ. Elle complète l'avis d'experts mais ne le remplace pas. Tous les modèles utilisés pour représenter les divers risques naturels, qu'ils soient déterministes ou stochastiques, ne proposent que des représentations simplifiées des conditions réelles (Carrara *et al.*, 1999).

3.1.3 Les objectifs des chapitres sur le génie biologique pare pierre de cet ouvrage

Les éboulements rocheux sont les conséquences des effets de la pesanteur et de l'altération des roches. L'importance de ces phénomènes, pour un site donné, est fonction de la masse mise en jeu, de sa nature, de la morphologie du terrain et des éléments rencontrés lors de sa propagation. Tout élément qui augmente la dissipation d'énergie des volumes en mouvement va limiter, voire arrêter, la propagation de ces phénomènes. Mais, compte tenu des forces développées, il est illusoire de vouloir enrayer la propagation d'un phénomène dont le volume est supérieur à 10^5 m³. Le caractère aléatoire de la rupture fait que la modélisation de ce phénomène concerne essentiellement sa propagation. Elle permet ainsi de déterminer les caractéristiques des trajectoires.

La fréquence des arbres blessés sur les zones forestières soumises aux phénomènes de chutes de pierres, montre indéniablement le rôle d'obstacle joué par la forêt. Jusqu'en 2003, il était difficile de quantifier et de qualifier l'action d'un peuplement forestier sur la chute d'un bloc faute d'informations fiables sur la capacité de dissipation des arbres. A cette date, des avancées scientifiques significatives ont été réalisées dans ce domaine (Berger, 2004). La connaissance dont on dispose maintenant sur le rôle des peuplements forestiers permet:

- d'une part d'optimiser la gestion de ces forêts en vue d'obtenir le peuplement le plus protecteur;
- d'autre part d'intégrer le rôle actuel de la végétation lors du dimensionnement des ouvrages de protection de génie civil (filet, tunnel, etc.).

La vocation général des chapitres de cet ouvrage relatifs au génie biologique pare pierre est de donner les éléments de diagnostics nécessaires à l'identification et à la gestion des peuplements forestiers à fonction de protection vis-à-vis des chutes de pierres.

Dans ces chapitres le lecteur trouvera des informations sur les principales étapes nécessaires à la réalisation de ces deux actions (identification et gestion des peuplements forestiers).

Ces étapes sont les suivantes:

- Localiser les zones de départ des projectiles.
 - Cartographier les zones de propagation des projectiles.
 - Quantifier l'aléa dans la zone de propagation en faisant abstraction de la végétation forestière présente:
 - fréquence de passage;
 - hauteurs de passage;
 - vitesse de passage.
 - Décrire les peuplements forestiers présents.
 - Quantifier l'aléa dans la zone de propagation en présence de la végétation forestière actuelle:
 - fréquence de passage;
 - hauteurs de passage;
 - vitesse de passage.
- Quantifier la protection offerte par les peuplements forestiers par comparaison des travaux de quantification de l'aléa avec et sans forêt.
- Définir, hiérarchiser et prioriser les interventions forestières nécessaire à la pérennisation et l'amélioration de la protection offerte par les peuplements forestiers.
 - Afficher et communiquer les résultats pour une meilleure prévention par l'affichage du risque.

A ce titre cet ouvrage s'adresse aussi bien au gestionnaire forestier qu'au gestionnaire des voies de communication et à celui en charge de la politique de la prévention des risques naturels. Chacun y trouvera des informations et des outils lui permettant de mieux intégrer, dans ses objectifs de gestion, et à sa juste valeur le génie biologique pare pierre. L'objectif général étant une meilleure valorisation du patrimoine forestier actuellement présent sur les versants et éviter aux gestionnaires de courir derrière l'urgence en cas de disparition du couvert forestier.

3.2 PRINCIPE DE LOCALISATION DU RISQUE DE CHUTES DE PIERRES

Frédéric Berger, Luuk Dorren - Cemagref

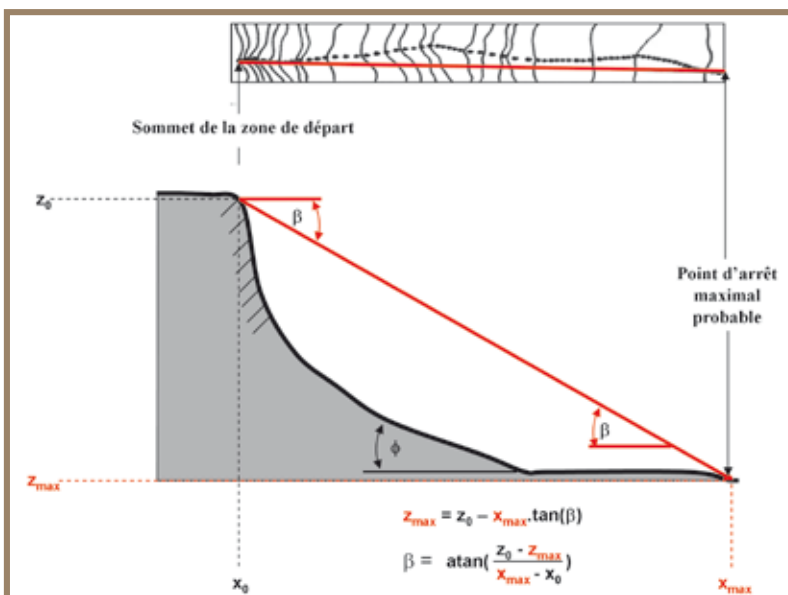
Afin d'établir une modélisation du phénomène, il est nécessaire de déterminer les paramètres qui influent sur la trajectoire. Le phénomène global peut se ramener à un ensemble formé par le bloc et le terrain sur lequel il y a des obstacles (ouvrages de génie civil, forêt ou infrastructure le cas échéant). La nature des rebonds est fonction de la topographie, de la nature du sol ou des obstacles et de la nature du bloc (Couvreur, 1982). La liste suivante présente les paramètres qui influent la trajectoire d'une chute de pierres (d'après Labiouse et Descoedres, 1999):

- Le bloc:
 - sa forme;
 - le type de roche (masse volumique et fragilité).
- La zone de départ:
 - hauteur;
 - type de zone de départ (falaise, éboulis, etc.);
 - fréquence de chute et probabilité.
- Le terrain le long de la trajectoire:
 - sa forme;
 - les types de matériaux.
- Les obstacles:
 - les ouvrages de protection de génie civil (filets, merlons, etc.);
 - la forêt (densité, répartition spatiale, répartition des diamètres, essences présentes, etc.);
 - la végétation basse (taillis, arbustes, etc.);
 - infrastructures éventuelles (routes, habitat, etc.);
 - naturelles (blocs, troncs d'arbres).

Une fois les paramètres déterminés, il convient d'estimer leur possible intégration dans des modèles. Pouliot (1999) précise que le niveau d'abstraction de l'ensemble des paramètres identifiés est relié à:

- la représentation conceptuelle du système;
- la mesure que l'on peut en faire (réalité observable);
- la représentation numérique de l'information du système.

Figure 3.2.1
Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β



Nous allons maintenant présenter les principaux types de modèles utilisés pour la simulation des chutes de pierres.

3.2.1 Le modèle de la ligne d'énergie

Le modèle de simulation de chutes de pierres numérique le plus simple est un modèle dit statistique qui ne nécessite pas à proprement parlé de détermination des coefficients de réponse des sols. Ce modèle est basé sur le principe de la ligne d'énergie, principe similaire çà celui utilisé pour l'élaboration du modèle statistique norvégien pour les avalanches. Cette méthode développée par Heim en 1932 repose sur un principe simple et trivial: un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment

raide. Ainsi, si la pente est supérieure à un angle limite β , il accélère. Si elle est inférieure à β , il ralentit. En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontal (figure 3.2.1). Cette

ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

A partir du profil en long de la pente à partir d'une zone de départ, on peut alors, si on connaît la valeur de l'angle β , déterminer le point maximal probable qu'atteindra tout projectile qui se détachera de la zone de départ.

Compte tenu de la possibilité de déviation des trajectoires des blocs que ce soit à cause de leur forme ou des obstacles rencontrés, ils peuvent donc progresser dans un cône, appelé cône de propagation. Ce cône a une pente β et son sommet est placé au niveau de la zone de départ A.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la détermination de l'angle β . Le **tableau 3.2.1** donne ces valeurs.

Auteurs	Valeur de l'angle de la ligne d'énergie
Hsü, 1975	31°
Moser, 1986	33°- 42°
Meissl, 1986	33° - 35°
Grunder, 1984	32.6°- 33.4°
Onofri et Candian, 1979	28.34°- 40.73°
Domaas, 1985	32°
Gerber, 1994	33°- 37°

Tableau 3.2.1 Valeurs de l'angle β suivant différents auteurs

Type de projectile	Valeur de l'angle de la ligne d'énergie et rugosité du sol		
	33° et faible rugosité	35° et rugosité moyenne	37° et forte rugosité
Pierre (inférieure au dm ³)	Prairie	Broussaille	Arbres
	Pas d'irrégularités	Petites irrégularités	Grosses irrégularités
	Sol superficiel	Sol superficiel	Sol profond
1 dm ³ < Pierre-Bloc < 1 m ³	Broussaille	Arbres	
	Petites irrégularités	Grosses irrégularités	
	Sol superficiel	Sol profond	
Bloc > 1 m ³	Arbres		
	Grosses irrégularités		
	Sol profond		

Tableau 3.2.2 Valeurs de l'angle β en fonction de la rugosité du sol et de la dimension des projectiles (Gerber 1994 et d'après Meissl 1998)

La bibliographie indique des valeurs de β variant de 28° à 37°. Cependant, les études de Gerber (1994) et de Meissl (1988) préconisent de déterminer la valeur de cet angle en tenant compte de la dimension des projectiles et de la rugosité du sol (**tableau 3.2.2**).

Nous proposons d'utiliser un angle β de 32° au minimum. Cette valeur a été choisie d'après les expériences grandeur nature de chutes de blocs du Cemagref sur le site de Vaujany (Isère) (Dorren *et al.*, 2005). Ces expériences ont consistés à des lâchers de blocs sur un site non boisé (dit à terrain nu) et sur un site boisé. Les deux sites ont la même valeur de pente.

La valeur de 32° correspond à celle de l'angle de la ligne d'énergie pour le bloc étant allé le plus loin sur le site à terrain nu. Pour le site boisé, la valeur de cet angle est de 38°. On obtient donc un intervalle variant de 32° à 38°.

Cette valeur de 32° a été testée et validée sur les sites tests du Trièves, du Grésivaudan, de la Maurienne et de la vallée de Chamonix. Par rapport à la valeur de minimale de 33° citée par 4 auteurs sur 7 du **tableau 3.2.2**, la valeur de 32° se traduit par une distance d'arrêt plus longue.

Le modèle de la ligne d'énergie permet également de calculer la vitesse des blocs à partir de la différence

de hauteur h entre la ligne d'énergie et le profil. La formule de calcul est la suivante:

$$V = (2 \cdot g \cdot h)^{1/2} \quad (g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}) \quad (3.2.1)$$

Il existe une vitesse maximum que le bloc ne peut pas dépasser. D'après Dorren *et al.* (2005), cette vitesse maximum (m/s) est calculée selon la formule suivante:

$$V_{\max} = 0.8 \cdot \text{pente} \quad (\text{pente en degrés}) \quad (3.2.2)$$

En ce qui concerne la valeur de l'angle du cône de déviation, celle-ci dépend de la configuration topographique du versant étudié. La valeur la plus communément utilisée est de 30°. Nous proposons d'utiliser un facteur de sécurité et d'utiliser la valeur de 35°.

Ce principe de la ligne d'énergie peut être utilisé pour développer une application sous environnement SIG afin d'automatiser la procédure de calcul des points d'arrêt maximal probable et des cônes de déviation. Cette application n'a pas encore été réalisée, mais l'opérateur peut développer une feuille de calcul dans un tableur de type Excel pour calculer le point d'intersection entre la ligne d'énergie et le profil en long du versant. La formule pour tracer la ligne d'énergie sur le profil en long du transect choisi par l'opérateur est:

$$Z = Z_0 - 0.62 \cdot (x - x_0) \tag{3.2.3}$$

avec:

Z altitude pour l'abscisse x

Z_0 altitude du point de départ maximal (sommet de falaise)

x abscisse du point pour lequel le calcul est réalisé

x_0 abscisse du point de départ maximal

$x - x_0$ distance planimétrique séparant le point de calcul du sommet de la falaise

0.62 est la tangente de l'angle β égal à 32°

La **figure 3.2.2** illustre l'utilisation de cette formule pour estimer graphiquement le point d'arrêt maximal probable.

La **figure 3.2.3** présente un récapitulatif des étapes à réaliser pour obtenir la carte de pré-zonage des points d'arrêt maximal probable pour les chutes de pierres et de blocs.

Etant donné que ce modèle ne permet de déterminer que le point d'arrêt maximal, il ne peut être considéré comme un logiciels de trajectographie.

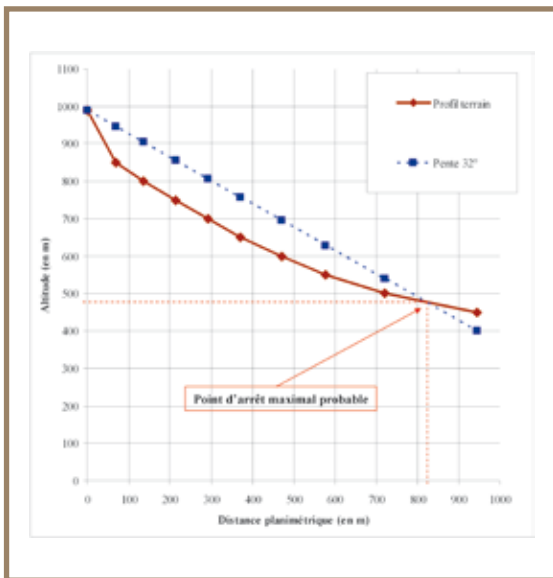


Figure 3.2.2 Illustration graphique de l'emploi de la formule de la ligne d'énergie

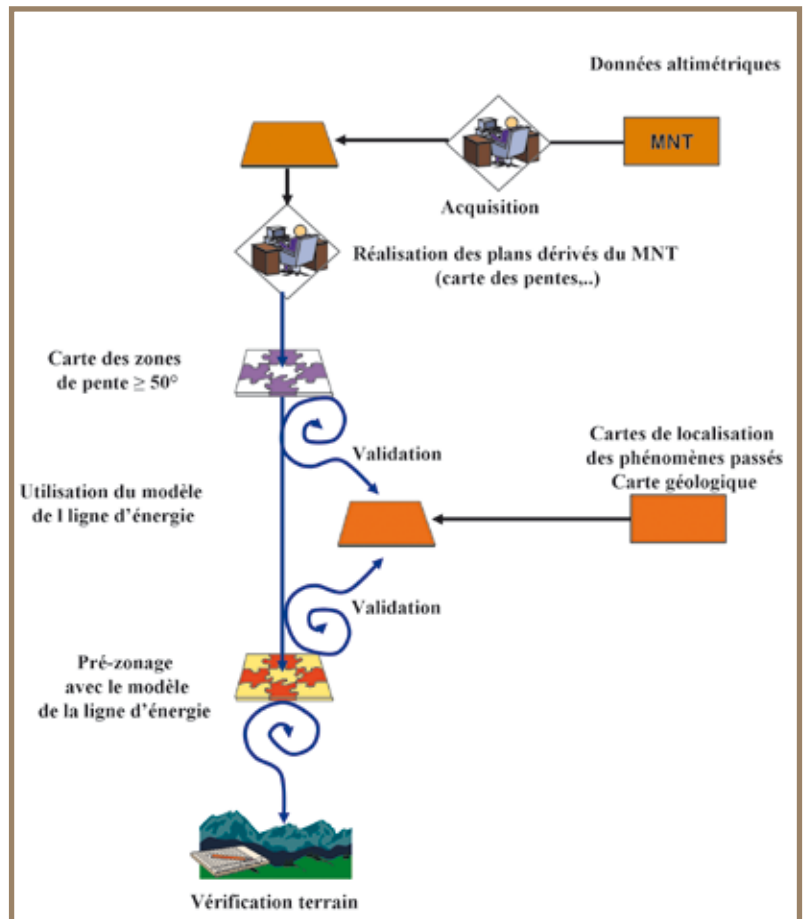


Figure 3.2.3 Schéma méthodologique à mettre en œuvre pour réaliser la carte de pré-zonage des points d'arrêt maximal probable des chutes de pierres et de blocs avec le modèle de la ligne d'énergie

3.2.2 Les logiciels de trajectographie

En plus de ce modèle de ligne d'énergie, de nombreux logiciels de trajectographie sont développés. Nous avons décidé de ne pas en dresser l'inventaire car d'autres auteurs se sont attelés à cette tâche (Guzzetti, 2002; Dorren, 2003; Heidenreich, 2004). Par contre nous allons nous intéresser au mode d'intégration de l'ensemble des paramètres et proposer des critères de classification de ces modèles.

L'objectif de l'ensemble des modèles de trajectographie est de déterminer:

- les trajectoires potentielles des blocs;
- la hauteur des rebonds, les vitesses et les énergies le long de la trajectoire;
- la distance maximale de parcours pour identifier les zones à risque.

Etant donné la diversité des modèles les plus souvent cités (Ritchie, 1963; Cundall, 1971; Piteau et Clayton, 1976; Azimi *et al.*, 1982; Falcetta, 1985; Bozzolo et Pamini, 1986; Rochet, 1987; Descoeudres et Zimmerman, 1987; Hungr et Evans, 1988; Pfeiffer et Bowen, 1989; Kobayashi *et al.*, 1990; Zinggeler, 1990; Azzoni *et al.*, 1995; Spang et Sönser, 1995; Leroi *et al.*, 1996; Jones *et al.*, 2000; Guzzetti, 2002; Agliardi F. et Crosta G.B., 2003; Dorren *et al.*, 2004; Dorren *et al.*, 2006), nous proposons une typologie basée sur trois critères de classification. Pour chaque critère les inconvénients et avantages des différentes approches sont précisés.

Le premier critère porte sur la nature de l'approche employée dans le calcul de trajectoire. Il existe de nombreuses typologies de modèles qui correspondent à des approches en modélisation (Casti, 1998; Pouliot, 1999; Jorgensen, 1999). Les mouvements de terrain et en particulier les chutes de blocs, sont contrôlés par des lois mécaniques. Ces lois peuvent être déterminées empiriquement, statistiquement ou de manière déterministe (Guzzetti et Carrara, 1999). Kirchsteiger (1999) propose 2 approches possibles des systèmes (probabiliste et déterministe).

Les modèles déterministes

Le déterminisme est un "principe scientifique suivant lequel les conditions d'existence d'un phénomène sont déterminées, fixées absolument de telle façon que ces conditions étant posées, le phénomène ne peut pas ne pas se produire" (Le Nouveau Petit Robert, 1993). Ainsi, un système déterministe est un système dont le comportement est prévisible. Il suit des lois connues et on peut donner l'état de chaque composant du système à tout instant (Kirchsteiger, 1999). L'approche déterministe a d'autres noms: approche physique ou mécanique.

L'idée de base est qu'on peut reproduire la réalité avec un modèle déterministe sous 2 conditions:

- la connaissance du phénomène est suffisante pour le traduire par des lois, des relations, des équations toutes vérifiables;
- le milieu dans lequel ce phénomène se produit est connu et peut être pris en compte de manière satisfaisante dans la modélisation.

On mesure des paramètres pour caler des lois et on les valide par modélisation. Les modèles déterministes sont donc représentés par des fonctions mathématiques continues et des seuils de changement d'état ou de comportement (Thériault et Claramunt, 1999). Ils supposent des relations biunivoques entre les variables d'entrée et sortie. Ainsi pour un ensemble de données d'entrée, il existe un ensemble de données de sortie prédéterminées. Ces modèles sont essentiellement déductifs (Pouliot, 1999). Les données en entrée sont principalement descriptives de l'état (Kirchsteiger, 1999). Les modèles déterministes sont particulièrement utiles pour décrire les transformations élémentaires des milieux naturels (Thériault et Claramunt, 1999).

Cependant, cette voie déterministe, qui consiste à acquérir la connaissance de la réalité puis à la modéliser, est parfois très contraignante. Elle nécessite une bonne connaissance du terrain pour fixer les valeurs (Gomez-Fernandez, 2000). Seulement, peu de processus en sciences de la Terre sont suffisamment maîtrisés pour

que l'on puisse appliquer des modèles déterministes (Isaaks et Srivastava, 1989). Bien que la physique de nombreux processus fondamentaux soit connue, c'est le résultat final qui nous intéresse. Celui-ci dépend d'une multiplicité de processus fondamentaux. Kirchsteiger (1999) prévient qu'il n'y a pas de prise en compte explicite des différentes incertitudes dans l'analyse déterministe du risque. On ne connaît pas l'importance relative des critères sur le résultat d'analyse par rapport à l'ensemble des paramètres.

Les modèles probabilistes

Le probabilisme est une théorie qui fait intervenir les probabilités. C'est un degré d'incertitude dans la prédiction de son comportement qui rend un système probabiliste (Kirchsteiger, 1999). Par conséquent, on obtient un résultat avec un intervalle qui peut induire parfois un choix.

Les modèles probabilistes, ou encore stochastiques, s'appuient sur ce concept du probabilisme. Ils admettent que la distribution du phénomène étudié obéit à une distribution probabiliste connue et reproductible. Les modèles stochastiques incorporent souvent dans leur formulation une variable dite aléatoire. Ces modèles s'appuient par exemple sur les probabilités conditionnelles, les ensembles flous, le maximum de vraisemblance, l'autocorrélation, l'interpolation, etc. Leur usage est intéressant lorsque l'influence de facteurs aléatoires est si importante sur le système que les relations entre les variables d'entrée et de sortie ne peuvent être exprimées que par des lois probabilistes (Pouliot, 1999; Thériault et Claramunt, 1999). Ces facteurs aléatoires prennent des valeurs dans des intervalles bornés.

Cette théorie des probabilités est un outil pour reconstruire la réalité, lorsque les connaissances valides sur les conditions initiales d'une séquence d'événements dans le temps sont incomplètes (Kirchsteiger, 1999). Elle permet de s'affranchir de la contrainte des observations systématiques de l'approche déterministe. En décrivant les états de systèmes probabilistes avec des nombres probabilistes, on utilise des connaissances passées pour prédire des états futurs. L'utilisation de probabilités permet de prendre en compte plusieurs paramètres plus ou moins déterminés. Ce point est important en particulier dans le domaine des chutes de blocs où les données telles le point de départ, la forme du bloc ou les interactions ne sont pas systématiquement exactement bien connues (Agliardi et Crosta, 2003; Gomez-Fernandez, 2000). L'approche probabiliste est donc fondamentale dans la modélisation des chutes de blocs pour Agliardi et Crosta (2003 voir aussi Crosta et Agliardi, 2004). Cependant, son utilisation et les résultats dépendent de la caractérisation disponible pour chaque variable concernée.

L'utilisation des probabilités permet aussi de voir des événements a priori inattendus et de mettre en évidence des situations a priori imprévisibles. La théorie des probabilités est le seul outil pour cartographier l'imprévisible (Agliardi et Crosta, 2003; Kirchsteiger, 1999).

Les modèles statistiques sont très sensibles aux erreurs d'observations et en particulier aux erreurs systématiques. L'influence de ces erreurs sur les résultats de simulations est difficilement quantifiable avec ces modèles. Les résultats aberrants ne sont pas mis en évidence. Enfin, un modèle statistique qui a été calé par des données sur une région n'est pas extrapolable tel quel à une autre région. Il faut réajuster les lois sur des observations de la nouvelle région (Guzzetti et Carrara, 1999).

Environ les trois quarts des logiciels de simulation des chutes de pierres ont une approche probabiliste.

Le deuxième critère caractérise le mode d'intégration du terrain; soit en profil de pente (2D) ou un modèle numérique de terrain (MNT) en 3D. Le plupart des modèles utilisent la profil de pente (~20% des modèles). Les avantages sont la rapidité du temps de calcul et la facilité de numériser la topographie du terrain. En 3D, les temps de calculs sont plus long et souvent même très long. De plus, les données sont plus difficiles à obtenir, encore qu'à l'heure actuelle, la disponibilité des MNT augmente. Les avantages des modèles 3D sont la prise en compte des déviations latérales, la représentation fidèle des terrains complexes et la possibilité de représenter des phénomènes régionalisés. Les trois dernier caractéristiques ne compte pas pour les modèles 2D.

La prise en compte de la forme du bloc est le troisième critère (**tableau 3.2.3**).

	Masse concentrée	Méthode rigoureuse	Méthode hybride
Définitions	Le bloc est ramené à un point mathématique auquel on affecte une masse	La forme et le volume du bloc sont pris en compte	Bloc = un point mathématique mais on lui affecte des coefficients d'élanement, de forme, etc.
Avantages	+ Facilité et rapidité de calcul, en particulier pour détecter les rebonds	+ La rotation du bloc au cours de la chute est prise en compte	+ Facilité et rapidité de calcul
		+ Tous les mouvements, dont le roulement sont considérés	+ Peut reproduire le roulement
Inconvénients	- Le mouvement de rotation du bloc ne peut pas être pris en compte (donc pas de roulement)	- Temps de calcul plus longs	- Incertitude sur la détermination du coefficient d'élanement
	- Les changements de trajectoires dus à des formes particulières ne peuvent être considérés		

Tableau 3.2.3 Synthèse des principaux types de méthode de modélisation

En plus de la forme du bloc, certains programmes intègrent aussi la fragmentation éventuelle. Si cet aspect a un intérêt certain, nous pouvons noter que si on ne prend pas en compte ce paramètre, on se place dans l'hypothèse du risque maximal.

Pour calculer les rebonds, la majorité des modèles utilisent 2 coefficients de restitution:

- le coefficient de restitution normal (perpendiculaire par rapport à la pente), qui représente l'élasticité du sol;
- le coefficient de restitution tangentiel (parallèle à la pente), qui représente la rugosité du sol.

Ces coefficients relient les vitesses ou les énergies avant et après l'impact avec le sol. Ils sont fonction du type de sol. Heidenreich (2004) explique que ces coefficients sont un amalgame entre la nature du sol et la forme du bloc. Une de ses propositions est d'améliorer la prise en compte de la forme du bloc dans les logiciels de trajectographie et de dissocier clairement dans le calcul la forme du bloc du coefficient de sol. La différence entre les modèles se situe sur la prise en compte d'un nombre plus ou moins important de type de sol. Certains modèles ajoutent un coefficient de friction pour d'une part prendre en compte le phénomène de glissement, et d'autres par modéliser l'éventuelle présence de végétation. Si des arbres sont présents sur la zone considérée, le coefficient de friction est augmenté.

Peu de logiciels considèrent la présence de la végétation. Nous pouvons aisément comprendre la difficulté pour représenter par le biais d'un seul coefficient de friction, la variabilité de l'implantation spatiale des arbres au sein d'un peuplement et la diversité des essences. Perret et al. (2004) présentent le résultat de simulations de chutes de blocs avec un logiciel 2D (Zinggler, 1990) qui prend en compte la forêt sous forme d'un coefficient. Les paramètres ont été calés sur des relevés précis des impacts d'un bloc. Si les résultats des simulations, obtenus pour ce cas précis, sont cohérents avec les observations, ils ne permettent pas d'établir l'influence de la répartition spatiale des arbres.

3.2.3 Synthèse sur les avantages et limites des modèles

Les modèles de trajectographie, à l'exception de Rockyfor (Dorren, 2003), n'ont a priori pas pour vocation première de prendre en compte le rôle de protection des peuplements forestiers. La majorité représente le terrain par un profil de pente. L'unique moyen de modéliser la forêt est alors d'augmenter le coefficient de friction. Ce qui n'est pas satisfaisant, comme nous venons de l'expliquer. Pour les logiciels de calcul

probabilistes, les lois ont été calées sur des observations post-événementielles. Les renseignements issus de ces observations portent sur les distances d'arrêt et les zones de départ. L'estimation des coefficients de sol dépend de l'expert qui utilise les modèles. Les conclusions de Berger (2004) mettent en évidence une importante variabilité des résultats en fonction des modèles sur un même site, pour les données cinématique et de hauteur de passage.

Pour les logiciels de calcul déterministes, quelques expériences in situ ont été réalisées pour estimer les coefficients de restitution (Ritchie, 1963; Broilli, 1974; Bozzolo et Pamini, 1986; Gerber, 1995; Azzoni et al., 1995; Chau et al. 2002; Dorren et al. 2006). Mais peu d'expériences permettent d'obtenir le long de la trajectoire l'ensemble des données sur les vitesses et les rebonds. Enfin, comme le souligne (Heidenreich, 2004), la forme du bloc mérite d'être prise en compte de manière significative dans les modèles, étant donné qu'elle influence la trajectoire.

3.2.4 L'apport du LIDAR pour la modélisation des chutes de pierres et de blocs rocheux

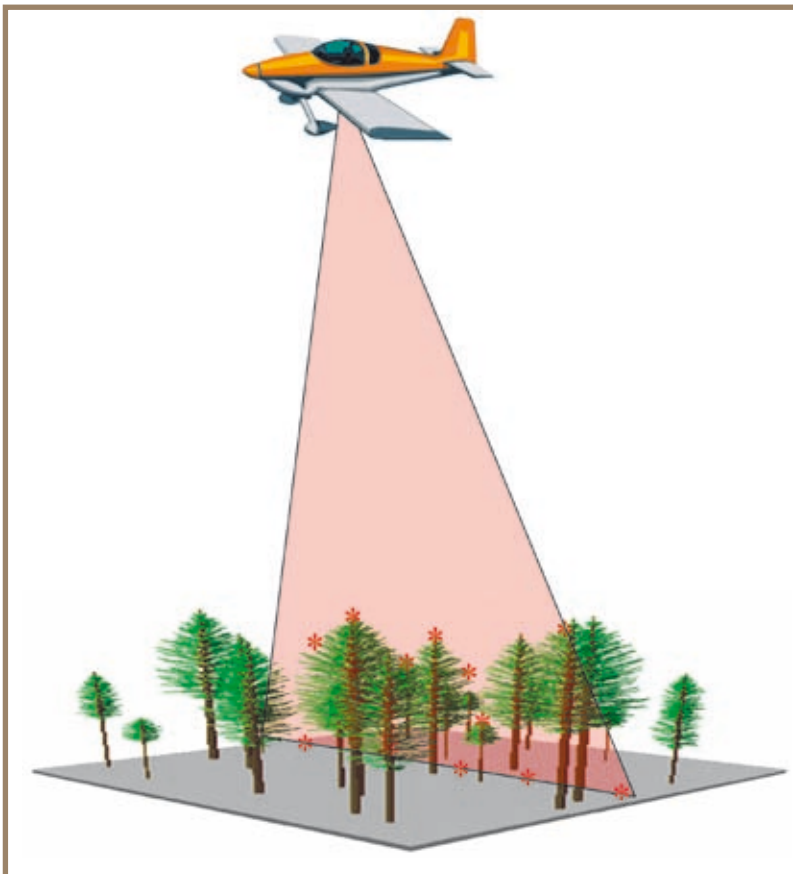


Figure 3.2.4 Balayage laser à partir d'un avion

L'utilisation de modèles de simulation de propagation de chutes de blocs nécessite de disposer d'une représentation numérique de la topographie la plus réaliste possible, de disposer d'informations sur l'occupation des sols et, en fonction des modèles, d'une description des peuplements forestiers. Pour une zone d'étude donnée, la construction du modèle numérique de terrain associé peut se faire soit en achetant des données auprès des instituts géographiques nationaux des pays dans lesquels sont situés les secteurs d'études, soit par photogrammétrie, soit par un levé de terrain. Ces trois techniques fournissent des modèles numériques de terrain (MNT) avec des résolutions et des précisions différentes, le maillage des points variant d'un point tous les 50 m pour l'IGN en France à un point tous les mètres (voire moins) pour les autres techniques.

Depuis les années 90, une nouvelle technique est apparue: le Laser-scan aérien aussi dénommée LIDAR (*Light Detection And Ranging*). Le Laser-scan aérien est une technique récente d'acquisition de données topographiques qui se développe de plus en plus compte tenu des progrès techniques réalisés dans les domaines des lasers et du GPS. Le

principe général de cette méthode repose sur la mesure du temps de parcours d'une impulsion lumineuse entre la source émettrice (l'avion dans lequel est embarqué le laser) et la surface interceptée. Pour chacun des points de mesure, le faisceau laser effectue un balayage latéral. Ainsi, compte tenu de la direction du vol et de ce balayage latéral, une grande surface de territoire est couverte en un passage (**figure 3.2.4**).

Les différences de temps de parcours de l'impulsion lumineuse (les échos lumineux) sont utilisées pour générer deux types de modèle numérique:

- le modèle numérique de terrain (MNT) à proprement parler en ne conservant que les derniers échos;
- le modèle numérique dit de surface (MNS) en ne conservant que les premiers échos.

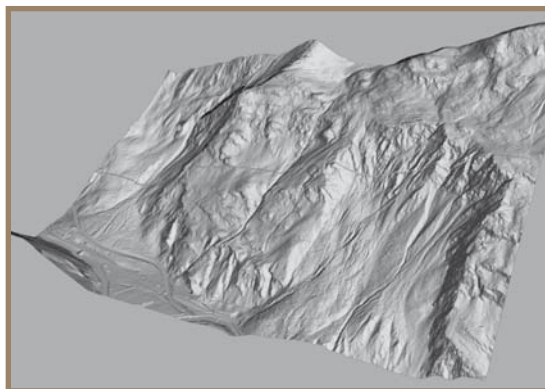
Cette technique permet ainsi de réaliser, selon le laser embarqué, des MNT à raison de 1 à 10 points par m² et avec une précision verticale pouvant être de 10 cm en fonction de la configuration du site.

Les premiers tests réalisés ont montré que les données laser comprennent toujours des points bas sous le niveau du sol. Le filtrage préalable de ces points bas erronés est préférable avant de lancer la procédure de calcul du MNT. Le couvert forestier et la présence de strates basses de végétation, en empêchant une grande proportion d'impulsions laser de parvenir jusqu'au sol dégrade la précision des MNT dans les zones forestières. La précision du MNT va varier selon la densité des points, la nature du couvert, le relief, l'angle de scannage (Hyypä *et al.*, 2000, 2005).

Les erreurs moyennes sur l'altitude rapportées dans la bibliographie (Reutebuch *et al.*, 2003) sont généralement comprises entre 10 et 50 cm. La densité du couvert végétal joue un rôle important. L'erreur moyenne varie de 14 cm pour des coupes rases et des peuplements de conifères fortement éclaircis, à 18 cm dans les peuplements faiblement éclaircis et atteignant 29 cm pour les peuplements denses. Dans certaines forêts denses des erreurs très localisées pouvant aller jusqu'à 20 m ont cependant été reportées.

Pour générer un MNT il est nécessaire de connaître, avec la plus grande précision possible, l'angle de balayage utilisé, ainsi que la position et l'altitude de l'avion. Ces deux derniers paramètres, sont obtenu grâce au GPS embarqué et à la centrale inertielle de l'avion.

Figure 3.2.5 Exemple de MNT au pas de 1 m obtenu par traitement de données LIDAR



Le grand nombre de points de mesure utilisé ainsi que leur distribution régulière font que cette technique se distingue des autres techniques classiques. Elle présente l'avantage de pouvoir acquérir en une seule fois une masse d'information considérable sur l'orographie, et ce avec une maille de mesure constante. Le MNT ainsi obtenu couvre une vaste surface avec une précision et résolution bien meilleure que celles des MNT du commerce (figure 3.2.5).

3.2.5 Conclusion

La chute de bloc est un processus qui est étudié et connu, bien qu'il reste des indéterminations concernant les zones de départ et les coefficients de restitution. En ce qui concerne la forêt, le rôle de protection offert est reconnu empiriquement dans la majorité des modèles dotés d'un module forestier, mais au sein de la majorité d'entre eux des incertitudes demeurent notamment en matière d'influence des paramètres dendrométriques et de la résistance mécanique des arbres. Les modélisations actuelles des chutes de blocs reflètent l'état général des connaissances: la forêt est très peu prise en compte dans les modèles numériques de simulation.

La technique récente du LIDAR permet maintenant de pouvoir disposer de MNT fiable avec une résolution de 1 m et une précision décimétrique. Dans le contexte de l'utilisation d'un modèle de simulation trajectographique, il est maintenant possible de rendre fidèlement compte de la micro topographie et de la morphologie du relief. Pour autant que le modèle utilisé soit robuste et adapté à l'utilisation d'un tel MNT, les résultats obtenus seront plus proche de la réalité que ceux obtenus avec un MNT au pas de 10 m. Dans le paragraphe 3.4, le lecteur trouvera des informations relatives aux utilisations forestières du LIDAR et des exemples d'utilisation pour nos sites d'étude.

3.3 LE GÉNIE BIOLOGIQUE PARE PIERRE

Frédéric Berger, Luuk Dorren, Christophe Bigot, Jérôme Lopez - Cemagref

Une forêt située sur une pente a par définition une fonction de protection des versants. A ce titre elle représente un ouvrage naturel de protection. Elle fait donc partie de la grande famille des ouvrages de protection de génie biologique. Comme pour les ouvrages artificiels de génie civil, on peut caractériser les ouvrages de génie biologique en termes de capacité et d'efficacité. Ce chapitre présente l'état de l'art sur les interactions forêts-chutes de pierres et de blocs, les outils actuels de description et de quantification de l'action des peuplements forestiers, une méthode de zonage des forêts à fonction de protection ainsi que des éléments d'aide à la gestion des forêts à fonction de protection.

Cet ouvrage de synthèse s'adresse aussi bien au gestionnaire forestier qu'au non forestier. Le premier recherche des outils et un état de l'art pour l'aider à gérer au mieux la fonction de protection des peuplements forestiers. Le second quant à lui, recherche des informations lui permettant à la fois de mieux cerner l'apport du génie biologique dans le contexte de la prévention et de la protection vis-à-vis des chutes de pierres mais aussi pour mieux appréhender les contraintes et les marges de manœuvre du forestier dans la gestion des forêts à fonction de protection.

A ce titre, il est nécessaire au préalable de donner un certain nombre de définitions afin que ces deux communautés de travail puissent mieux se comprendre et décrire le même objet de la même manière. Par conséquent que se cache-t-il sous le terme forêt?

3.3.1 Principales définitions et notion en sylviculture

Echelles d'organisation et gestion forestière

Comme pour tout corps de métier, la foresterie a un vocabulaire spécifique. Dans ce paragraphe le lecteur trouvera les principaux termes et paramètres dendrométriques utilisés par le forestier.

Une forêt est un écosystème et, à ce titre, elle représente l'organisation hiérarchique et fonctionnelle des différents sous-systèmes qui la constituent. L'Encyclopedia Universalis donne pour définition de système "l'ensemble des phénomènes et d'évènements interdépendants que l'on extrait du monde extérieur par une démarche intellectuelle arbitraire, en vue de traiter cet ensemble comme un tout". Ainsi un système est un sous ensemble d'un système plus vaste. Le système d'interactions complexe des espèces entre elles et avec le milieu est appelé écosystème (Frontier et Pichod-Viale, 1990).

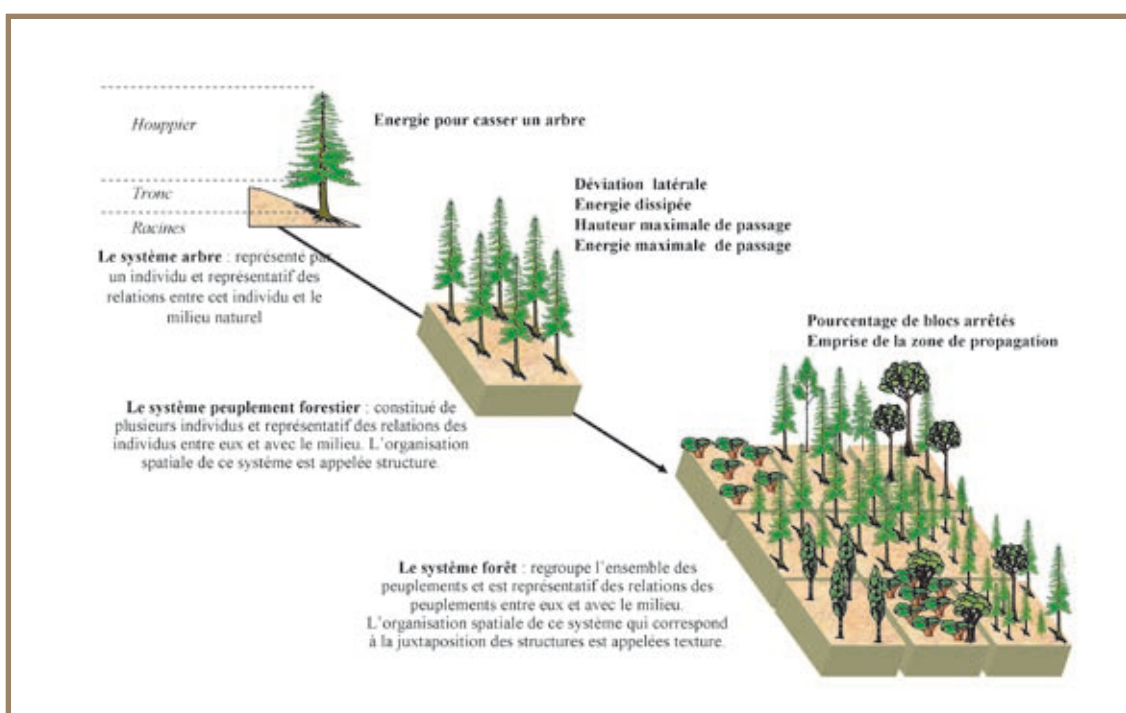
Par conséquent une forêt est plus qu'une simple collection d'arbres. On peut ainsi distinguer 4 niveaux d'organisation:

- le système arbre: c'est l'individu arbre. Ce système est représentatif des relations entre l'individu arbre et le milieu naturel. La durée de survie biologique d'un arbre est limitée, il est donc fondamentalement instable dans le temps. En plus de la durée de survie, cette instabilité dépend aussi des perturbations auxquelles il est confronté (accident climatique, problèmes phytosanitaires, aléas naturels, etc.);
- le système population ou peuplement élémentaire: c'est un ensemble d'arbres ayant une uniformité quant à sa composition floristique, sa structure, son âge, sa répartition dans l'espace, etc. Ce système est représentatif des relations des arbres entre eux et avec le milieu. L'organisation spatiale (horizontale et verticale) de ce système est appelée structure. Un peuplement peut former une unité élémentaire sylvicole ou d'aménagement. La stabilité de ce système correspond à une combinaison de celle des sous systèmes arbre (Courdier et Philip, 1989). La stabilité dans le temps de ce système est envisageable et constitue l'objectif de base des interventions sylvicoles (Renaud et al., 1994). Traditionnellement l'échelle de perception de ce territoire correspond à celle utilisée par le forestier sur le terrain pour décrire les peuplements. Elle est de 50 m sur 50 m. C'est à cette échelle qu'intervient la sylviculture;
- le système forêt ou peuplement: il est composé de l'ensemble des peuplements élémentaires. Il est perceptible à l'échelle d'un versant. Ce système est représentatif des relations des peuplements

élémentaires entre eux et avec le milieu. L'organisation spatiale de ce système qui correspond à la juxtaposition des structures est appelée texture. Il permet de réaliser des analyses multicritères (forêt-aléas naturels, etc.) et par conséquent d'apprécier la stabilité de la forêt par rapport à ses fonctions (Renaud et al., 1994). De plus c'est à partir de cette échelle que l'on peut établir un plan de gestion et d'aménagement forestier;

- le système massif forestier: c'est le dernier niveau d'organisation qui regroupe l'ensemble des systèmes forêts sur un territoire administratif et/ou géographique homogène. Cette échelle correspond aussi à la mise en œuvre des politiques d'aménagement des territoires (figure 3.3.1).

Figure 3.3.1 Niveaux d'organisation d'une forêt



Les conditions de milieu influencent la nature et la composition des peuplements forestiers. Le forestier a ainsi développé la notion de station forestière. Une station forestière est une étendue de terrain de superficie variable, homogène dans ses conditions physiques et biologiques (climat, topographie, sol, structure de la végétation spontanée, etc.) (Gauquelin, 2000). Les stations en montagne sont principalement déterminées par la tranche d'altitude, l'exposition et la nature du substrat géologique, et les contraintes géomorphologiques (massifs externes et internes, étages du collinéen au subalpin, versant d'ubac et d'adret, stations en crête ou en combe).

L'aménagement forestier regroupe les études et documents sur lesquels s'appuie la gestion durable d'une forêt; à partir d'une analyse approfondie du milieu naturel et du contexte socio-économique, l'aménagement forestier fixe les objectifs à moyen et long terme. Il détermine l'ensemble des interventions souhaitables (coupes, travaux, etc.) pendant une durée de 10 à 25 ans. A l'issue de cette durée, il fera place à un nouvel aménagement forestier (Gauquelin, 2000).

La gestion forestière quant à elle est une stratégie de gestion qui cherche à reproduire les processus de sorte que la diversité des essences et le fonctionnement des écosystèmes forestiers persistent durablement tout en répondant aux objectifs assignés (Dictionnaire de la foresterie, 2003). La gestion minimale est une gestion à moindre coût mais qui doit rester cependant adaptée aux objectifs.

Le traitement sylvicole est ce qui caractérise la nature et l'organisation des opérations sylvicoles dans un peuplement; de lui dépend la structure du peuplement. Il existe par exemple des traitements en futaie. Le peuplement ou l'ensemble d'arbres provient de la germination de graines (reproduction sexuée); la futaie s'oppose au taillis dont les arbres ont pour origine des rejets de souches (reproduction végétative).

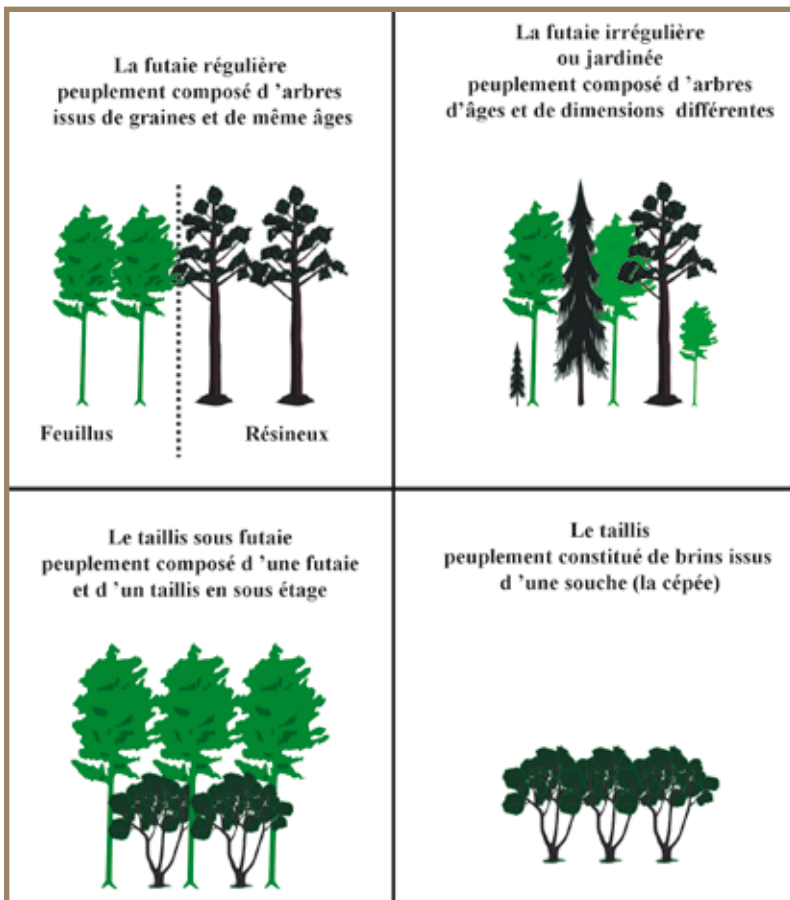


Figure 3.3.2 Les 4 principaux types de peuplements

Pour le cas de la futaie, une structure est dite jardinée si elle présente un mélange pied à pied et convenablement dosé de sujets de tous âges et de tous diamètres, depuis les semis jusqu'à l'arbre exploitable. Toutes les classes d'âge sont représentées. Une structure régulière qualifie un peuplement constitué par des arbres dont les cimes forment un couvert assez égal et homogène. Le furetage est un traitement qui consiste à ne pas couper un taillis entièrement à l'âge d'exploitation, mais à y passer à intervalles réguliers en coupant les brins les plus gros (figure 3.3.2)

Un arbre déraciné et renversé par une perturbation (le vent par exemple) est appelé un chablis. Un arbre cassé mais non déraciné par une perturbation est appelé un volis.

Stabilités des peuplements forestiers

La stabilité est le caractère de ce qui tend à demeurer dans le même état. Elle est le résultat de la capacité de résistance à une perturbation. Pour un écosystème, cette capacité est liée aux processus de régulation lui permettant de s'adapter et de réagir à des variations. Cette régulation est essentielle pour assurer la pérennité des écosystèmes mais

son fonctionnement est très complexe. L'autorégulation d'un système en fonction de perturbations est une des expressions de la sélection naturelle. Frontier et Pichod-Viale (1990) précisent que la diversité biologique et la stabilité sont liées mais pas forcément corrélées.

Ces auteurs ont démontré que la diversité est une condition nécessaire à la stabilité mais non suffisante. Ainsi l'augmentation de la diversité ne correspond pas forcément à un accroissement de stabilité. En effet "un système trop complexe ne peut être stable" (May, 1975, dans Renaud et al., 1994) car les systèmes de régulation sont trop nombreux.

En réponse à une perturbation soit ils s'annihilent, soit ils donnent un nouveau système stable. Celui-ci n'a aucun rapport avec le système initial, c'est-à-dire avant l'action de la perturbation. Par ailleurs des systèmes très simplifiés, dus aux conditions drastiques et très sélectives du milieu, présentent une très grande stabilité.

Ainsi la notion de stabilité présente une ambiguïté. En effet un système dit stable maintient cette stabilité soit en modifiant certaines de ces caractéristiques mais en conservant sa structure initiale soit en développant une nouvelle structure qui lui permet de s'adapter aux nouvelles conditions. Dans le deuxième cas le système ne répond plus à la définition de la stabilité car il donne naissance à un nouveau système. Mais ce nouveau système est par définition stable au regard des nouvelles conditions. Ainsi il n'existe pas une stabilité mais des stabilités, que nous allons brièvement présenter.

La stabilité d'un écosystème est caractérisable par l'étude des bilans de biomasses et des flux. D'après Frontier et Pichod-Viale (1990) les biomasses sont proportionnelles aux flux qui les traversent. Par conséquent la stabilité des biomasses et celle des flux sont liées. Un système stabilisé voit ces bilans osciller autour de valeurs limites. Mais cette approche quantitative ne rend pas compte de la disparition ou de l'apparition de nouvelles espèces. On a alors défini le concept de résilience. Gigon (1981) la définit comme étant "le concept supérieur désignant différents phénomènes permettant à un système écologique de se

maintenir dans un état ou d'y revenir après avoir subi des changements". Ainsi il y aura résilience quand une espèce voyant ses effectifs diminuer se met en réserve afin d'être capable de redevenir à l'occasion dominante. L'hétérogénéité spatiale de l'écosystème a une influence sur la résilience. Une espèce ayant disparu en un lieu peut y revenir par diffusion à partir des zones voisines. La résilience d'un écosystème est donc fonction de l'échelle d'étude choisie (Frontier et Pichod-Viale, 1990).

La stabilité quantitative et la résilience définissent la stabilité écologique.

La stabilité mécanique est quant à elle la capacité d'un système à résister à un phénomène physique. Le fait que des arbres résistent à des vents violents ou à un choc (chute de pierre par exemple), c'est-à-dire qu'ils soient peu susceptibles de faire des volis ou des chablis, est un bon exemple de cette stabilité. Elle s'applique aussi bien aux systèmes vivants qu'aux matériaux. Ainsi dans le cas du bois, elle devient la faculté pour ce dernier de conserver plus ou moins ses dimensions, formes et compositions lorsqu'il est exposé à des variations de température et d'humidité. On parle alors de "résistance des matériaux". La stabilité mécanique est, elle aussi, fonction de l'échelle d'étude. En effet, un écosystème peut présenter une bonne stabilité mécanique pour un secteur donné et une mauvaise sur l'ensemble de son territoire. C'est cette stabilité qui est la principale composante de la protection offerte par les peuplements forestiers au regard des aléas chutes de pierres et blocs rocheux. La stabilité mécanique des forêts de montagne est entre autre fonction des phénomènes naturels auxquels elles sont confrontées. L'appréciation de cette stabilité nécessite donc une bonne connaissance des phénomènes naturels et des interactions forêt-phénomènes naturels.

La stabilité fonctionnelle, quant à elle, représente la faculté d'un système à assumer une fonction que l'homme lui a fixée. Les forêts à fonction de production en sont de bons exemples. En effet elles répondent aux critères d'équilibre du gestionnaire forestier c'est-à-dire qu'elles assurent des revenus réguliers et maxima. Pour les forêts à fonction de protection le critère d'équilibre est la pérennité de la protection offerte par les peuplements.

Ainsi la stabilité est une notion très complexe. Elle est utilisable pour caractériser aussi bien un matériau qu'un écosystème. Sa définition est donc fonction de l'échelle d'étude. La stabilité d'un écosystème représente la synthèse de la stabilité écologique, mécanique et fonctionnelle. La stabilité fonctionnelle est la composante anthropique de cette notion.

Afin d'apprécier la stabilité d'une forêt, le gestionnaire doit travailler à deux échelles. La description des peuplements élémentaires constituant une forêt nécessite une échelle fine (50 m sur 50 m) alors que l'appréciation de ses fonctions et par conséquent de sa stabilité fonctionnelle ne peuvent se faire qu'à une échelle plus grossière (le versant). La détermination de la stabilité d'une forêt est très complexe. En effet nous venons de voir que la structure, l'agencement des structures (texture), l'échelle d'observation, le type de stabilité et la nature des contraintes interviennent dans cette détermination. Mais en fixant l'échelle d'observation au versant et en faisant abstraction de la nature des contraintes on peut donner des critères généraux d'appréciation de la stabilité d'une forêt.

Un peuplement forestier, dit stable, doit présenter une forte valeur adaptative aux contraintes de toutes sortes. Il doit donc être perméable à ces contraintes. En effet, une forêt résiste à une contrainte si elle ne lui offre pas ou peu de prise. Ainsi si un dégât survient, il est limité dans l'espace et dans le temps. De nombreux auteurs reprennent ce constat. Ainsi Bischoff (1987) utilise la formule bien connue de "diviser pour régner" pour rendre compte de la stratégie adaptative des forêts de montagne vis-à-vis des diverses contraintes du milieu naturel. Le praticien suisse Zeller (1982) préconise un "peuplement plus ou moins finement et nettement compartimenté avec de petits points d'appui stables et autonomes, c'est une forêt composée de nombreux bosquets, avec de nombreuses lisères intérieures; c'est une mosaïque dans

laquelle les arbres, la végétation herbacée, la neige et la lumière sont éparpillés par petites taches”. Cet auteur définit ainsi une structure par petit groupe d’arbres appelé “collectif”. Il considère qu’une structure irrégulière est, par définition, perméable. Par opposition une structure régulière est assimilable à un mur sur lequel les contraintes viennent se heurter (Zeller, 1994) avec une action dévastatrice. Une structure régulière aura donc une stabilité inférieure à celle d’une structure irrégulière.

En 1912, le forestier suisse Bavier préconisait déjà cette organisation spatiale en collectif: “En montagne, ... les arbres forment des groupes qui, vus de loin, ont l’allure d’un arbre unique. Ils mêlent leurs couronnes unilatérales et faibles pour en former une grande et constituent ensemble un tout dont on ne saurait sans risque enlever un élément Ces groupes se distinguent franchement de leur entourage, utilisent leurs nombreuses branches pour former un manteau et font front aux vents et à la neige comme une entité vigoureuse”. Pour cet auteur ces groupes existent aussi dans les peuplements réguliers où “ils sont à peine esquissés” (Bavier, 1912 dans Zeller, 1994). Il considère d’ailleurs que l’éclaircie est un “travail préparatoire” qui doit s’adapter à la “structuration spontanée des peuplements”. Ainsi l’éclaircie ne doit nullement concerner l’ensemble d’un peuplement de façon uniforme mais au contraire sélectionner et favoriser ces structures en bouquet.

Cette organisation spatiale en collectif traduit l’existence de discontinuité au sein d’un peuplement (existence de lisière) et d’une hétérogénéité texturale (mosaïque des structures élémentaires). Elle assure aussi la permanence du manteau forestier.

Lanier dans son précis de sylviculture (1986) et le Guide des sylvicultures de Montagne (Gauquelin et Courbaut, 2006) préconisent un traitement en futaie jardinée et donc la recherche de structure irrégulière pour les forêts de montagne notamment pour celles qui ont un rôle de protection. Ce traitement permet d’étaler dans le temps la régénération des peuplements forestiers et par conséquent de les pérenniser. Pour ces auteurs, l’équilibre des classes d’âges que l’on observe dans les structures jardinées favorise la stabilité des peuplements car “la résistance qu’opposent les arbres aux adversités de toute nature dépend de leur âge... l’efficacité des diverses classes d’âge n’est pas la même en matière de protection” (Lanier, 1986). Là encore ces auteurs accordent le maximum de stabilité aux structures irrégulières (**figure 3.3.3**).

En conséquence on peut donner un diagnostic du degré de stabilité d’un peuplement en fonction du niveau d’hétérogénéité texturale et de la présence de discontinuité (Renaud *et al.*, 1994). Le mode de répartition spatiale des structures détermine différents niveaux d’hétérogénéité. Pour Renaud *et al.* (1994) la concentration sur une partie d’un versant d’unités constituées de structures élémentaires similaires, et donc de fonctionnement voisin, est considérée comme défavorable à la stabilité car elle renforce l’homogénéité de la texture.

La sylvigénèse

Le gestionnaire forestier a besoin de connaître le cycle d’évolution naturelle des peuplements afin de cibler au mieux la nature et le calendrier de ses interventions. Ce processus cyclique est appelé la sylvigénèse (Oldemann, 1990).

Sa connaissance est possible grâce à la description des types structuraux, à l’inventaire et la connaissance des forêts dites naturelles, peu ou pas transformée par l’homme. De nombreux travaux scientifiques ont été et sont consacrés à leur étude, leur fonctionnement et leur dynamique. Ils ont pour objectif de caractériser chacune des phases de la sylvigénèse.

Une forêt est une entité qui en fonction de certains critères peut être décomposée en sous-unités homogènes. Les forêts naturelles n’échappent pas à cet état de fait. Leur organisation spatiale est assimilable à une mosaïque (appelée unité sylvatique) constituée d’éléments unitaires équiennes de même origine (appelée éco-unité). Le phénomène générateur d’une éco-unité est dans la majorité des cas un phénomène naturel. Le plus souvent c’est le vent avec l’ouverture de trouée.

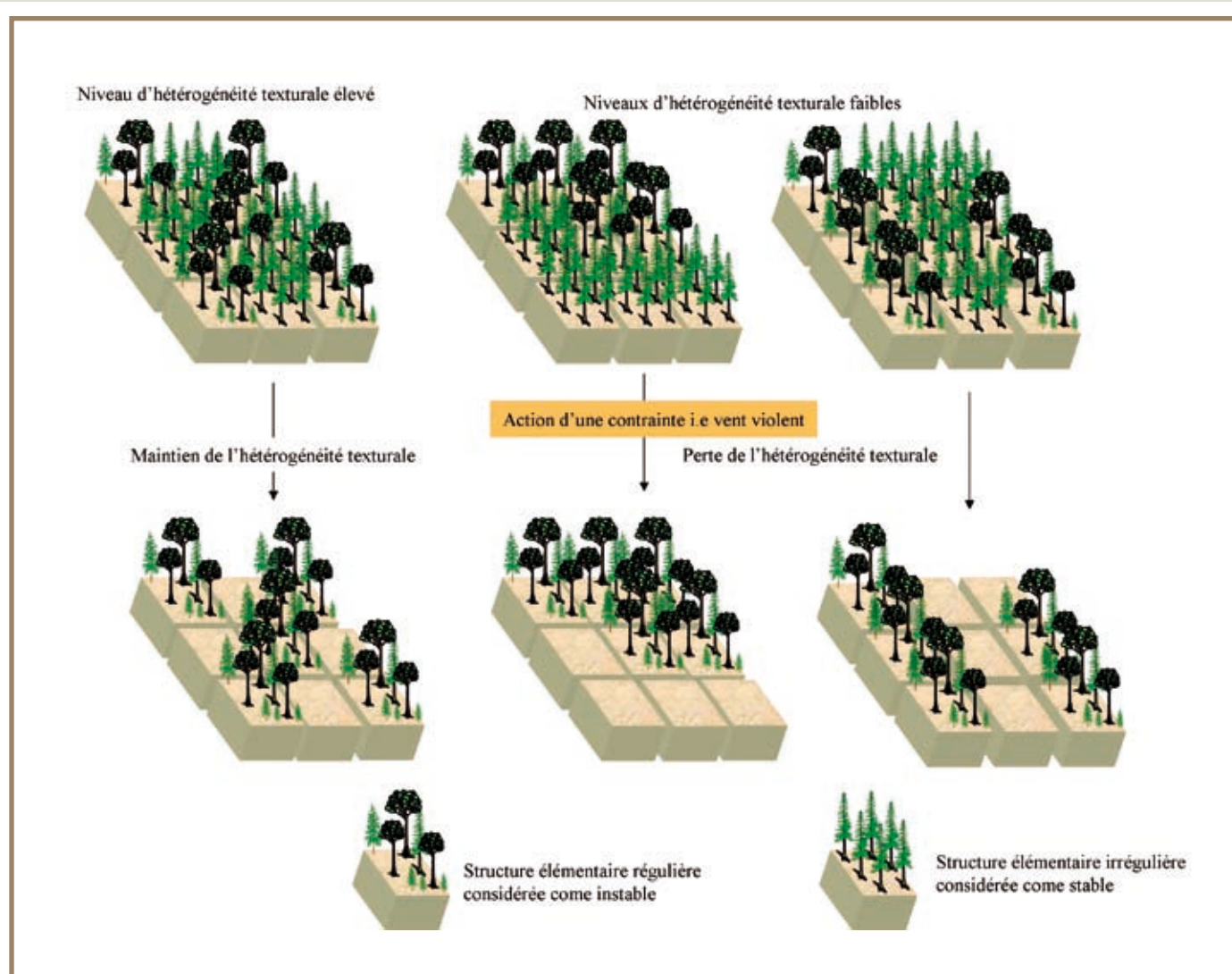


Figure 3.3.3 Niveaux d'hétérogénéité texturale et stabilité

Dans ces ouvertures la régénération pourra s'installer et se développer pour donner naissance à une éco-unité. Pour Oldemann (1990) ces ouvertures constituent le moteur de la sylvigénèse. L'ensemble des éco-unités au même stade de développement constitue une phase de la sylvigénèse. La sylvigénèse correspond donc aux degrés successifs de maturation des peuplements.

Cette organisation spatiale en mosaïque est confirmée par les travaux des forestiers suisses (Leibundgut, 1982) et autrichiens (Mayer et Ott, 1990). Ce mode d'organisation donne à ces forêts une structure intermédiaire entre les futaies régulières et les futaies jardinées (Mortier, 1990).

De manière synthétique, la sylvigénèse est un processus évolutif par lequel les forêts naturelles assurent leur pérennité. Ce processus est décomposable en deux grandes étapes:

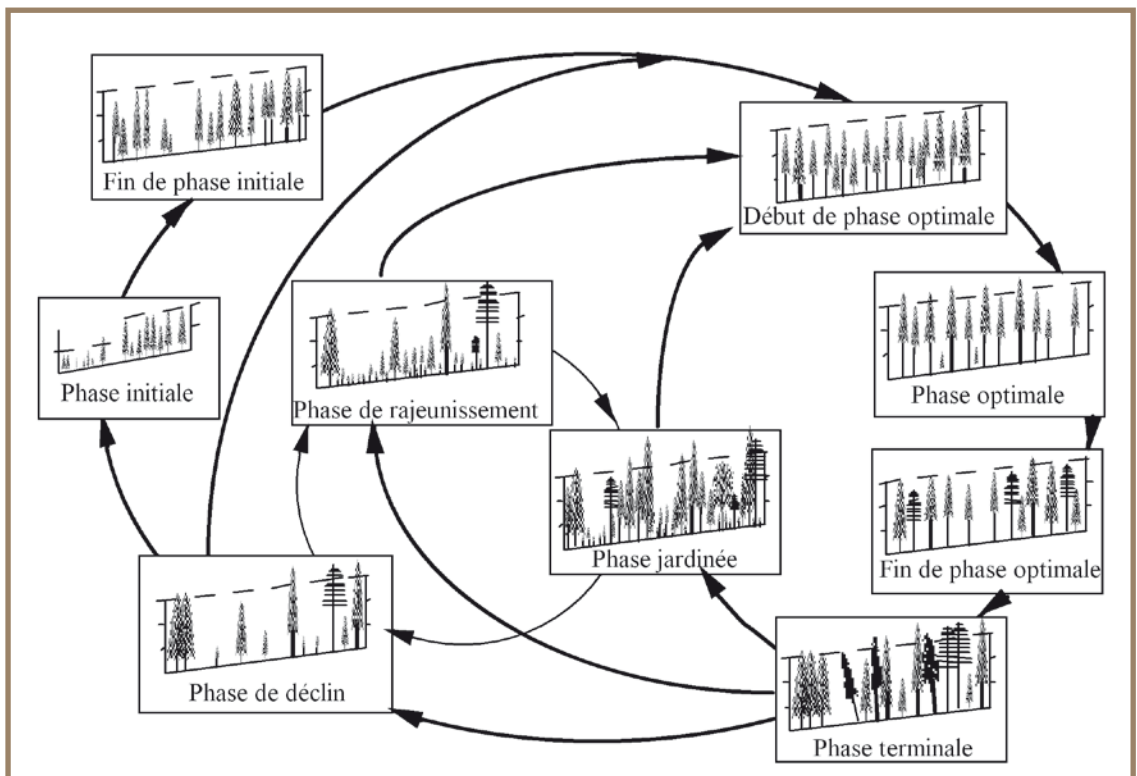
- une étape de croissance et développement du peuplement. Sa durée est fonction de l'espérance de vie de l'espèce dominante;
- une étape de rajeunissement. Elle est initialisée par l'écroulement d'individus ce qui permet à un ensemble de semis de se développer. Ce développement correspond à une nouvelle phase de croissance.

Leibundgut (1982) et Mayer et Ott (1990) à partir de ces deux étapes ont décrit le cycle sylvigénétique en six phases:

- une phase de rajeunissement (ou de régénération), phase ultime de la désagrégation de l'ancien peuplement. Elle est caractérisée par l'abondance de la régénération et du nombre de perches;

- une phase initiale, constituée de peuplements denses, fermés, dominés par les petits bois;
- une phase optimale, où la densité diminue, et les bois moyens deviennent prédominants. La surface terrière est élevée;
- une phase terminale, le peuplement est encore relativement fermé, riche en gros bois et une régénération présente mais faible;
- une phase de déclin, qui se traduit par une ouverture des peuplements surannés, avec des chablis. Il en résulte une chute du volume sur pied et l'apparition de la régénération dans des secteurs où elle n'existait pas;
- une phase jardinée, caractérisée par un équilibre des différentes strates et différentes catégories de diamètre. On observe des ouvertures localisées sous la forme de petites trouées (**figure 3.3.4**).

Figure 3.3.4 Phases de développement en pessière subalpine de Schlobberg Lienz (D'après Mayer et Ott, 1990)



La taille d'une éco-unité est fonction de l'essence principale et des conditions stationnelles (fertilité, orientation, etc.). Il en est de même pour les surfaces relatives occupées par les phases du cycle sylvigénétique. Aux stations très fertiles et homogènes correspondent les structures les plus régulières (Renaud *et al.*, 1994). On comprend aisément que cette organisation spatiale en mosaïque peut être réduite à sa plus simple expression quand les conditions stationnelles sont homogènes. C'est le cas dans les Alpes du Nord pour les pessières (peuplement composés d'épicéas) productives situées à l'étage montagnard. Cette homogénéisation sur un territoire étendu est susceptible d'engendrer des conséquences catastrophiques. Elle peut conduire à la présence d'une seule phase du cycle sylvigénétique dans une forêt. Ainsi la phase de déclin se soldera par l'effondrement de ce dernier sur de grandes surfaces. La pérennité de ce peuplement est donc compromise. L'espace libéré lors de cet effondrement pourra être colonisé par des formations non forestières ou laisser la place à des essences forestières pionnières (comme le mélèze par exemple). En plus de la pérennité, l'obtention de revenus réguliers et soutenus est remise en cause. Par conséquent ce type de forêt ne répond plus aux critères d'équilibres définis et recherchés par le gestionnaire forestier. Ce déséquilibre est l'expression de l'instabilité dans le temps de ce type de peuplement forestier. Cette notion de stabilité est d'autant plus importante que les conditions du milieu sont difficiles.

Les principaux paramètres dendrométriques

La dendrométrie est l'ensemble des mesures et des paramètres permettant de caractériser la forme, les dimensions, l'âge, la qualité des arbres, des peuplements et de leurs produits.

Ainsi pour un arbre et un peuplement on peut mesurer un certain nombre de paramètres dendrométriques en fonction des objectifs de gestion fixés et de la fonction assignée aux objets étudiés. Nous ne donnerons dans ce paragraphe que les paramètres dendrométriques utiles dans le cadre du génie biologique pare pierre.

Pour un arbre les principaux paramètres dendrométriques sont:

- *Son essence.*
- *Son diamètre* mesuré à hauteur de poitrine soit 1.30 m de haut (aussi dénommé Diamètre à Hauteur de Poitrine et noté DHP ou $D_{1,30}$). Cette mesure peut se faire soit avec compas forestier soit avec un ruban forestier. Ce dernier instrument permet aussi de mesurer la circonférence. Le forestier utilise des classes de diamètres qui vont de 5 en 5 cm. La classe de diamètre 20 cm correspond en fait à l'intervalle [17.5; 22.5]. De plus, le forestier utilise aussi une typologie de classement en Petit Bois, Bois Moyen, Gros Bois et Très Gros Bois. Cette typologie, donnée dans le paragraphe suivant, est basée sur des regroupements de classes de diamètre.
- *Sa surface terrière* à 1.30 m de haut. La surface terrière correspond à la surface occupée par la section d'un arbre mesurée à 1.30 m de haut. Elle est notée: $g = (\pi/4) \cdot (D_{1,30})^2$ et son unité est le m².
- *Sa hauteur.* Le forestier peut mesurer plusieurs hauteurs: la hauteur commerciale, la hauteur de la première branche vivante, la hauteur correspondant au demi-diamètre, la hauteur totale, la hauteur totale potentielle. Dans le contexte des forêts à fonction de protection seule la hauteur totale (notée H_0) et la hauteur totale potentielle sont à mesurer. La hauteur totale potentielle correspond à la hauteur que maximale que peut atteindre un arbre en fonction des conditions présents dans le secteur où il pousse. En règle générale elle est mesurée en faisant, pour une parcelle, la moyenne des hauteurs des trois arbres ayant atteint leur diamètre d'exploitabilité (45 à 60 cm suivant les stations). Pour les taillis la hauteur maximale potentielle est estimée sur la base des plus gros arbres présents dans le peuplement. L'unité de mesure est le mètre.
- *Son coefficient d'élanement.* Ce coefficient correspond au rapport de la hauteur (en m) sur le diamètre (en cm). Il s'exprime en pourcent. Il représente la stabilité d'un arbre face au vent. Quand la valeur de ce rapport est, pour les résineux de 65% et plus alors l'arbre est considéré comme instable, pour les feuillus la valeur est de 80% et plus.



Figure 3.3.5 Le couvert d'un arbre

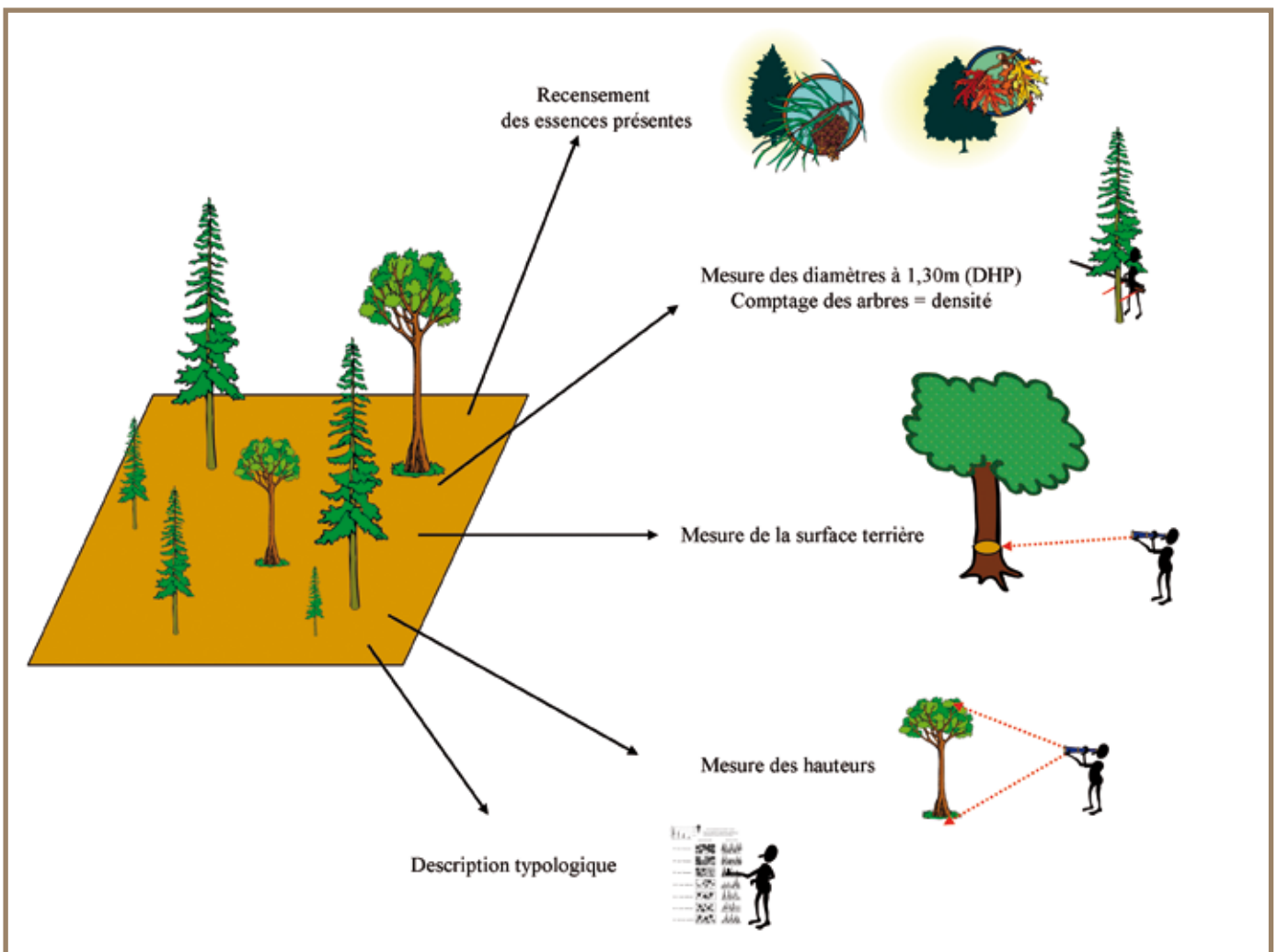
- *Son âge.* Pour un arbre sur pied, l'âge est mesuré en comptant ses cernes de croissances de sa périphérie à son centre et ce, à partir du prélèvement d'une carotte (de 4.5 mm de diamètre) à l'aide d'une tarière de Pressler. Pour une souche ou un tronc au sol, il suffit de compter le nombre de cernes sur la section visible.
- *Son couvert.* Le couvert d'un arbre est la projection perpendiculaire au sol de la surface occupée par son houppier (figure 3.3.5).

Pour un peuplement forestier, et donc pour une surface donnée, les principaux paramètres dendrométriques sont:

- *La répartition des essences.* Cette donnée est très importante dans le contexte des chutes de pierres.
- *La densité des tiges.* C'est le nombre d'arbres présents sur le secteur d'étude. Elle s'exprime en nombre d'arbre par hectare. Cette donnée est très importante dans le contexte des chutes de pierres.

- *La répartition des diamètres.* C'est la courbe de répartition de l'ensemble des diamètres des arbres mesurés. Le diamètre de précomptage est généralement fixé à 17.5 cm soit la classe de 20 cm. Les arbres ayant un diamètre inférieur à cette valeur ne font pas l'objet d'un inventaire.
- *La surface terrière.* Pour un peuplement sa surface terrière est la somme des surfaces terrière de chacun des arbres présents. Elle est noté G et son unité est le m²/ha. Cette donnée est très importante dans le contexte des chutes de pierres. Pour mesurer ce paramètre le forestier utilise un relascope. Cet appareil permet de réaliser un comptage, par lecture optique, des arbres présents sur une surface donnée. Le résultat de ce comptage donne directement la valeur à l'hectare de la surface terrière du peuplement. En zone de montagne les relascopes permettent de compenser l'effet de la pente.
- *La hauteur dominante.* C'est la moyenne des arbres dominants. Un arbre dominant est par définition un arbre plus haut que ces voisins et qui perturbe leur croissance.
- *La stratification.* Ce paramètre correspond à la répartition des hauteurs des arbres en fonction de la hauteur maximale potentielle. On utilise 4 strates. Ce paramètre est développé dans le paragraphe suivant.
- *La structure verticale.* Ce paramètre permet de qualifier la répartition spatiale des arbres. Cette structure peut être homogène si l'ensemble de la surface est occupée par les arbres ou hétérogène si des trouées sont présentes. De plus, le forestier peut préciser si les arbres forment ou non des collectifs.
- *Le couvert.* C'est la surface totale occupée par les projections au sol de tous les houppiers des arbres présents. On peut mesurer le couvert estival et le couvert hivernal. Il s'exprime en pourcent. Un couvert de 70% signifie que 70% du sol est couvert par la projection au sol des houppiers. Pour un peuplement sont couvert ne peut dépasser 100%. On peut calculer un couvert par strate, auquel cas la somme de tous les couverts par strate peut dépasser 100% (figure 3.3.6).

Figure 3.3.6 Les principaux paramètres dendrométriques



3.3.2 Les principaux outils de description des peuplements forestiers

La réalisation d'un inventaire forestier basé sur la mesure de tous les arbres, est une opération fastidieuse et coûteuse. En zone de montagne l'accessibilité des sites et la pente sont deux handicaps qui rendent ce genre d'inventaire pied à pied (arbre par arbre) encore plus difficile à réaliser. Or, depuis les débuts de la foresterie, les forestiers se sont rendu compte qu'il était possible de définir des types de peuplements en utilisant des seuils de valeurs et des combinaisons des principaux paramètres dendrométriques. Ils ont ainsi élaboré des typologies de peuplements. Ces typologies permettent de réaliser des inventaires typologiques qui nécessitent non plus une mesure de chacun des arbres présents, mais une estimation et/ou une mesure globale des valeurs des paramètres à utiliser. De plus, les progrès réalisés dans les domaines de la télédétection et de l'acquisition d'images à hautes résolutions font que maintenant il est possible de réaliser un pré-inventaire par analyse d'image et de le valider par mise en place de placettes de control sur le terrain.

Ce paragraphe présente la typologie de référence pour les peuplements forestiers des Alpes du Nord et l'utilisation des données LIDAR pour optimiser le travail d'inventaire de terrain.

La typologie de structure des peuplements forestiers des Alpes du Nord

Cette typologie est le fruit de 10 années de recherche du Cemagref en partenariat avec l'Office National des Forêts. Son utilisation et ses clefs de détermination permettent d'harmoniser et de stabiliser la description des peuplements. Son objectif principal est certes de faciliter la description des peuplements mais aussi d'assurer que deux opérateurs différents décriront le même objet de la même manière et en arrivant au même résultat. Cette typologie est basée à la fois sur la caractérisation de la stratification verticale des peuplements et sur la répartition des arbres en fonction de leurs diamètres (Gauquelin et Courbaut, 2006).

Pour ce faire elle utilise trois critères:

- la surface terrière totale du peuplement, détaillée par essence;
- la proportion de surface terrière des arbres ayant un diamètre de plus de 42.5 cm (Gros Bois), détaillée par essence;
- le couvert occupé par chacune des strates.

Mesure de la surface terrière du peuplement et proportion de Gros Bois

Le plus commode est d'utiliser un relascope. Il faut utiliser un relascope qui permet de corriger la pente et faire bien attention de ne pas oublier les arbres éventuellement masqués par d'autres.

Lors de la réalisation du tour d'horizon avec le relascope il est impératif d'estimer par essence la proportion de gros bois. Pour ce faire le plus simple est de réaliser plusieurs tours d'horizon. Le premier permettra de mesurer la surface terrière totale toutes essences confondues. Les suivants seront réalisés pour chacune des essences présentes et ne porteront que sur la mesure de la surface terrière des gros bois (figure 3.3.7).

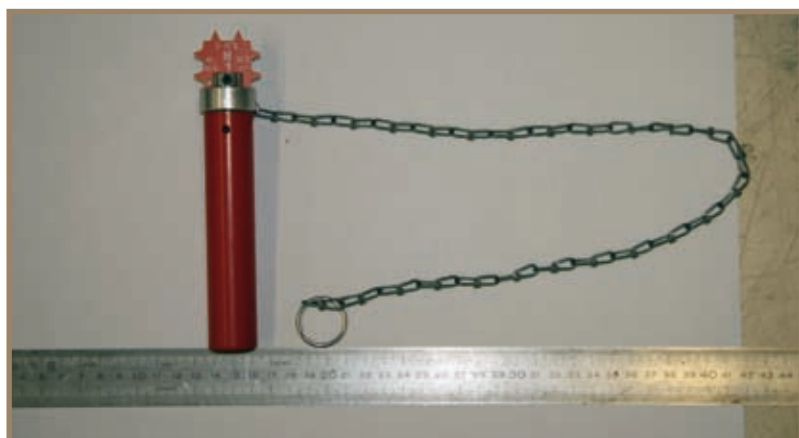


Figure 3.3.7 Le Porc-épic, un relascope simple et robuste

Détermination de la stratification et du couvert par strate

La première étape est de définir la stratification verticale. Cette typologie utilise 4 classes de stratification. Ces classes ont été déterminées à partir de l'estimation de la hauteur maximale potentielle H_0 potentielle. Cette estimation est basée sur la mesure des arbres ayant atteint leur diamètre d'exploitabilité. Si aucun des arbres présents sur la placette de mesure n'a atteint cette valeur alors il faut se baser soit sur des placettes voisines et similaires pour lesquelles des arbres ont atteint ce diamètre d'exploitabilité soit sur des arbres isolés pouvant servir de référence.

H_0 potentielle se détermine toutes essences confondues. Ainsi pour une placette il n'y a qu'une valeur de H_0 potentielle. Pour les taillis H_0 potentielle est estimée à partir des plus gros arbres présents. La valeur de H_0 potentielle est divisée par 4, chacun des quarts correspondant à une classe de stratification. On détermine ainsi 4 strates. La strate 1 étant la plus haute et la strate 4 la plus basse (figures 3.3.8 et 3.3.9).

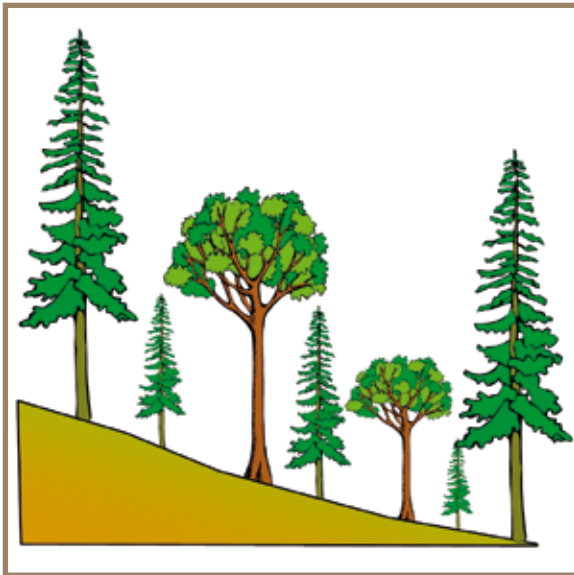


Figure 3.3.8 Exemple schématique d'un peuplement à décrire avec la typologie Massif Alpin

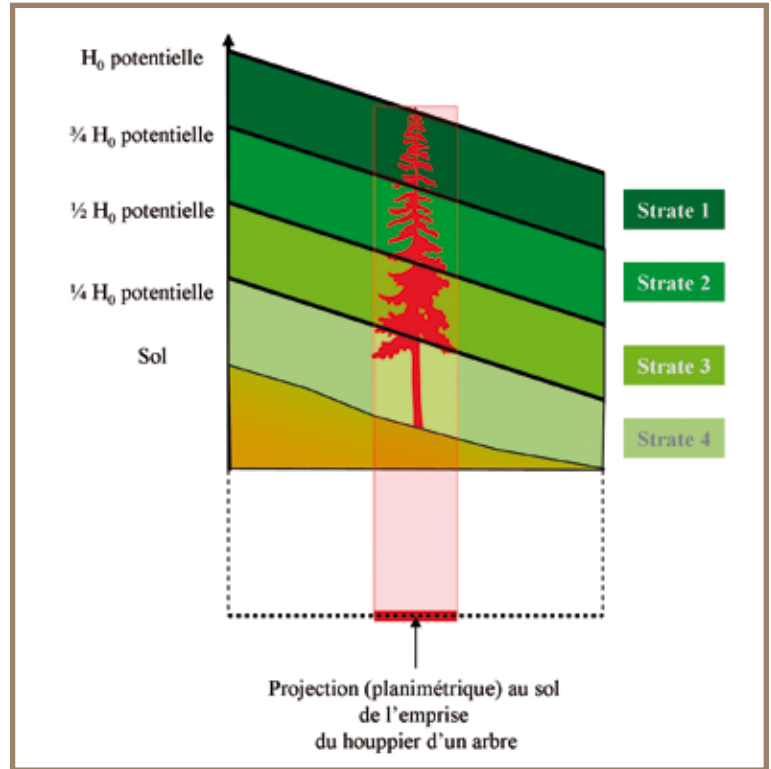


Figure 3.3.9 Détermination des classes de stratification et du couvert d'un arbre au sein d'une strate

La deuxième étape est de caractériser la valeur du couvert occupé par chacune des strates présentes. Pour ce faire, il faut cumuler pour chacune des strates les couverts individuels de chacun des arbres qui la composent. Le couvert doit être exprimé en dixième (x/10) de recouvrement au sol. En fonction de la valeur de ce recouvrement une strate peut être prépondérante, moyenne ou déficitaire (figures 3.3.10 et 3.3.11). A partir de maintenant le descripteur peut utiliser les clefs de détermination des types de peuplements. Les tableaux 3.3.1 à 3.3.10 présentent ces clefs.

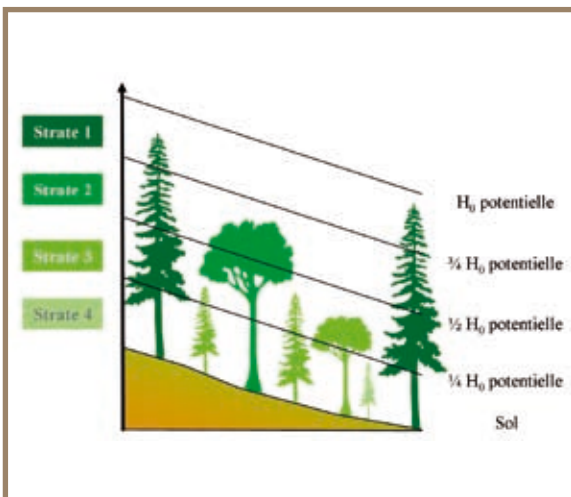


Figure 3.3.10 Détermination de l'appartenance des arbres aux classes de stratification

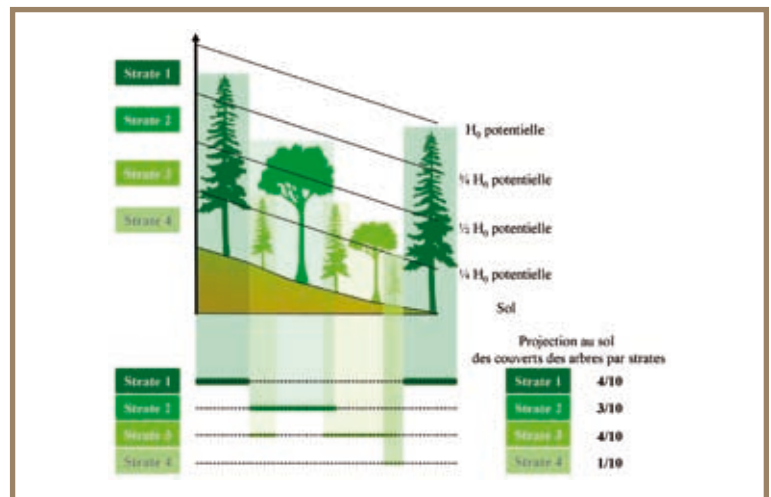


Figure 3.3.11 Détermination du couvert de chacune des classes

Présentation des clefs de détermination des principaux types de peuplement

Catégorie de diamètre (en cm)	Intervalle de diamètre (en cm)	Dénomination	Code
20 ≤ ≤25	[17.5;27.5]	Petit Bois	PB
30 ≤ ≤45	[27.5;47.5]	Bois Moyen	BM
45 ≤ ≤60	[47.5;62.5]	Gros Bois	GB
≥65	[62.5;∞]	Très Gros Bois	TGB

Tableau 3.3.1 Clef de codification des classes de diamètres

Seuil de couvert	Indice de prépondérance	Code couleur
≥5/10	Strate prépondérante	
2/10 < <5/10	Strate moyenne	
2/10 ≤	Strate déficiante	
Sans importance	Sans importance	

Tableau 3.3.2 Clef de codification des strates

Famille des futaies riches en Gros Bois				
Code	1GB	2GB	12GB	
Dénomination	Peuplement à strate 1 prépondérante, riche en GB	Peuplement à strate 2 prépondérante, riche en GB	Peuplement à strates 1 et 2, riche en GB	
Strate 1 (3/4 à 1H ₀)				
Strate 2 (1/2 à 3/4H ₀)				
Strate 3 (1/4 à 1/2H ₀)				
Strate 4 (<1/4 H ₀)				
Surface terrière (m ² /ha)	≥ 10	≥ 10	≥ 10	
GB +TGB (en %)	≥ 60	≥ 60	≥ 60	

Tableau 3.3.3 Clef de détermination des futaies riches en gros bois

Famille des futaies à 2 étages		
Code	13	13GB
Dénomination	Peuplement à strates 1 et 3	Peuplement à strates 1 et 3, riche en GB
Strate 1 (3/4 à 1H ₀)		
Strate 2 (1/2 à 3/4H ₀)		
Strate 3 (1/4 à 1/2H ₀)		
Strate 4 (<1/4H ₀)		
Surface terrière (m ² /ha)	≥ 10	≥ 10
GB +TGB (en %)	< 60	≥ 60

Tableau 3.3.4 Clef de détermination des futaies à 2 étages

Famille des futaies adultes		
Code	1	12
Dénomination	Peuplement à strate 1 prépondérante	Peuplement à strates 1 et 2
Strate 1 (3/4 à 1H ₀)		
Strate 2 (1/2 à 3/4H ₀)		
Strate 3 (1/4 à 1/2H ₀)		
Strate 4 (<1/4 H ₀)		
Surface terrière (m ² /ha)	≥ 10	≥ 10
GB +TGB (en %)	< 60	< 60

Tableau 3.3.5 Clef de détermination des futaies adultes

Famille des jeunes futaies				
Code	R	1GB	2GB	12GB
Dénomination	Régénération	Peuplement à strate 3 prépondérante	Peuplement à strates 2 et 3	Peuplement à strate 2 prépondérante
Strate 1 (3/4 à 1H ₀)	Couvert des strates 3 + 4 > 5/10			
Strate 2 (1/2 à 3/4H ₀)				
Strate 3 (1/4 à 1/2H ₀)				
Strate 4 (<1/4H ₀)				
Surface terrière (m ² /ha)	< 10		≥ 10	≥ 10
GB +TGB (en %)				< 60

Tableau 3.3.6 Clef de détermination des jeunes futaies

Famille des futaies claires		
Code	L	C
Dénomination	Peuplement ouvert	Peuplement clair
Strate 1 (3/4 à 1H ₀)	Couvert des strates 3 + 4 > 5/10	
Strate 2 (1/2 à 3/4H ₀)		
Strate 3 (1/4 à 1/2H ₀)		
Strate 4 (<1/4 H ₀)		
Surface terrière (m ² /ha)	< 10	≥ 10
GB +TGB (en %)		

Tableau 3.3.7 Clef de détermination des futaies claires

Famille des futaies jardinées		
Code	J	JGB
Dénomination	Peuplement jardiné	Peuplement jardiné, riche en Gros Bois
Strate 1 (3/4 à 1H ₀)		
Strate 2 (1/2 à 3/4H ₀)		
Strate 3 (1/4 à 1/2H ₀)		
Strate 4 (<1/4 H ₀)		
Surface terrière (m ² /ha)	≥ 10	≥ 10
GB +TGB (en %)	< 60	≥ 60

Tableau 3.3.8 Clef de détermination des futaies jardinées

Famille des espaces non boisés			
Code	X	P	A
Dénomination	Peuplement sans rôle de production ou de protection	Pelouse d'altitude et prairie à usage agricole	Autres Espaces boisés
Couvert total		< 1/10	< 1/10

Tableau 3.3.9 Clef de détermination des espaces non boisés

Famille des peuplements chétifs et des taillis		
Code	CH	T
Dénomination	Peuplement chétif	Taillis
H ₀ potentielle	< 15 m	> 15 m
Couvert total	> 1/10	> 1/10
Couvert taillis		≥ 2/3
Couvert futaie		< 2/3

Tableau 3.3.10 Clef de détermination des peuplements chétifs et des taillis

L'apport des données LIDAR pour la cartographie des peuplements forestiers

Nous avons vu précédemment que le Laser-scan aérien est une technique récente d'acquisition de données topographiques qui se développe de plus en plus compte tenu des progrès techniques réalisés dans les domaines des lasers et du GPS. Le principe général de cette méthode repose sur la mesure du temps de parcours d'une impulsion lumineuse entre la source émettrice (l'avion dans lequel est embarqué le laser) et la surface interceptée.

Les différences de temps de parcours de l'impulsion lumineuse (les échos lumineux) sont utilisées pour générer deux types de modèle numérique:

- le modèle numérique de terrain (MNT) à proprement parler en ne conservant que les derniers échos;
- le modèle numérique dit de surface (MNS) en ne conservant que les premiers échos.

A partir de ces deux modèles numériques, on peut calculer un modèle numérique dit d'élévation (MNE) qui est obtenu par différence entre le MNS et le MNT. Ce dernier modèle permet ainsi d'obtenir la hauteur des bâtiments et autres "obstacles" (arbres, pylônes, etc.). En zone forestière ce modèle d'élévation est utilisable pour inventorier les arbres dominants en termes de position et de hauteur.

Etat de l'art sur l'utilisation du LIDAR en foresterie

L'étude du fonctionnement et de la fonctionnalité des écosystèmes nécessite de connaître la topographie, la structure en 3 dimensions de la végétation et certains paramètres biophysiques des peuplements forestiers.

La topographie a en effet souvent une influence forte sur la structure, la composition et le fonctionnement des écosystèmes. La structure de la végétation est définie par Parker (1995) (cité par Lefsky et al., 2002) comme "l'organisation dans l'espace et le temps, incluant la position, l'étendue, la quantité, le type et la connectivité des composantes aériennes de la végétation". La structure comprend un certain nombre d'informations sur le stade de développement des communautés végétales et donc sur le fonctionnement de la canopée ainsi que certaines conditions d'habitat pour la faune.

Depuis le début des années 1990, les scanners laser aéroportés LIDAR ont démontré une grande précision dans la mesure de la hauteur du couvert forestier (Næsset, 1999; Magnussen et Boudewin, 1998). De nombreuses études scientifiques ont étudié depuis les possibilités de dériver les paramètres forestiers (hauteurs, diamètres, volumes) de ces mesures LIDAR (Olsson, 2004; Hyypä *et al.*, 2005). Les auteurs ont travaillé soit de façon statistique, à l'échelle de la placette de mesure comme Næsset (2002, 2004) ou Lim *et al.* (2003), soit en identifiant les arbres un à un et en estimant les mesures des données individuelles (Popescu *et al.*, 2004; Hyypä *et al.*, 2000; Persson *et al.*, 2005).

Le principal procédé pour estimer la hauteur du toit du couvert forestier consiste à séparer par filtrage les échos enregistrés issus d'une réflexion avec un élément du couvert de ceux issus du sol. Un modèle numérique de terrain (MNT) et un modèle numérique de surface (MNS) sont produits à partir de ces deux nuages de points et un modèle numérique de couvert (MNC) est alors calculé par différentiel entre le MNS et le MNT. Ce principe a été utilisé pour mesurer la hauteur des arbres individuels par de nombreux auteurs (Hyypä et Inkinen, 1999; Persson *et al.* 2005; Leckie *et al.*, 2003), qui ont obtenu des résultats avec une erreur résiduelle moyenne de l'ordre du mètre. Hyypä et Inkinen (1999) ont généralement constaté un biais négatif de quelques décimètres à un mètre.

L'approche utilisée à l'échelle de la parcelle est plus souvent basée sur des relations statistiques entre les mesures LIDAR et les paramètres forestiers. En particulier, la distribution verticale des différents échos LIDAR sur une même placette, représentée sous forme de quantiles, a été utilisée pour estimer les variables forestières de la placette par plusieurs auteurs (Næsset, 2002; Magnussen et Boudewin 1998).

Les précisions obtenues à l'échelle de la parcelle par ces auteurs sont de l'ordre de 11% à 19% pour le volume à l'hectare, 3% à 6% pour la hauteur moyenne et 6% à 12% pour le diamètre moyen (Olsson, 2004).

Si la technologie LIDAR paraît prometteuse pour l'estimation des paramètres forestiers, à l'échelle de l'arbre, de la placette de mesure ou de la parcelle, elle reste relativement chère à mettre en œuvre sur de larges régions. On peut néanmoins espérer avec l'utilisation croissante de ces données et l'amortissement des capteurs une diminution des coûts d'acquisition.

Les études réalisées à ce jour ont confirmé l'intérêt du LIDAR pour la réalisation d'inventaires forestiers avec, par exemple, de bonnes performances lors de l'estimation de paramètres au niveau du peuplement (taux de couvert, biomasse aérienne, densité du peuplement) mais aussi au niveau de l'arbre tels que la hauteur totale (mesurée avec une précision inférieure au mètre) ou le volume de la tige (Olsson, 2004). Le LIDAR permet de caractériser les végétations hautes sans saturation de la réponse avec l'augmentation de la biomasse. Certains pays envisagent dès à présent d'utiliser à court terme la technologie LIDAR pour réaliser leurs inventaires forestiers (Nilsson *et al.*, 2003; Wulder, 2003). La réalisation d'un inventaire à partir de données LIDAR, en limitant les relevés de terrain, coûterait 2 fois moins cher qu'un inventaire traditionnel et prendrait de 3 à 4 fois moins de temps (Means *et al.*, 2000). L'automatisation des procédures et la diminution attendue du coût des données feront probablement de la technologie LIDAR un outil d'inventaire compétitif par rapport aux méthodes traditionnelles dans les prochaines années (Olsson, 2004). Le LIDAR s'est révélé aussi performant pour caractériser la structure de la végétation, donnée importante pour certaines applications forestières (fonctionnement des écosystèmes et gestion du risque feux de forêt). Mais le développement de nouveaux systèmes de description de la canopée est nécessaire pour exploiter au mieux les données LIDAR.

Les résultats obtenus sur des peuplements mixtes (feuillus/résineux) ou sur des peuplements feuillus sont moins prometteurs que ceux obtenus sur des forêts de conifères (Olsson, 2004). Les nouveaux systèmes, qui enregistrent la totalité du signal retour (*full waveform*), apparaissent particulièrement prometteurs pour caractériser la structure de ce type de couverts (Persson *et al.*, 2005). Les **figures 3.3.12 à 3.3.16** présentent des exemples des plans dérivés obtenus à partir de données LIDAR.

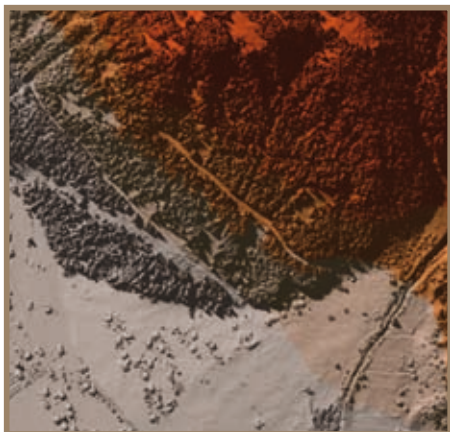


Figure. 3.3.12 Exemple de MNS

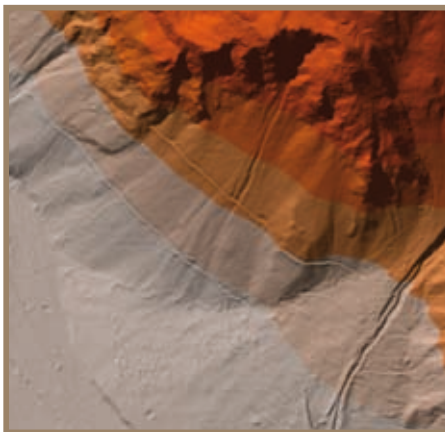


Figure. 3.3.13 Exemple de MNT



Figure. 3.3.14 Exemple de croisement du MNT et du MNS: le MNE (hauteur de tous les bâtiments et de la couverture forestière)

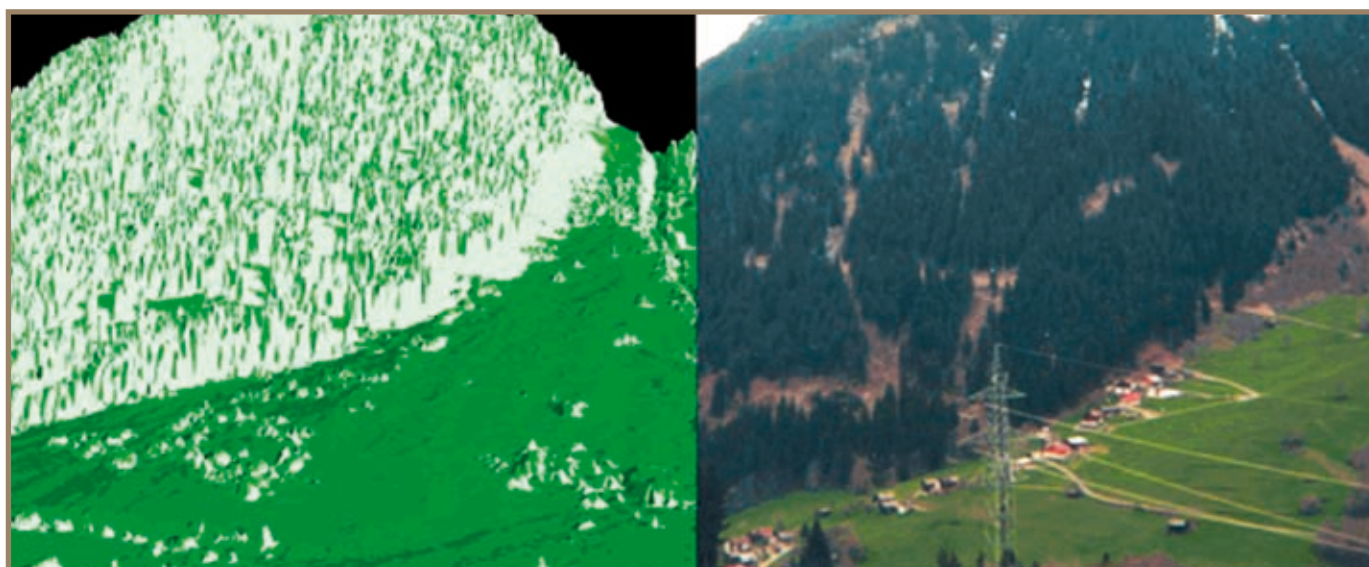


Figure. 3.3.15 Exemple de visualisation en 3D des données LIDAR

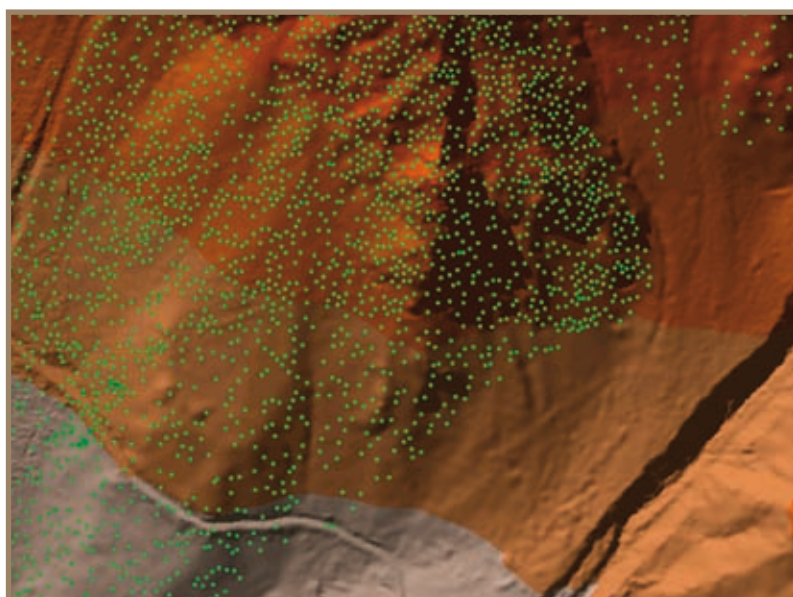


Figure. 3.3.16 Exemple de plan dérivé obtenu par traitement du MNE et croisement avec le MNT: cartographie de la position de tous les arbres dominants

Principe général et outils d'extraction des paramètres dendrométriques à partir de données LIDAR

Les données LIDAR donnent pour chacun des points du terrain, interceptant l'impulsion lumineuse émise par le scanner aéroporté, son altitude et sa position ainsi que le temps de retour de cette impulsion. Le premier traitement consiste donc à séparer les données relatives au sol proprement dit de celles caractérisant l'occupation de celui-ci. En fonction du cahier des charges, ce premier traitement peut être réalisé par la société en charge de l'acquisition des données initiales. Cette situation est à privilégier (figure 3.3.17).

Le principe général de la méthode est premièrement d'extraire du fichier les points correspondant aux apex des arbres et la hauteur de ces points, deuxièmement d'utiliser les informations d'une ou plusieurs placettes de référence afin d'attribuer une valeur de diamè-

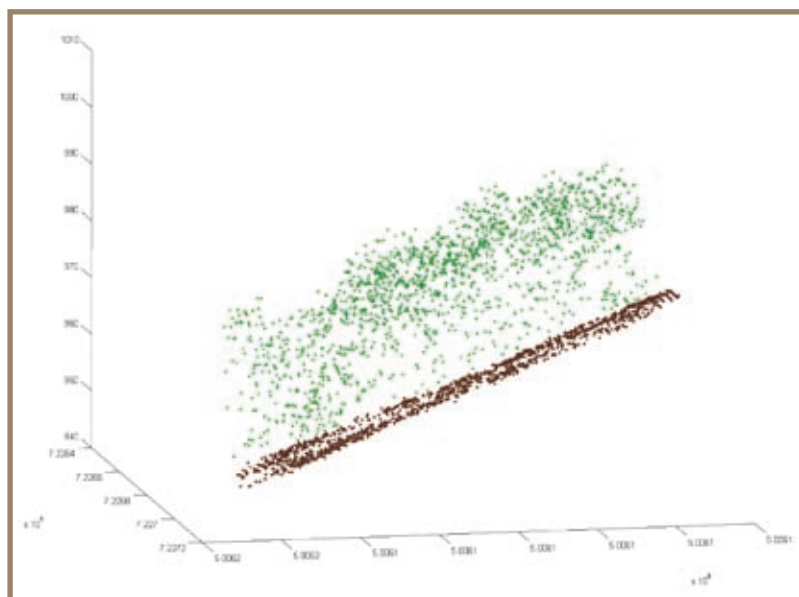


Figure 3.3.17 Semis de points bruts obtenu par acquisition LIDAR (site de Murianette, 2007). Les points verts représentent les impulsions lumineuses impactant la canopée et les points marrons les impulsions lumineuses qui impactent le sol. Le premier traitement consiste à séparer ces deux types de semis de points

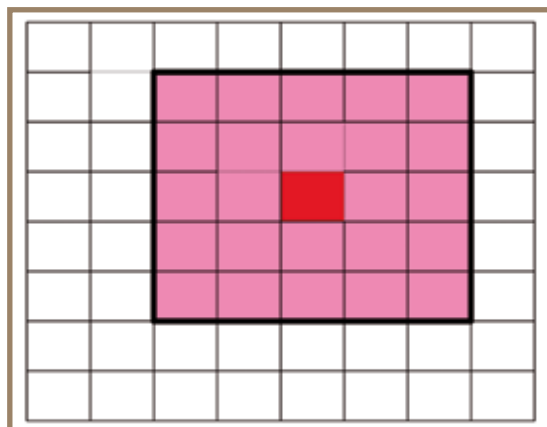
La première analyse est celle qui concerne l'appréciation de la qualité du modèle numérique de terrain au sol et que nous avons présenté précédemment. Si le MNS est considéré comme valide alors l'opérateur peut initier l'extraction des données dendrométriques.

En ce qui concerne les arbres il faut donc pouvoir identifier chacun des arbres présents son apex, sa hauteur totale et la projection au sol de l'emprise de son houppier. Ces deux données sont nécessaires afin, entre autre, de pouvoir attribuer à chacun des arbres recensés une valeur de diamètre.

L'extraction des apex nécessite de pouvoir identifier le point le plus haut dans une surface donnée. En ce qui concerne la projection des houppiers au sol, le problème est inverse. En effet, il faut identifier les points les plus bas et s'assurer que la surface qu'il délimite contient bien un ou plusieurs points (dans le cas d'un collectif d'arbres) correspondant à l'apex ou aux apex des arbres dont cette surface représente le ou les houppiers.

Pour ces deux cas nous avons développé une méthode basée sur l'analyse du raster (fichier informatique constitué d'un maillage régulier de points), correspondant au modèle numérique de hauteur de la canopée, au moyen de "fenêtres glissantes". Le principe général d'une fenêtre glissante est de réaliser pour chacune des cellules d'un raster une analyse prenant en compte les valeurs des cellules voisines. La taille de la fenêtre est fixée par l'utilisateur et s'exprime en fonction du nombre de cellules utilisée. Ainsi une fenêtre 2x2, va utiliser toutes les cellules situées dans un rayon de 2 cellules autour de la cellule de calcul, c'est à dire les 14 cellules situées à la périphérie de la cellule de calcul. Le terme "glissante" correspond au fait que cette fenêtre d'analyse va se déplacer afin de se positionner sur chacune des cellules du fichier raster (**figure 3.3.18**).

Figure 3.3.18 Exemple de "fenêtre glissante 2x2" pour analyser un fichier raster. La cellule en rouge correspond à la cellule sur laquelle la fenêtre glissante est centrée et dans laquelle sera stocké le résultat des calculs réalisés en utilisant les données des cellules en rose et celle en rouge



tre à chacun des arbres identifiés avec les données LIDAR et, troisièmement, de comparer les résultats des traitements avec la réalité terrain sur un certain nombre de placettes test. Pour attribuer un diamètre à un arbre en fonction de sa hauteur il faut disposer de courbes de la valeur du diamètre ne fonction de la hauteur. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'implanter des placettes de références sur le secteur étudié.

Le deuxième traitement consiste à mettre en œuvre ce principe et est donc réalisé par l'utilisateur. En fonction de sa problématique, celui-ci va analyser plus ou moins finement le jeu de donnée correspondant au sol (MNS) et au sur-sol (MNE). Le sur-sol est la couche d'information représentant les obstacles présents sur le sol.

Pour déterminer l'apex des arbres nous utilisons 10 tailles de fenêtres différentes allant de 1x1 à 10x10 cellules. Pour chacune de ces fenêtres nous déterminons qu'elle est la hauteur maximale présente dans l'ensemble des cellules analysés. L'étape suivante consiste à compter pour chacune des cellules du raster initial combien de fois elle correspond à un maxima et ce dans les 10 analyses réalisées. On obtient ainsi un raster donnant pour chacune des cellules la probabilité qu'elle corresponde à l'apex d'un arbre. Les **figures 3.3.19 à 3.3.21** présentent le résultat de ces analyses.

Figure 3.3.19

Représentation en 3 dimensions, avant analyse, du raster "Modèle numérique normalisé de hauteur de canopée" de la placette 25-03 du site d'étude du Freney en Maurienne. On observe la présence de points hauts au sein de la canopée qui peuvent correspondre aux apex des arbres présents dans cette placette de référence. Les légendes donnent les classes de hauteurs en mètres

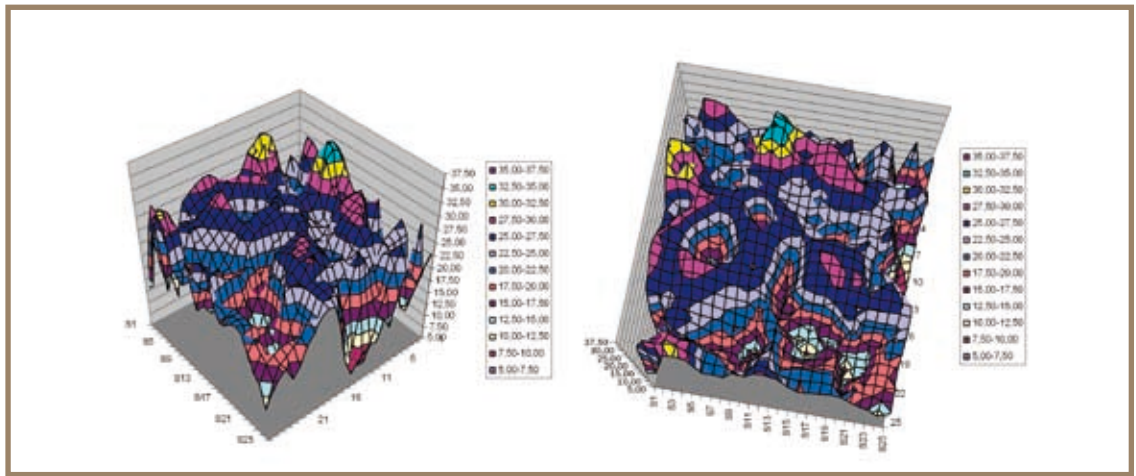


Figure 3.3.20

Représentation en 3 dimensions des résultats de l'analyse avec une fenêtre glissante de 2x2 du raster "Modèle numérique normalisé de hauteur de canopée" de la placette 25-03 du site d'étude du Freney en Maurienne. On observe un lissage des points haut et l'identification des cellules correspondant à des maxima locaux de hauteur dans un rayon de 2 m

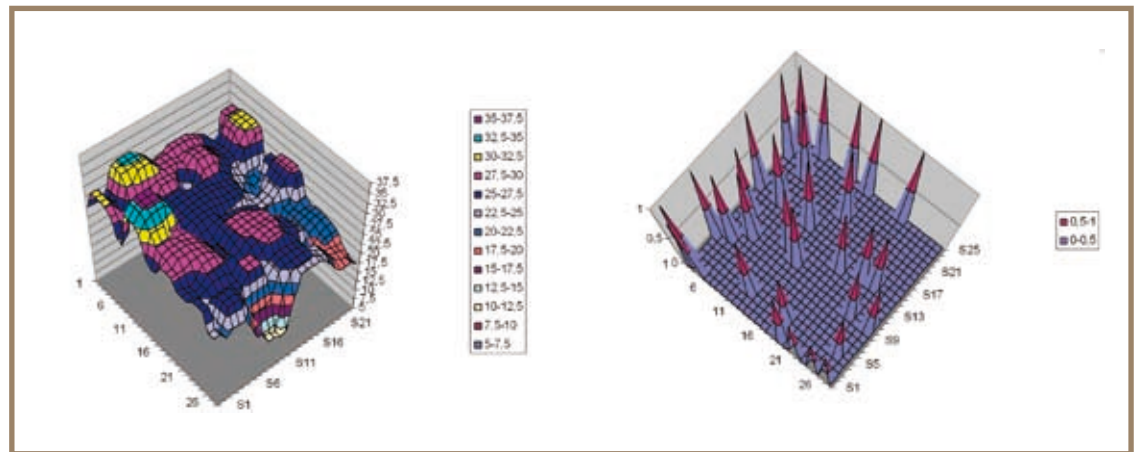
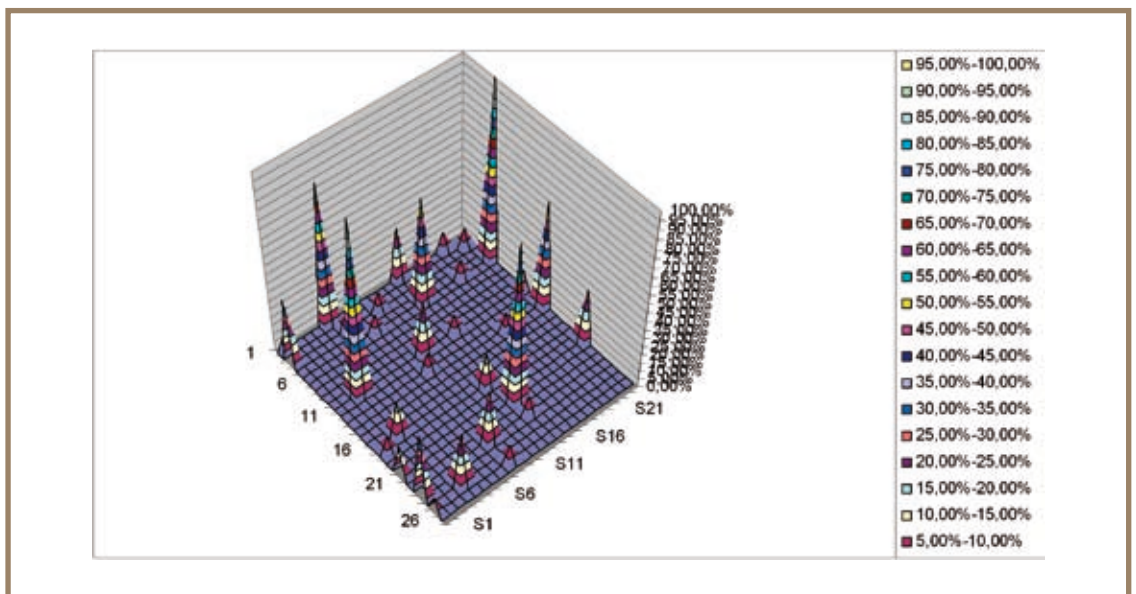


Figure 3.3.21

Représentation en 3 dimensions des résultats de l'ensemble des analyses du raster "Modèle numérique normalisé de hauteur de canopée" de la placette 25-03 du site d'étude du Freney en Maurienne. Tous les pics correspondent aux cellules qui représentent probablement l'apex d'un arbre. Pour chacune de ces cellules notre analyse permet de calculer une probabilité (en %) d'être ou non l'apex d'un arbre et sa hauteur totale



Cette méthode d'analyse a été développée avec le logiciel Matlab.

En ce qui concerne les projections au sol des houppiers, nous avons développé une méthode similaire mais basée cette fois ci sur la recherche des minima locaux. Les figures 3.3.22 et 3.3.23 suivantes présentent les résultats obtenus pour la même placette d'étude.

Figure 3.3.22

Représentation en 3 dimensions des résultats d'identification des projections au sol des houppiers de la placette 25-03 du site d'étude du Freney en Maurienne. La figure a présente une représentation en 3 dimensions des zones les plus basses (en m). La figure b représente les surfaces délimitées par les minima locaux

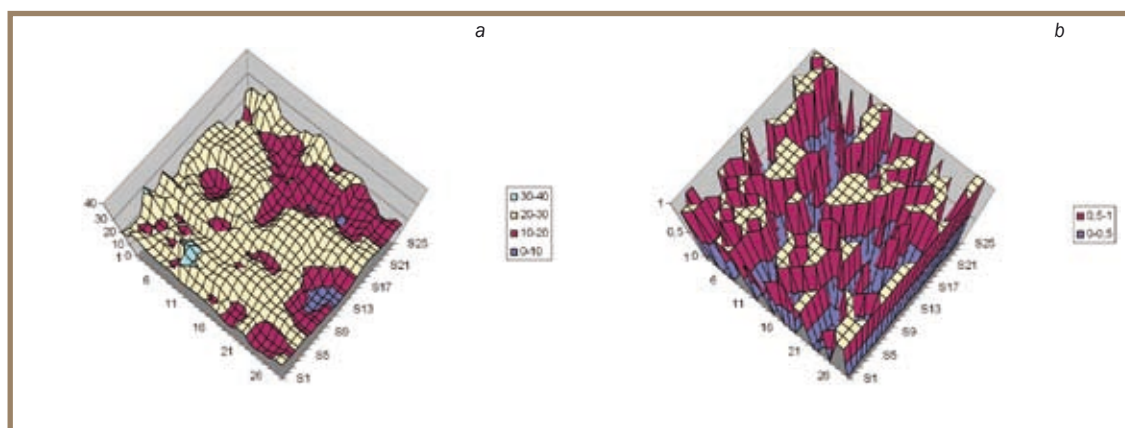
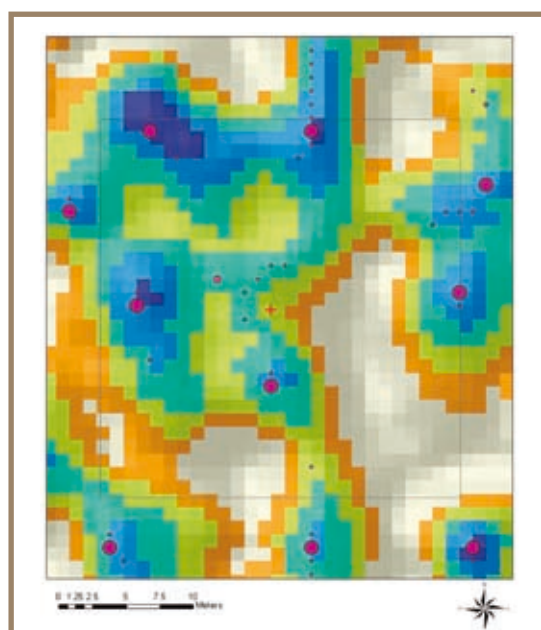


Figure 3.3.23

Cartographie des résultats des analyses réalisées sur la placette 25-03 du site d'étude du Freney en de Maurienne. Les pixels oranges correspondent à la limite de la projection au sol des houppiers. Les points violets correspondent à la position des apex des arbres. La croix rouge est le centre de la placette



Pour attribuer une valeur de diamètre à un arbre en fonction de sa hauteur, il faut connaître la relation qui relie le diamètre à la hauteur. Des courbes existent dans la littérature mais elles ne sont pas toutes adaptées au contexte des Alpes du Nord. Aussi, le plus simple est de construire celle-ci à partir de placette de référence. Pour ce faire, il faut réaliser un inventaire de tous les arbres présents sur ces placettes. Les données à collecter à minima est le couple diamètre-hauteur pour chacun des arbres présents.

La saisie de ces informations dans un tableur permet d'étudier la corrélation qui existe entre ces deux paramètres. Les courbes de régression $D=f(H)$, ainsi obtenues sont celles à utiliser pour attribuer un diamètre aux arbres extraits à partir des données LIDAR (figure 3.3.24).

Conclusions

Le traitement des données LIDAR permet, à partir de l'information sur les hauteurs et la position des arbres, et ce pour site donné, de pouvoir estimer à 80% près les paramètres dendrométriques tels que: le nombre d'arbre à l'hectare, la répartition des diamètres et la surface terrière.

Ce traitement ne peut s'envisager qu'à partir du moment où des placettes de référence ont été implantées. Ces placettes permettent de construire les courbes d'halométries nécessaires à l'attribution d'une valeur de diamètre en fonction d'une valeur de hauteur, mais aussi, elles servent pour la validation des résultats des traitements des données LIDAR.

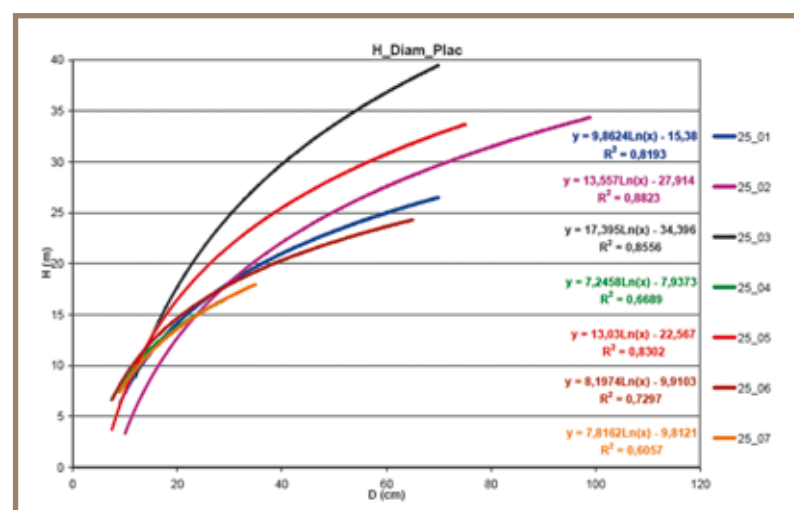


Figure 3.3.24 Exemples de courbes de corrélation entre le diamètre des arbres présents sur les placettes de référence de notre site d'étude du Freney en Maurienne et leur hauteur

dans limiter l'ampleur et à ce titre représente une économie de temps et de moyen. Nous allons maintenant voir que les données qu'elles permettent d'obtenir sont les principales à utiliser pour qualifier et quantifier le rôle de protection des peuplements forestiers vis-à-vis des chutes de pierres.

3.3.3 Etat de l'art sur les interactions peuplements forestier/chutes de pierres

“Il est évident que les troncs font obstacle aux chutes de pierres et stabilisent les éboulis”. Dans cette phrase Dubourdiou (1982) résume l'ensemble des interactions qui existent entre la forêt et les éboulements rocheux. La nature de ces interactions dépend de la localisation de la forêt par rapport aux différentes zones du phénomène.

Interaction dans les zones de départ

La forêt et la végétation peuvent assurer la fixation de certaines zones de départ. Cette action stabilisatrice est due à l'effet d'ancrage du système racinaire, qui assure la stabilisation de la pente et la cohésion des blocs entre eux dans le cas des éboulis.

Mais le peuplement peut avoir des effets néfastes. En effet, d'une part le système racinaire favorise l'infiltration de l'eau dans le sol et augmente les phénomènes de d'altération et de désagrégation (actions des acides humiques, action mécanique des racines, etc.) des roches; d'autre part un arbre peut se comporter comme un bras de levier lors de la prise au vent du houppier et libérer ainsi des blocs au niveau d'une barre rocheuse par exemple. Les peuplements forestiers sont donc capables d'augmenter le volume de matériaux mobilisables et d'initier leur mouvement.

Ainsi la forêt a une action de protection active très limitée et qui ne concerne que les éboulis.

Interaction dans les zones de transit et de dépôt

Deux phénomènes majeurs sont mis en œuvre dans ces zones:

- la déviation de la trajectoire des blocs lors des chocs de ceux-ci avec les arbres;
- l'atténuation de la hauteur de rebonds, due à la dissipation de l'énergie des blocs lors des chocs avec les arbres.

Grâce à ces actions, les peuplements forestiers sont capables de diminuer les vitesses et par conséquent de freiner, voire d'arrêter les blocs. Les peuplements forestiers ont donc, de part leur possibilité de dissipation d'énergie des blocs, un rôle de protection passive.

L'énergie développée par un bloc est fonction de la vitesse de ce dernier. Cette vitesse est elle-même fonction:

- des paramètres volumétriques et de la géologie du bloc;
- des paramètres topographiques (pente, hauteur de chute initiale, etc.) et édaphique (type de sol sur lequel le bloc va rebondir);
- du trajet parcouru par le bloc avant de rencontrer un obstacle ou entre deux obstacles qu'il percute;
- de la capacité de dissipation d'énergie des obstacles;
- du nombre d'obstacles impactés.

C'est la raison pour laquelle l'efficacité des peuplements forestiers vis-à-vis des éboulements rocheux est fonction de l'association de trois types de paramètres.

Les paramètres volumétriques et la géologie des projectiles

Dans le cas d'éboulement en masse (supérieur à 500 m³), la forêt est détruite partiellement ou totalement et son rôle de dissipateur d'énergie est faible voire nul; pour des volumes inférieurs à 500 m³, l'efficacité des peuplements forestiers est fonction des paramètres topographiques et dendrométriques.

En effet, à volume égal un bloc aura d'autant plus d'énergie que la hauteur de chute libre initiale sera importante. Par ailleurs, la forme et le volume du bloc conditionnent la probabilité de rencontre avec des obstacles ponctuels. Ainsi, pour un arbre d'un diamètre donné, plus le volume est important plus la proba-

bilité de rencontre avec cet arbre est importante. A volume égale, la probabilité d'impact entre un bloc et un arbre d'un diamètre donné dépend de la forme du bloc. Ainsi un bloc sphérique aura plus de probabilité de rencontrer un arbre qu'un bloc ayant la forme d'une dalle et qui se propage sur son plus petit côté.

A l'opposé si ce bloc se propage sur son plus grand côté alors la probabilité de rencontre avec un arbre sera plus élevée que dans le cas d'un bloc sphérique. Par conséquent l'orientation du bloc en fonction de ses axes d'inertie conditionne la probabilité de rencontre avec un arbre.

Par ailleurs, pour un bloc de volume donné, un arbre a d'autant plus de chance d'être impacté par celui-ci que son diamètre est élevé. Cette affirmation est aussi valable pour la valeur de la densité des peuplements. En effet, plus le nombre d'arbre sera important plus la probabilité d'impact par un bloc sera élevée.

La géologie du bloc est aussi importante car elle conditionne la masse volumique du projectile et donc sa masse. Le déplacement d'un bloc étant l'expression même de la gravité, plus sa masse sera importante plus son énergie le sera.

L'ensemble de ces paramètres (forme, volume, masse volumique des blocs, valeur de la pente) blocs conditionne la surface terrière et la densité efficaces des peuplements. La surface terrière et la densité efficaces correspondent aux valeurs de ces paramètres dendrométriques pour lesquels la couverture forestière peut dissiper la totalité de l'énergie du projectile.



Figure 3.3.25 Bloc de 5 m³ arrêté par un épicéa



Figure 3.3.26 Bloc de 8 m³ arrêté par une cèpée de hêtre



Figure 3.3.27 Bloc de 9 m³ arrêté par un épicéa

En règle général, l'ensemble des auteurs s'accordent sur le fait que l'efficacité de la forêt est reconnue pour des projectiles appartenant à l'intervalle de volume [0-5 m³]. L'intervalle d'efficacité optimal est de [0-1 m³].

Mais en fonction des conditions topographiques, de la nature de l'occupation du sol dans la zone de propagation et de la longueur de la bande boisée, les peuplements forestiers peuvent arrêter des blocs de plus de 5 m³. Les **figures 3.3.25, 3.3.26 et 3.3.27** illustrent de tels cas.

Les paramètres topographiques

Pour une hauteur de chute libre et un volume donnés, le bloc aura d'autant plus d'énergie que la valeur de pente sera forte. De plus: pour une zone de départ donnée l'efficacité du freinage est d'autant plus faible que le point de départ est éloigné de la forêt.

Ainsi plus la pente en forêt sera élevée moins les blocs seront freinés. Pour des pentes comprises entre 25° et 45°, la forêt est capable, en fonction de l'énergie développée par les blocs, d'arrêter la totalité de ceux-ci. L'efficacité de ce freinage dépend à la fois de la distance d'entrée en forêt du bloc, de l'énergie qu'il va développer, de sa probabilité de rencontre avec des arbres (qui varie en fonction du volume du bloc et du nombre de tige à l'hectare et des diamètres des arbres) et de l'énergie maximale que peut dissiper les arbres et la longueur du secteur boisé. En dessous de 25°, l'arrêt des blocs a lieu plus rapidement en présence qu'en absence de forêt.

Les paramètres dendrométriques

Il est important, afin d'apprécier au mieux l'efficacité de la protection offerte par un peuplement, de déterminer le nombre d'impacts probables entre le projectile et les arbres présents dans la bande boisée dans laquelle le bloc effectue son mouvement. Une fois cette information connue, il faut alors être capable de déterminer l'influence de ces impacts sur la trajectoire du projectile et sa cinématique.

Ainsi quatre paramètres forestiers permettent à eux seuls d'expliquer la capacité de dissipation d'énergie d'un arbre et d'un peuplement forestier. Ce sont:

- A l'échelle de l'arbre:
 - l'essence;
 - le diamètre à hauteur de poitrine.
- A l'échelle du peuplement:
 - les essences présentes;
 - la surface terrière;
 - le nombre d'arbre à l'hectare.

Un cinquième paramètre est important, c'est la longueur de la bande boisée parcourue par le bloc.

Les principales règles de relation entre ces paramètres et l'efficacité de la protection offerte par la forêt sont:

- plus la dénivelée parcourue en forêt sera élevée moins les blocs auront d'énergie à la sortie du peuplement et plus grande sera l'efficacité de l'écran forestier;
- plus la densité sera élevée plus la probabilité d'impact sur un arbre sera grande;
- pour un diamètre d'arbre donné, plus la densité sera élevée plus le freinage sera efficace;
- pour une densité donnée, plus la surface terrière sera élevée plus grande sera l'efficacité de l'écran forestier;
- à diamètre égale, les feuillus ont une meilleure résistance mécanique que les résineux;
- pour une essence donnée sa capacité de dissipation mécanique est une fonction exponentielle du diamètre;
- la capacité de dissipation d'énergie d'un arbre dépend aussi de la position de l'impact sur son diamètre.

Dans le paragraphe dédié aux outils de diagnostic, le lecteur trouvera des informations sur les valeurs de ces paramètres.

Tableau récapitulatif des interactions forêt-chutes de pierres dans les zones de départ, de transit et de dépôt

Zones	Effet(s) positif(s)	Effet(s) négatif(s)
Zone de départ: falaises fracturées, barres rocheuses etc. souvent peu végétalisée	Fixation des éboulis Les arbres tamponnent le climat Diminution des alternances gel/dégel	Racines et chablis déstabilisent les compartiments rocheux Augmentation de l'apport en eau dans les diaclases Prise au vent des houppiers qui induit un effet de levier Favorise l'altération et la mise en mouvement initiale
Zone de propagation: acquisition d'énergie par le bloc	Déviation ou canalisation Dissipation de l'énergie Diminution de la hauteur des rebonds	Possibilité de mise en mouvement d'arbres cassés lors des impacts Possibilité de mise en mouvement de troncs déjà au sol Remise en mouvement de blocs lorsque les arbres chutent
Zone d'arrêt: dépôt des blocs	Réduit la distance d'arrêt des blocs et pierres, qui en absence d'arbres s'arrêteraient plus loin	Pas d'effets négatifs, mais possibilité d'un risque induit par chute sur des enjeux, d'arbre cassé lors d'un impact.

3.3.4 Les outils de diagnostic de la protection offerte par les principaux types de peuplements forestiers

A partir de nos travaux de recherches et de nos expérimentations grandeur nature de lâchers de blocs, nous avons développé trois outils de diagnostic de quantification et qualification de la protection offerte par les peuplements forestiers de la typologie Massif Alpin présentée précédemment.

Le premier de ces outils est l'utilitaire Rockfor^{NET} qui permet à l'échelle d'un versant de quantifier l'Aléa Résiduel Probable à l'aval d'un secteur boisé. Cet utilitaire de calcul est en accès libre en français, italien, allemand et anglais sur le site www.rockfor.net. Le second est le module forestier de notre logiciel de simulation trajectographique en trois dimensions Rockyfor. Nous ne présenterons ici que les principes de calcul utilisés et les résultats du classement des types de peuplements les uns en fonction des autres. Le dernier est notre logiciel de simulation trajectographique RockCop spécialement dédié à l'étude des taillis. Là encore nous avons décidé d'accéder à la présentation sur les résultats.

Présentation et notice d'utilisation de l'utilitaire Rockfor^{NET}

Cet utilitaire permet de quantifier, pour l'aléa chute de pierres et de blocs rocheux, l'Aléa Résiduel Probable à l'aval d'un secteur boisé. L'Aléa Résiduel Probable représente le pourcentage probable de projectiles en mesure de franchir et sortir du secteur boisé étudié.

Principe général

L'énergie développée par un bloc est fonction de la vitesse de ce dernier. Cette vitesse est elle-même fonction du trajet parcouru par le bloc avant de rencontrer un obstacle ou entre deux arbres qu'il percute. Par conséquent, l'énergie développée par un bloc sera d'autant plus faible que la distance entre deux arbres percuteurs sera petite. Ce constat a servi et sert de base aux procédures d'intégration de la végétation forestière dans les outils de simulation trajectographique. Pour réaliser cette intégration il est nécessaire de connaître: la probabilité d'impact sur un arbre, le type d'impact sur cet arbre et finalement les conséquen-

ces de cet impact en termes de déviation latérale et de déperdition d'énergie. L'approche la plus pertinente à ce jour pour le calcul de probabilité d'impact est celle développée par Gsteiger (1993) et basée sur le calcul de la distance moyenne dégagée d'arbre.

Cet auteur estime que la probabilité d'impact d'un bloc sur un arbre augmente avec la distance parcourue en forêt. Le Libre Parcours moyen Dégagé d'Arbre peut alors être calculé à partir du nombre de tiges à l'hectare, du diamètre moyen des arbres et du diamètre du projectile. Avec la formule suivante:

$$LPDA = \frac{S}{[(NT \cdot D_{\text{bloc}}) + \text{somme DHP}]} \quad (3.3.1)$$

avec:

S surface occupée par le peuplement [m²]

NT nombre d'arbre présent sur la surface d'étude

D_{bloc} diamètre moyen des blocs [m]

DHP diamètre des arbres mesurés à hauteur de poitrine [m]

A partir de ce principe et du traitement des données collectées lors des expériences grandeurs nature de lâchers de bloc en forêt réalisées par le Cemagref depuis 2002 sur son site expérimental, nous avons adapté le concept, développé au Cemagref, de décomposition d'un peuplement forestier en une succession de lignes d'arbres et ce afin d'évaluer la protection offerte par ce peuplement (**figure 3.3.28**).

Figure 3.3.28 Photo de lâcher d'un bloc de 1m³ sur le site expérimental de Vaujany



Le franchissement d'une ligne (aussi dénommée "rideau") par un projectile ne peut se faire qu'après un choc avec un des éléments constitutif de cette ligne, à savoir un arbre. La distance entre deux rideaux correspond au libre parcours moyen dégagé d'arbre: LPDA. Comme nous l'avons vu précédemment, il dépend de l'écartement des arbres et de leur répartition spatiale. Il est représentatif de la perte d'énergie occasionnée par la présence des arbres le long du trajet. Ainsi, la perte d'énergie peut être calculée en assimilant la végétation à un écran. Cet écran est constitué d'une succession de "rideaux efficaces".

Ces rideaux sont caractérisés par deux types d'espacements:

- l'espacement efficace entre leurs éléments constitutifs, il est fixé par la largeur des blocs. C'est la distance minimale entre deux éléments pour laquelle un bloc ne peut passer sans qu'il y ait frottements avec ces derniers. Pour des peuplements forestiers, la distance entre deux arbres est fixée à 90% de la largeur des blocs utilisés dans les modèles;
- l'espacement efficace entre les rideaux. Il correspond à la distance nécessaire pour retrouver par projection orthogonale l'espacement efficace entre les éléments constitutifs des rideaux (**figure 3.3.29**).

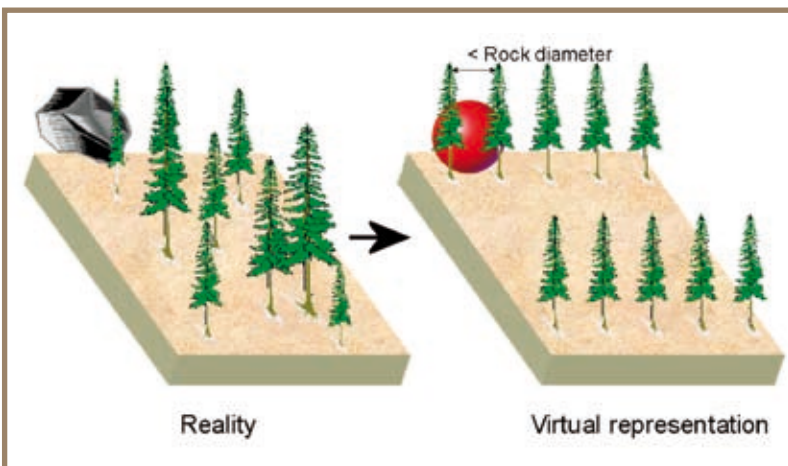


Figure 3.3.29 Principe général de décomposition d'un peuplement forestier en une séquence de rideaux virtuels

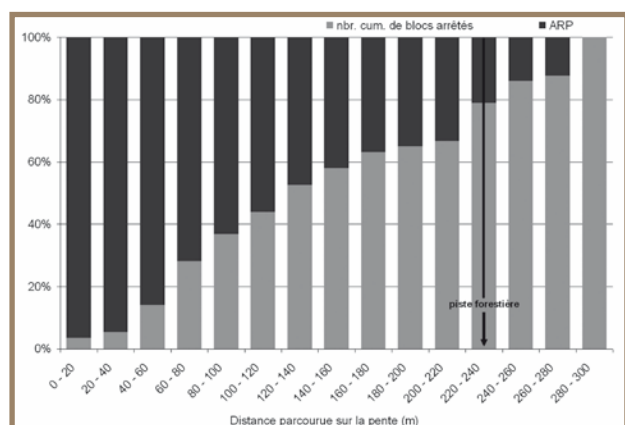


Figure 3.3.30 Nombre cumulé de blocs arrêtés et ARP pour le site expérimental du Cemagref en fonction de la distance (sur la pente) au point de départ



Figure 3.3.31 Exemple de surface terrière interceptée par un bloc

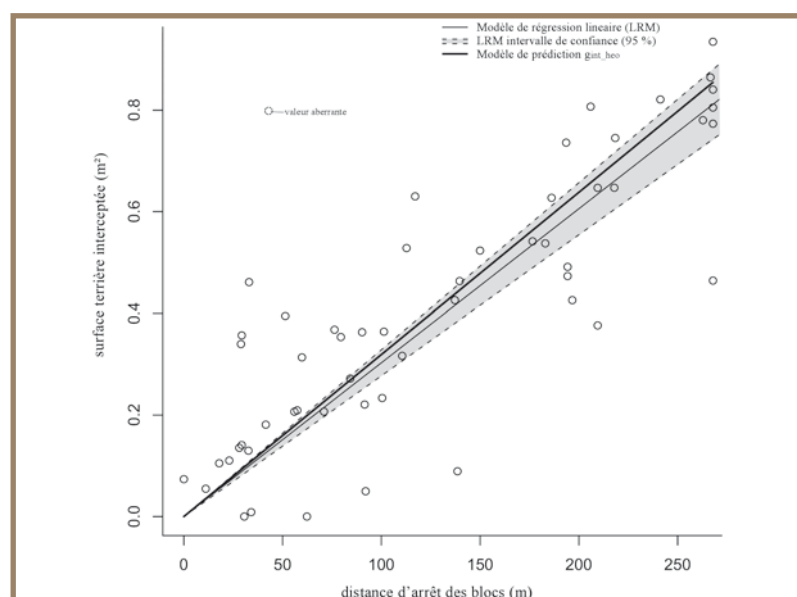


Figure 3.3.32 Corrélation entre la distance d'arrêt des blocs et la surface terrière interceptée sur le site expérimental du Cemagref

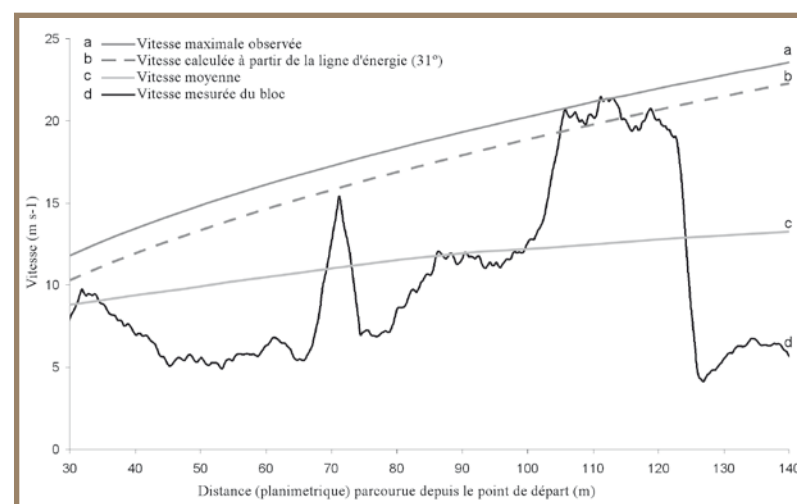


Figure 3.3.33 Comparaison des paramètres cinématiques d'une trajectoire filmée avec ceux calculés avec le principe de la ligne d'énergie

De plus, de l'analyse des données de nos expériences grandeur nature il ressort que le pourcentage de blocs arrêtés en forêt est corrélé à la distance parcourue et à la surface terrière interceptée (figure 3.3.30, 3.3.31 et 3.3.32.)

A partir de ces informations nous avons construit un outil informatique afin de calculer l'aléa résiduel probable (ARP) à l'aval d'un peuplement forestier. L'ARP est défini comme étant la probabilité de franchissement par un bloc du secteur boisé étudié. Le bloc est décrit en fonction de ses dimensions, de sa forme et de sa hauteur de chute probable. Le calcul de l'énergie qu'il développera nécessite de connaître en plus, la pente moyenne du versant sur lequel il se déplacera. A partir de ces données nous utilisons le principe de la ligne d'énergie développée par Heim (1932), Toppe (1987), Gerber (1998) et Meißl (1998) pour estimer son énergie maximale sur sa distance de parcours.

Ce calcul est réalisé à terrain nu, car il est nécessaire de connaître l'énergie maximale que devra dissiper l'écran forestier. Ce principe de calcul de l'énergie a été testé avec les données de notre site expérimental non boisé. La figure 3.3.33 présente un exemple d'une des analyses réalisées. Au regard des résultats obtenus, ce principe s'est avéré être valide.

La dernière information concerne l'énergie nécessaire pour casser un arbre en fonction de son essence et de son diamètre. Là encore nos expérimentations grandeur nature nous ont permis d'acquérir les données nécessaires pour construire un modèle de calcul pour une essence de référence et des abaques de calcul pour les principales essences que l'on peut rencontrer dans les Alpes.

L'essence de référence que nous avons utilisée est

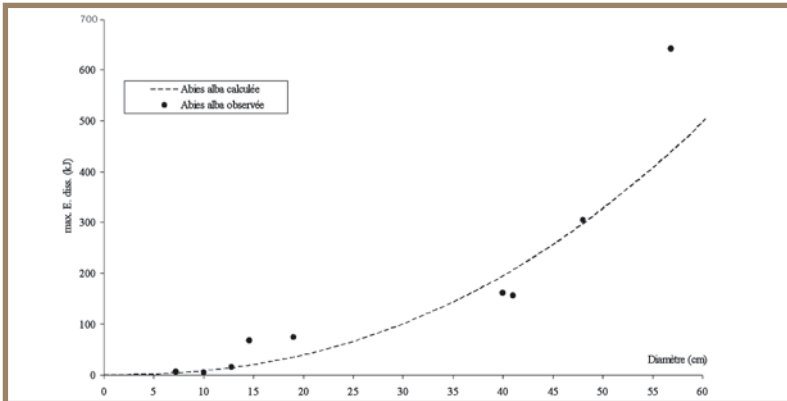
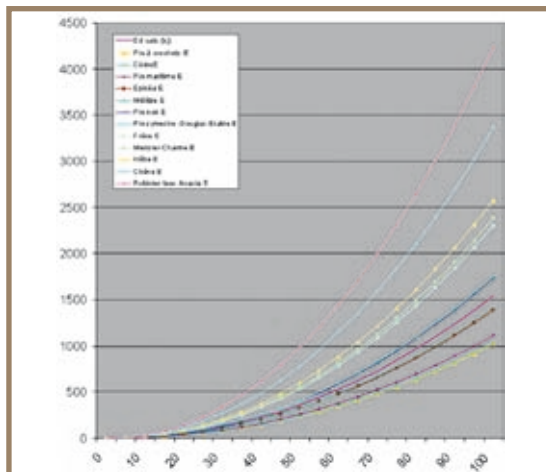


Figure 3.3.34 Energie maximale [kJ] que peut dissiper un sapin en fonction de son DHP [cm]. Les carrés noirs représentent les données observées et ceux en bleu les données calculées

Essence	k = énergie absorbée par l'éprouvette			ratio abies = essence de référence
	kmin (en J)	kmoyen (en J)	kmax (en J)	
<i>Pinus uncinata</i>	12.9	12.9	12.9	0.66
<i>Cedrus</i>	13	13	13	0.67
<i>Pinus pinaster</i>	14	14	14	0.72
<i>Picea</i>	16	17.5	19	0.9
<i>Larix</i>	16	17.65	19.3	0.91
<i>Abies</i>	17	19.5	22	1
<i>Pinus nigra</i>	21.8	21.8	21.8	1.12
<i>Pinus sylvestris</i>	22	22	22	1.13
<i>Pseudotsuga</i>	22	22	22	1.13
<i>Acer</i>	22	22	22	1.13
<i>Fraxinus</i>	29	29	29	1.49
<i>Prunus</i>	30	30	30	1.54
<i>Carpinus</i>	30	30	30	1.54
<i>Fagus</i>	30	32.5	35	1.67
<i>Quercus</i>	35	42.5	50	2.18
<i>Robinia</i>	46	53.5	61	2.74

Tableau 3.3.11 Echelle de classement des essences en fonction de l'énergie absorbée par une éprouvette de bois vert. (D'après Couvreur dans Rupe 1992)

Figure 3.3.35 Relation pour différentes essences entre le diamètre (DHP en cm) et l'énergie maximale dissipable (kJ) lors de l'impact d'un bloc rocheux sur un arbre. Les courbes ont été obtenues en combinant l'équation pour le sapin avec l'échelle de classement du tableau 3.3.11



le sapin. A partir de nos données nous avons pu établir la formule de calcul suivante:

$$E_{\text{max diss}} (\text{par un sapin}) = 38.7 \text{ DHP}^{2.31} \quad (3.3.2)$$

$$R^2 = 0.95 \text{ Min error} = 11.8\% \quad (3.3.3)$$

Il est intéressant de noter que cette fonction utilise le diamètre de l'arbre à la puissance 2.38. Par conséquent, la surface terrière d'un arbre qui fait intervenir le carré du diamètre de l'arbre ($G = (\pi/4) \cdot (\text{DHP})^2$) semble être une variable robuste pour estimer la capacité de dissipation d'énergie d'un arbre. Si tel est le cas alors l'adage selon lequel la capacité de dissipation d'énergie d'un peuplement est fonction de sa surface terrière est validé (figure 3.3.34).

A partir d'une analyse bibliographique sur les énergies de fracture d'éprouvettes en bois nous avons pu extrapoler cette relation aux autres espèces d'arbres. Le sapin a été utilisé comme essence de référence pour hiérarchiser la capacité de dissipation énergétique des autres essences. Le classement a été obtenu en utilisant les résultats de Couvreur (1982) sur des éprouvettes de bois vert (tableau 3.3.11).

La figure 3.3.35 présente les résultats obtenus avec cette échelle de hiérarchisation.

En utilisant des données de la littérature (Mizuyama et Narita, 1988; Peltola et al. 1999, 2000; Nonoda et al. 2004, Stokes et al., 2005), nous avons été capable de tester et valider ces courbes pour le hêtre et le cèdre. Ces validations pour ces deux essences tendent à prouver que notre méthode d'extrapolation, basée sur la combinaison d'une courbe obtenue pour un arbre entier d'une essence donnée et d'une échelle de valeur obtenue sur des éprouvettes de bois vert, est valide. Avec l'ensemble de ces données et concepts, nous avons construit l'outil Rockfor^{NET}, le premier outil de diagnostic rapide à l'échelle d'un versant. Après une phase de validation à partir de cas réels et parfaitement documentés, nous avons décidé de mettre cet utilitaire de calcul en accès libre sur internet. Nous avons inventorié 5 sites sur lesquels des chutes de pierres ont eu lieu. La sélection des sites a été basée sur la possibilité de reconstruire au mieux les trajectoires des projectiles et de réaliser une numération de ceux-ci. Malgré ces modalités de choix, le dénombrement des projectiles qui se sont réellement propagés sur les versants étudiés s'est avéré délicat et difficile à réaliser. C'est la raison pour laquelle nous avons recherché dans la littérature scientifique des données relatives à d'autres expériences grandeur nature réali-

Tableau 3.3.12 Données et résultat de la validation de Rockfor^{NET}

sées de par le passé. En 1997 nous avons réalisé une étude de faisabilité de suivi vidéographique de chutes de pierres. A cette occasion nous avons réalisé, sans présager de l'avenir, une base de données contenant entre autre les informations nécessaires pour utiliser Rockfor^{NET}. Notre étude bibliographique a permis de récupérer des informations pour deux autres sites d'études situés à l'étranger. Le **tableau 3.3.12** présente les données d'entrées ainsi que les résultats observés et ceux calculé avec notre utilitaire.

Localisation et date	Caractéristiques du site			Paramètres forestiers					Description des projectiles		ARP	
	Hauteur de chute (m)	Pente (°)	Distance d'entrée en forêt (m)	Longueur de la zone boisée (m)	Densité (ha ⁻¹)	G (m ² ha ⁻¹)	DHP (cm)	Composition	Diam. moyen (m)	Nature et forme	ARP obs. (%)	ARP calc. Rockfor ^{NET} (%)
Savournon (F) 4/5/2006	49	28	0	525	1534	29.6	16	Quercus sp. 5% Fagus syl. 95%	2.84	Calcaire, rectangulaire	66	85
St. Martin le Vinoux (F) 06/08/1987, (Bigot, 2006)	20	35	0	270	800	16.1	16	Quercus sp. 80% Pinus ni. 20%	1	Calcaire, rectangulaire	75	78
Lumbin (F) 07/01/2002	50	32	0	707	1080	23.3	17	Quercus sp. 5% Acer ps. 62% Robinia ps. 8%	2.35	Calcaire, rectangulaire	100	88
Le Fontamil (F) 1998, (inventaire; Crenn, 1999)	30	32.8	0	148	2750	34.8	13	Quercus sp. 65% Fagus syl. 25% Acer ps. 10%	1.25	Calcaire, rectangulaire	25	26
Dientgital (CH) 2001, (inventaire; Stoffel et al., 2006)	50 - 350	40	0	90	523	20.1	22	Picea ab. 97% Acer ps. 3% (estimated)	0.15	Calcaire, rectangulaire	< 5	4 (moyenne)
Vailly (FR) 1997, (experimentation; Doche, 1997)	0	38	0	140	485	38.7	28	Picea ab. 48% Abies alb. 16% Acer ps. 21% Fagus syl. 15%	0.87	Granit, sphérique	34	35
Balzers (LI) 1987, (experimentation; Jahn, 1988)	0	35.5	0	161	3400	-	13	Fagus syl. 50% Picea ab. 25% Pin. syl. 25%	0.28	Calcaire, sphérique	0	1

Figure 3.3.36 Schéma explicatif pour décrire le projectile



Présentation de l'utilitaire en ligne sur internet

La vocation de cet outil de diagnostic rapide à l'échelle d'un versant guide est d'être pragmatique et de ne pas nécessiter d'investigations complexes et longues. En effet, dans le cas contraire, il serait inutilisable dans le cadre d'un diagnostic préliminaire rapide pour l'aide à la décision des experts. Dans ce contexte l'utilisation de cet outil est rapproché de celle du principe de la ligne d'énergie (Evans et Hungr, 1993) et des développements informatiques associés (i.e. CONEFALL 2003). Nous avons donc décidé de convivalisé le prototype initial et ainsi de

développer un outil utilisable gratuitement via internet.

Les figures 3.3.36 à 3.3.41 sont des copies d'écran de la page www.rockfor.net et qui présentent les principales étapes permettant d'utiliser cet outil de diagnostic.

Figure 3.3.37 Schéma explicatif pour déterminer la valeur de la pente du versant

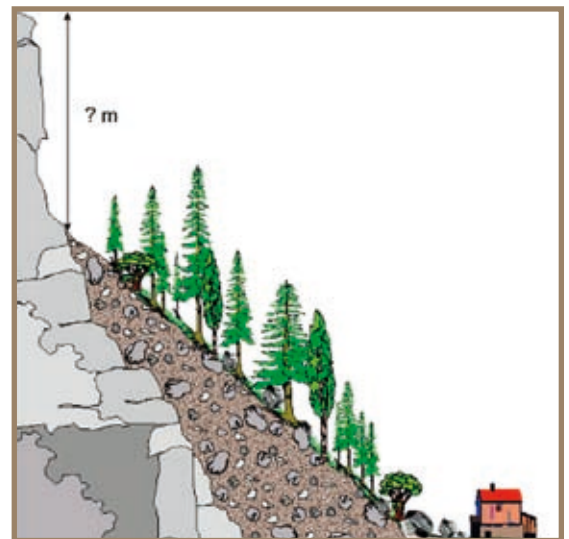
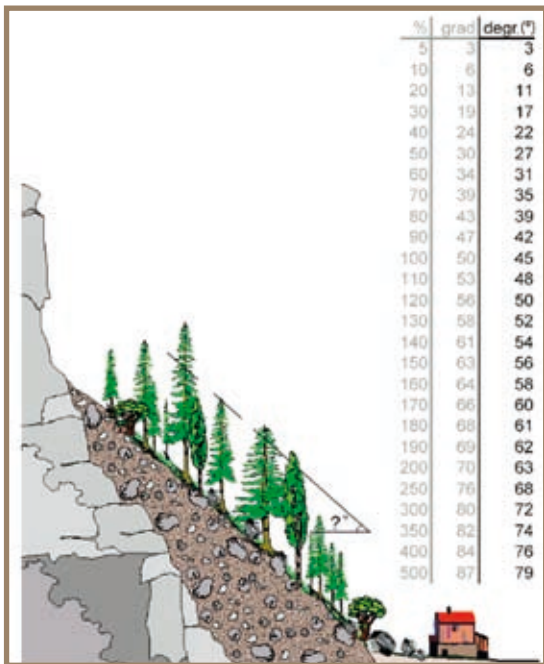


Figure 3.3.38 Schéma explicatif pour déterminer la hauteur de chute initiale

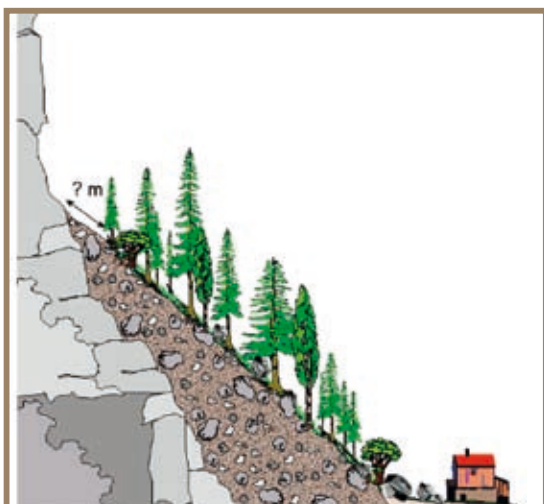


Figure 3.3.39 Schéma explicatif pour déterminer la distance d'entrée dans la zone boisée

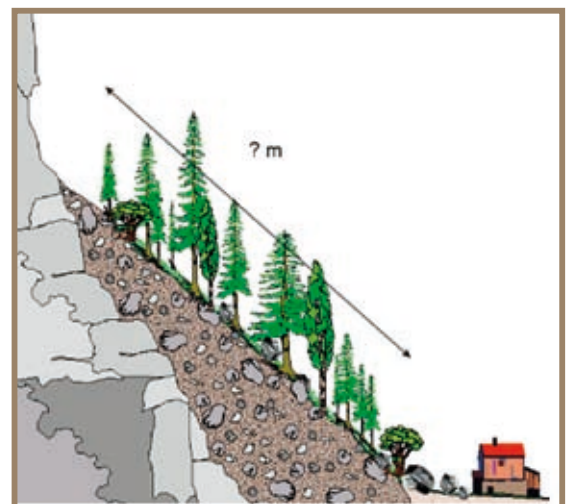


Figure 3.3.40 Schéma explicatif pour déterminer la longueur de la zone boisée.

Cemapel Deutsche Version
English version
Versione italiana

Dernière mise à jour : 20/11/2006

Rockfor^{NET} donne une estimation de l'aléa résiduel probable de chutes de pierres (ARP) à l'aval d'une forêt. L'ARP est le pourcentage des blocs sortant de l'écran forestier. Pour une pente donnée le calcul de l'ARP nécessite de remplir le formulaire ci-dessous. Le point (.) doit être utilisé comme séparateur décimal.

N'hésitez pas à nous contacter pour nous faire partager vos critiques ou questions.

Description du projectile

Diamètres du bloc (3x) (schéma) m

Géologie -

Forme du bloc -

Description du versant

Pente moyenne en degrés (schéma) °

Hauteur max. de la falaise (schéma) m

Longueur de la zone boisée (schéma) m

Distance d'entrée dans la zone boisée (schéma) m

Description de la zone boisée

Nbr. d'arbres à l'hectare ha⁻¹

Surface terrière totale (G_{tot}) m² ha⁻¹

OU

Diamètre moyen à hauteur de poitrine (DHP) cm

Répartition des essences présentes :

- Epicéa (*Picea abies*) %
- Sapin (*Abies alba*) %
- Mélèze (*Larix decidua*) %
- Pin noir (*Pinus nigra*) %
- Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) %
- Erable (*Acer pseudo-platanus*) %
- Hêtre (*Fagus sylvatica*) %
- Robinier faux-acacia (*Robinia pseudo-acacia*) %
- Chêne (*Quercus robur*) %

Calcul de l'aléa résiduel probable de chutes de pierres

Aléa résiduel probable = 0 %

Peuplement théorique pour un ARP < 1% :
Densité = 0 - arbres par ha
Diamètre moyen = - cm

Données utilisées pour le calcul

Diamètre du bloc = 0 m
Volume du bloc = 0 m³
Densité du rocher = 0 kg m⁻³
Masse du bloc = 0 kg
Energie cinétique = 0 kJ
DHP = 0 cm
Distance maximale = 0 m

Cemapel

Rockfor^{NET} est un outil de calcul probabiliste qui donne une estimation globale de l'ARP. Pour cette raison, c'est un outil d'aide à l'expertise et nous ne pourrions en aucun cas être tenu responsable de l'usage des informations calculées par Rockfor^{NET}.

Figure 3.3.41 La feuille de calcul Rockfor^{NET} disponible sur internet

Conditions et notice d'utilisation

Le choix d'avoir basé le principe général de calcul de Rockfor^{NET} sur la surface terrière a été dicté par la relation linéaire qui existe entre la surface terrière interceptée et la distance d'arrêt des blocs rocheux. La bonne corrélation entre la surface terrière réellement interceptée et celle théoriquement interceptable sur notre site expérimental, nous a servi de base pour construire notre indicateur du niveau de protection offert par une zone boisée et que nous avons dénommé l'Aléa Résiduel Probable.

Bien que cet utilitaire ait été élaboré à partir d'un seul site d'étude, nous pouvons au regard des travaux de test et validation effectués conclure que:

- il a été capable d'estimer l'ARP des sites tests avec un bon intervalle de confiance;
- le principe utilisé est valide.

L'erreur maximale est de 19% et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de 9.3%. En utilisant des classes de 25% (0-25% ... 75%-100%), notre utilitaire est en mesure d'estimer correctement:

- si des blocs rocheux sont capables de franchir un écran forestier;
- la perméabilité d'une zone boisée au regard de chutes de pierres et de blocs.

Etant donné que nous estimons que cet utilitaire est valide, nous l'avons traduit en italien, anglais, et en allemand.

En complément à cette conclusion les points forts de cet utilitaire sont:

- que les utilisateurs n'ont pas besoin de calibrer ce "modèle". Seules les données relatives à la description générale du versant étudié sont nécessaires;
- qu'il permet de réaliser rapidement un diagnostic forestier quant à la protection offerte par la couverture forestière présente sur un site;

- qu'il permet, en fonction des caractéristiques des projectiles, d'identifier le type de peuplement forestier offrant une protection optimale et ainsi de déterminer si oui ou non le forestier pourra obtenir ce peuplement idéal par des interventions sylvicoles ciblées.

Comme pour tout "modèle", plus cet utilitaire sera utilisé plus nous pourrions l'améliorer en tenant compte du *feed-back* des utilisateurs. C'est pour cette raison que nous avons:

- mis en place un système de comptabilité du nombre de fois où il est utilisé;
- nous demandons dans un premier temps aux utilisateurs de nous contacter si les résultats obtenus leur semblent aberrants;
- nous allons mettre en ligne un formulaire permettant de recueillir les valeurs des paramètres utilisés afin d'identifier et de comprendre les situations pour lesquelles l'ARP est en désaccord avec les données observées.

Il faut préciser que cet utilitaire ne fonctionne et ne peut fonctionner actuellement que pour des zones boisées. Toutes utilisations réalisées en dehors de ce contexte forestier n'engagent que l'utilisateur. Pour les taillis, l'utilitaire Rockfor^{NET} n'est pas valide.

De plus, l'ARP minimal a été fixé à 1% car le risque 0% n'existe pas tout comme il n'existe pas de protection à 100%. Pour procéder au calcul de l'ARP, l'utilisateur doit réaliser les 4 étapes suivantes qui sont détaillées dans la **figure 3.3.42**:

- décrire le projectile;
- décrire le versant;
- décrire la zone boisée;
- lancer le calcul de l'ARP.

Figure 3.3.42 Notice d'utilisation de l'utilitaire Rockfor^{NET}

The figure shows a screenshot of the RockforNET software interface with four main steps annotated:

- Etape 1: Description du projectile** (Description of the projectile): Entering three dimensions (length, width, thickness) and geological nature. Includes a diagram of a rock with dimensions 7m, 7m, and 7m.
- Etape 2: Description du versant (topographie)** (Description of the slope): Entering average slope angle, height of the cliff, and length of the wooded area. Includes diagrams of a slope and a cliff.
- Etape 3: Description de la zone boisée** (Description of the wooded area): Entering tree density and diameter. Includes a diagram of a forest.
- Etape 4: Calcul de l'ARP résiduel Probable de chutes de pierres** (Calculation of the residual probability of stone falls): The software calculates the ARP based on the input data. The screenshot shows a result of 0% ARP.

Additional notes on the right side of the screenshot:

- La densité d'arbres à l'hectare inclut tous les arbres (pas de diamètre de précomptables)
- Il est préférable que la somme des pourcentages fasse 100%
- La densité correspond à celle nécessaire pour avoir un ARP < 1% avec le diamètre moyen ou la surface terrière saisi par l'opérateur à l'étape 3
- Le diamètre moyen correspond à celui nécessaire pour avoir un ARP < 1% avec la densité saisi par l'opérateur à l'étape 3

La réalisation d'expérimentations virtuelles afin de construire des abaques pour quantifier la protection offerte par les principaux types de peuplement des Alpes du Nord

En plus de mettre en ligne sur internet cet utilitaire de calcul, nous avons décidé de réaliser une série d'expérimentations virtuelles afin de pouvoir fournir des abaques de détermination de l'ARP pour les principaux types de la typologie ONF-Cemagref des Alpes du Nord. Nous avons donc utilisé les caractéristiques dendrométriques des principaux types de peuplements décrits dans cette typologie, soit 13 au total sans les taillis, pour calculer l'ARP en faisant varier:

- La composition en essence:
 - 100% d'épicéa;
 - 60% de sapin-40% d'épicéa;
 - 40% d'épicéa-30% de sapin-30% de hêtre;
 - 80% de hêtre-20% de sapin.

Pente	Longueur boisée	Hauteur de chute														
		10 m					50 m					100 m				
		blocs 0.25 m ³	blocs 0.5 m ³	blocs 1 m ³	blocs 2.5 m ³	blocs 5 m ³	blocs 0.25 m ³	blocs 0.5 m ³	blocs 1 m ³	blocs 2.5 m ³	blocs 5 m ³	blocs 0.25 m ³	blocs 0.5 m ³	blocs 1 m ³	blocs 2.5 m ³	blocs 5 m ³
30°	250	1	1	1	1	1	1	1	1	34	58	1	3	39	67	79
	500	1	1	1	1	1	1	1	1	1	16	1	1	1	34	58
	750	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
35°	250	1	8	42	68	80	1	34	58	77	86	23	51	69	83	90
	500	1	1	1	44	65	1	1	24	59	74	1	9	43	69	80
	750	1	1	1	16	47	1	1	1	38	61	1	1	14	53	71
40°	250	5	40	62	80	87	26	53	71	84	90	42	63	77	87	92
	500	1	1	25	59	74	1	6	41	68	80	1	26	54	75	84
	750	1	1	1	39	61	1	1	12	52	70	1	1	30	62	76
45°	250	30	56	72	85	90	43	64	77	88	92	53	71	81	90	94
	500	1	11	44	70	81	1	28	54	75	84	6	41	63	80	87
	750	1	1	16	55	71	1	1	32	63	77	1	12	44	70	81

Tableau 3.3.14 Tableau de présentation des résultats de calcul de l'ARP pour le type de peuplement 1 avec un mélange de 80% de hêtre-20% de sapin et une distance d'entrée de 25 m

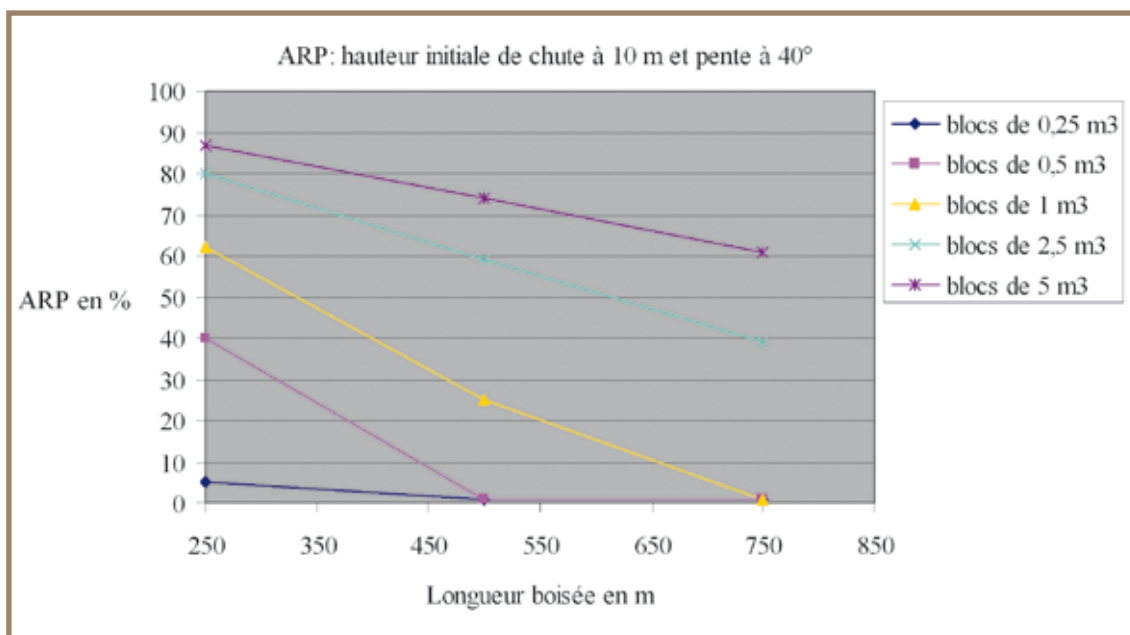


Figure 3.3.45

Représentation graphique des résultats de calcul de l'ARP pour le type de peuplement 1 avec un mélange de 80% de hêtre-20% de sapin, une distance d'entrée de 25 m, une hauteur de chute initiale de 10 m et une pente de 40°

Construction avec Rockyfor d'une grille de classification pour quantifier la protection offerte par les principaux types de peuplement des Alpes du Nord

Le modèle de simulation numérique de trajectographie Rockyfor (Dorren et al., 2006) est un modèle de type process-based et distribué spatialement ce qui lui permet de modéliser en 3 dimensions le déplacement d'un bloc rocheux sur une pente. Ce modèle utilise des algorithmes mathématiques lui permettant de simuler le vol parabolique d'un bloc et les rebonds sur le sol. Il utilise une représentation en 3 dimensions du terrain sous la forme d'un modèle numérique de terrain (MNT) de type raster (représentation du terrain sous la forme d'un maillage carré). Il prend en compte la présence d'arbres sur le terrain en temps qu'obstacles potentiels. L'approche utilisée est de type probabiliste. Pour chacun des points de départ identifiés sur le terrain, 10 000 simulations sont réalisées en faisant varier aléatoirement (dans l'intervalle de valeurs déterminé lors de la phase de terrain) les paramètres de calculs lors des rebonds. Le projectile est assimilé à un point mathématique (méthode de la masse concentrée) auquel est associée une information sur son volume.

Les principaux calculs réalisés par ce modèle sont:

- la trajectoire de chacun des projectiles;
- la vitesse de translation en tout point de la trajectoire;
- la hauteur de passage en tout point de la trajectoire;
- la déperdition d'énergie pour tout rebond au sol et tout impact sur des arbres.

Principe de prise en compte de la végétation forestière dans le logiciel de simulation trajectographique en 3D Rockyfor

Le calcul de la dissipation d'énergie occasionnée par l'impact sur un arbre nécessite de connaître la position des blocs rocheux avant l'impact, son énergie cinétique, la position de l'arbre, son diamètre et son essence. Les arbres peuvent être parfaitement positionnés si on connaît leurs positions exprimées en XY, et dans le cas contraire randomisé pour chaque maille de calcul à partir du nombre moyen d'arbre par hectare et de la distribution observée des diamètres. Etant donné que la propagation du bloc est modélisée en 3 dimensions, la position exacte du bloc est connue pour chacune des mailles de calcul. Si un impact a lieu, la dissipation d'énergie est calculée avec l'algorithme suivant (figure 3.3.46):

$$\Delta E = -0.046 + \frac{0.98 + 0.046}{1 + 10^{(0.58 - ((Pi - Cv) / 0.5 \cdot DBH)) - 8}} \quad (3.3.4)$$

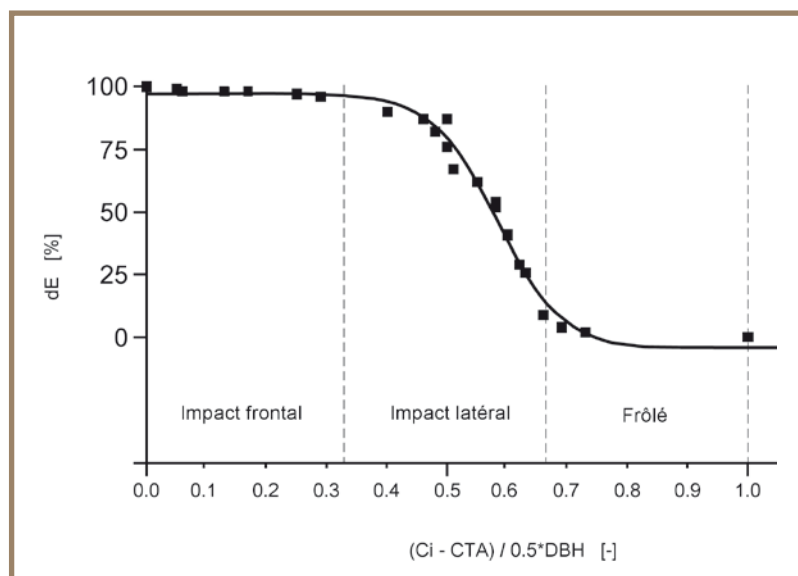


Figure 3.3.46 Pourcentage de l'énergie maximale [KJ] que peut dissiper un arbre en fonction du rapport de distance entre le point d'impact et le rayon de l'arbre [exprimé en 1/10]. Les carrés roses représentent les données observées et les points bleus les données calculées avec notre équation

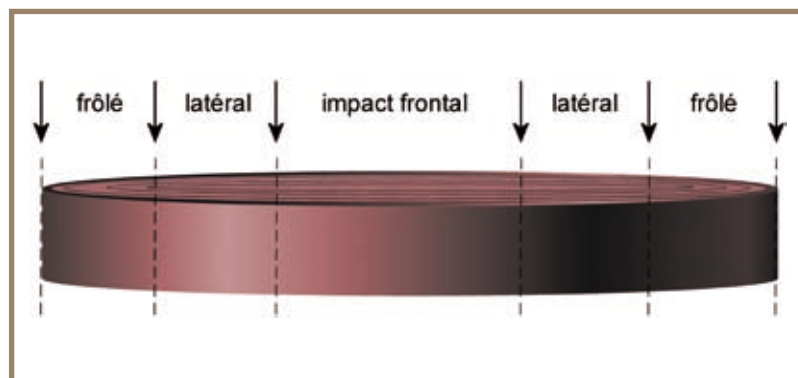


Figure 3.3.47 Définition des types d'impacts sur un arbre

avec:

ΔE pourcentage de l'énergie maximale que peut dissiper un arbre (%)

$Pi - Ct$ distance horizontale entre le centre du point d'impact et centre de l'arbre (m)

DHP diamètre de l'arbre à hauteur de poitrine (mesurée à 1.30 m) (m)

L'énergie maximale que peut dissiper un arbre ($E_{max\ diss}$) est déterminée par son diamètre et son essence. Pour le sapin l'algorithme est le même que pour Rockyfor^{NET} à savoir:

$$E_{max\ diss} = 38.7 \cdot DHP^{2.31} \quad (3.3.5)$$

La déviation latérale est quant à elle déterminée en utilisant les matrices de déviation observées sur notre site expérimental. Il existe trois grands types d'impacts (figures 3.3.47 et 3.3.48):

- impact frontal, si le bloc percute l'arbre dans une zone de 1/6 de part et d'autre de son centre;
- impact latéral si le bloc percute l'arbre dans une zone de 1/6 de part et d'autre de la zone centrale;
- impact frôlé (*scratch* en anglais) si le bloc percute l'arbre dans une zone de 1/6 de part et d'autre de la zone latérale.

Pour chacun de ces types d'impacts nous disposons des matrices de fréquences des déviations observées. Le modèle déterminant la position de l'impact sur le diamètre, il affecte à cet impact une valeur de déviation par tirage au sort dans la matrice de déviation correspondant au type d'impact (tableau 3.3.15 et figure 3.3.49).

Figure 3.3.48 Exemple de définition sur le site des types d'impact sur un arbre

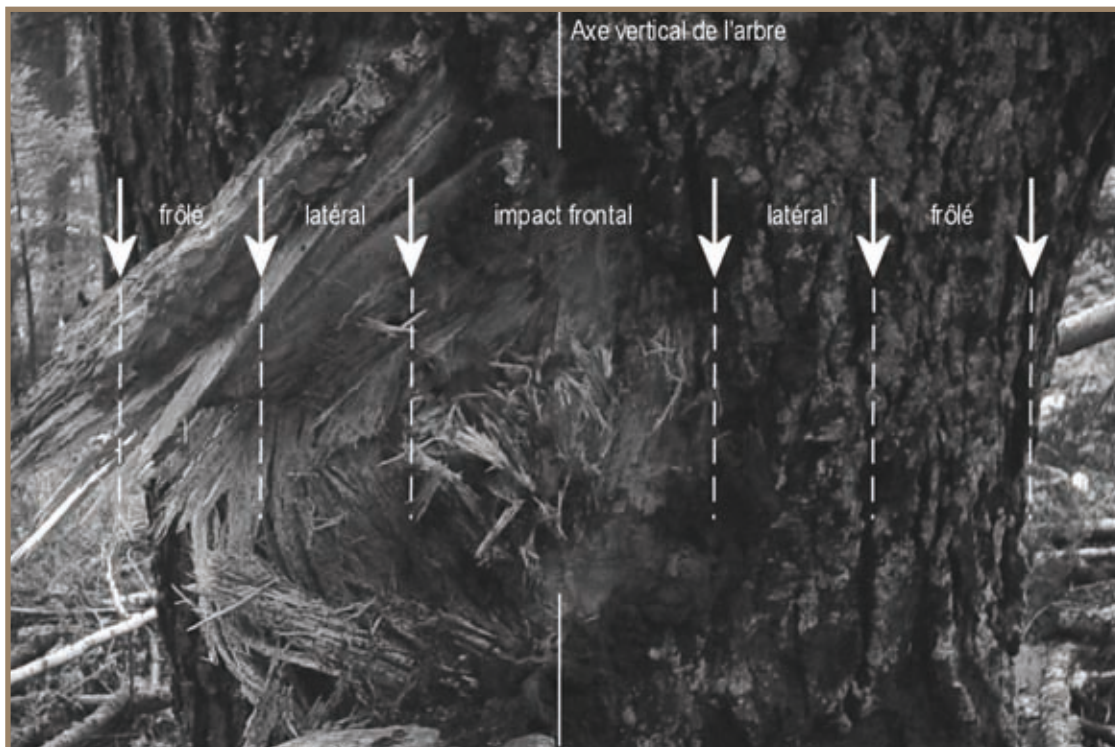
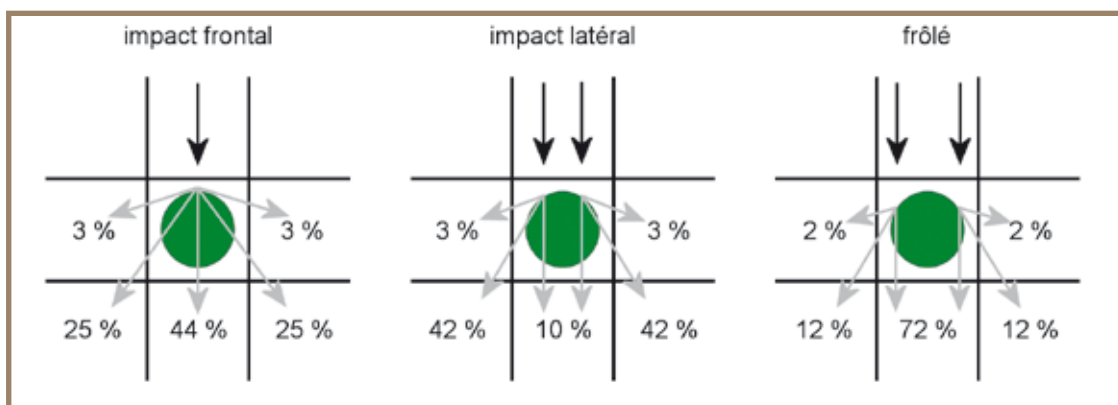


Tableau 3.3.15 Pourcentage d'occurrence des types d'impacts et efficacité de ces impacts

Essence épreuve bois vert sans écorce: Longueur = 20 cm Section = 4 cm ²	k = énergie absorbée par l'éprouvette			ratio abies = essence de référence
	kmin (en J)	kmoyen (en J)	kmax (en J)	
<i>Pinus uncinata</i>	12.9	12.9	12.9	0.66
<i>Cedrus</i>	13	13	13	0.67
<i>Pinus pinaster</i>	14	14	14	0.72
<i>Picea</i>	16	17.5	19	0.9
<i>Larix</i>	16	17.65	19.3	0.91
<i>Abies</i>	17	19.5	22	1
<i>Pinus nigra</i>	21.8	21.8	21.8	1.12
<i>Pinus sylvestris</i>	22	22	22	1.13
<i>Pseudotsuga</i>	22	22	22	1.13
<i>Acer</i>	22	22	22	1.13
<i>Fraxinus</i>	29	29	29	1.49
<i>Prunus</i>	30	30	30	1.54
<i>Carpinus</i>	30	30	30	1.54
<i>Fagus</i>	30	32.5	35	1.67
<i>Quercus</i>	35	42.5	50	2.18
<i>Robinia</i>	46	53.5	61	2.74

Figure 3.3.49 Déviation latérale d'un bloc après impact sur un arbre (représenté par un carré vert)



Ces algorithmes ont été développés par Dorren et Berger (2006) et sont basés sur l'utilisation de données obtenues lors d'expérimentations grandeurs nature réalisées dans les Alpes du Nord françaises (Dorren et al., 2005). Le modèle Rockyfor utilise le sapin comme essence de référence pour calculer la capacité de dissipation d'énergie de 10 autres essences.

Durant la phase aérienne de sa propagation, la vitesse du bloc est calculée en utilisant les algorithmes classiques d'un mouvement parabolique uniformément accéléré. La déperdition d'énergie lors des rebonds au sol est déterminée par l'élasticité du sol, exprimée par un coefficient de restitution normal r_n , et par la rugosité de la pente, exprimée par un coefficient de restitution tangentiel r_t . Le paramètre le plus important pour le calcul de la variation de vitesse est le coefficient de restitution tangentiel. Ce coefficient est déterminé par la composition, la taille des matériaux recouvrant la pente et par le diamètre du bloc (Kirkby et Statham, 1975). Ainsi, dans Rockyfor le coefficient de restitution tangentiel est calculé à partir du rayon du bloc en mouvement et du rayon moyen des éléments au sol. La formule de calcul est la suivante:

$$r_t = \frac{1}{1 + (MHO / R_{\text{bloc}})} \quad (3.3.6)$$

avec:

MHO hauteur maximale des éléments au sol (m)

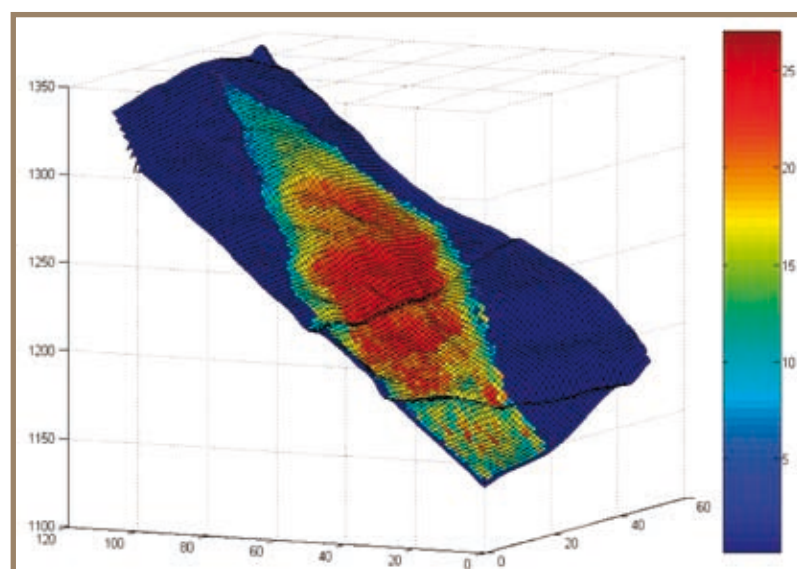
R_{bloc} rayon du bloc en mouvement (m)

Au sein de Rockyfor la valeur de r_t ne peut être supérieure à 0.99 et inférieure à 0.1. Même si les valeurs génériques de r_n et r_t sont données dans la littérature scientifique (e.g., Pfeiffer et Bowen, 1989; Chau et al., 2002; Guzzetti, 2002; Dorren et Seijmonsbergen, 2003), les données d'entrées que nous utilisons pour caractériser le coefficient r_t sont obtenues à partir d'observation de terrain et ce pour chacun des sites étudiés. Etant donné que le r_t a une très forte influence sur le calcul de la vitesse après un rebond, il doit donc être déterminé le plus précisément possible pour chacun des sites d'études. Lors du calcul de la vitesse après un rebond, la valeur du r_t calculée avec la formule ci-dessus est randomisée avec un seuil de 10% afin de rendre compte de la variabilité de la taille des matériaux présents au sol.

Etant donné que le modèle Rockyfor utilise des algorithmes stochastiques et afin d'obtenir par simulation numérique une distribution statistique robuste, entre 100 et 10 000 simulations pour chacun des points de départ sont normalement exécutés.

Figure 3.3.50 Exemple de résultat cartographique obtenu avec Rockyfor

L'objectif de ce modèle est de cartographier les zones parcourues par les chutes de pierres simulées. A chacune des mailles du modèle numérique de terrain sont associées des informations concernant le nombre de projectiles atteignant une cellule, le nombre de projectiles s'arrêtant dans une cellule, la hauteur maximale et moyenne des rebonds (m), calculée selon la composante normale à la pente, l'énergie cinétique moyenne et maximale calculée (kJ) (figure 3.3.50).



Le nombre de projectiles atteignant une cellule, le nombre de projectiles s'arrêtant dans une cellule, la hauteur maximale et moyenne des rebonds (m), calculée selon la composante normale à la pente, l'énergie cinétique moyenne et maximale calculée (kJ) (figure 3.3.50).

Présentation de la grille de classification obtenue avec Rockyfor pour quantifier la protection offerte par les principaux types de peuplement des Alpes du Nord

Comme avec Rockyfor^{NET}, nous avons utilisé notre logiciel Rockyfor pour réaliser des expérimentations virtuelles pour caractériser l'action de chacun des principaux types de peuplements de la typologie Massif Alpin. Les résultats obtenus sont synthétisés dans une grille de classification. Afin de pouvoir

comparer les types de peuplements entre eux, nous avons utilisé les mêmes conditions expérimentales. De plus afin de comparer à la réalité l'action de chacun des types de peuplements nous avons décidé de nous placer dans les mêmes conditions que celles de notre site expérimental.

Le **tableau 3.3.16** présente les valeurs des paramètres dendrométriques des types de peuplements utilisés lors de ces travaux de simulations.

Type	Nombre d'arbre par hectare	Diamètre moyen (en cm)	Ecart type (en cm)
1	302	33.44	13.42
1GB	263	52.07	10.58
2	521	24.18	13.19
2GB	45	31.58	15.12
12	545	19.22	10.56
12GB	311	29.34	19.2
13	355	26.18	16.22
13GB	489	24.47	18.31
C	328	22.97	13.3
J	540	19.17	10.6

Tableau 3.3.16 Les paramètres dendrométriques de la typologie Massif Alpin

Après calcul, le logiciel nous donne pour l'écran de calcul que nous avons positionné sur le MNT les informations suivantes:

- *E max* en kJ: l'énergie maximale atteinte par un des blocs sur la zone;
- *E max moy* en kJ: la moyenne des énergies maximales pour chaque pixel sur la zone;
- *E max et*: l'écart type des énergies maximales de chaque pixel sur la zone;
- *E moy*: la moyenne de l'énergie de chacun des blocs passant dans la zone;
- *H max* en m: la hauteur maximale atteinte par un des blocs sur la zone;
- *H moy*: la hauteur moyenne de tous les blocs passant dans la zone;
- *H et*: l'écart type des hauteurs de tous les blocs passant dans la zone;
- *V max* en $m \cdot s^{-1}$: la vitesse maximale atteinte par un des blocs sur la zone;
- *V max moy*: la moyenne des vitesses maximales pour chaque pixel sur la zone;
- *V max et*: l'écart type des vitesses maximales de chaque pixel sur la zone;
- *V moy*: la moyenne de la vitesse de chacun des blocs passant dans la zone.

Le **tableau 3.3.17** présente les paramètres avec lesquels nous avons comparé la fonction de protection des peuplements les uns par rapport aux autres. Les comparaisons ont ainsi été réalisées avec les valeurs calculées par simulation pour chacun des types de peuplements. La modalité "sans" correspond au scénario terrain nu, c'est-à-dire sans aucune végétation forestière. La modalité "Vaujany" correspond au peuplement actuellement présent sur notre site expérimental.

Tableau 3.3.17
Comparaison et hiérarchisation de la fonction de protection des peuplements de la typologie Massif Alpin

Peuplement	E max moy	H moy	V max moy
Sans	300.25	2.01	14.34
C	285.87	1.85	14.26
2 GB	285.70	1.92	14.69
Vaujany	283.45	1.89	14.04
1 GB	277.61	1.91	14.15
1	274.82	1.89	13.73
1 – 2 GB	273.46	1.80	13.83
1 – 3	270.77	1.77	13.74
2	265.68	1.78	13.95
1 – 3 GB	262.15	1.76	13.92
J	257.58	1.75	13.53
1 – 2	256.98	1.74	13.62

La classification proposée dans le **tableau 3.3.17**, ne concerne que l'action des différents peuplements sur les paramètres cinématiques. Elle complète ainsi, de part cette approche cinématique, la notion d'ARP qui a été utilisée pour construire les abaques présentés précédemment. Il est intéressant de noter que les futaies adultes à deux strates et que les peuplements jardinées offrent la meilleure protection. Le même résultat est obtenu avec Rockfor^{NET}. Ces résultats confirment et valident les affirmations des gestionnaires forestiers quant à l'efficacité de structure irrégulière et le fait que de peuplements surannées offrent une moins bonne protection.

Evaluation de l'efficacité des taillis avec RockCop

Jusqu'à la réalisation de ces travaux, les modèles de trajectographie qui intègrent l'action de la végétation forestière permettaient de prendre en compte que des peuplements de type futaie, qui se caractérisent par la présence d'arbres individualisés pouvant avoir des âges différents mais tous issus de graines et avec une répartition spatiale aléatoire. Or à des altitudes comprises entre 200 et 1 200 m les taillis de feuillus représentent une forte proportion des peuplements présents dans les Alpes du Nord (IFN 1998). D'après Mayer (1980) les taillis sont des peuplements créés par l'homme suite à la réalisation de coupe à blanc et de la faculté qu'ont certaines essences à rejeter de souche. Ce type de peuplement a longtemps été utilisé par les populations locales pendant des siècles pour obtenir des bois de faibles diamètres et ce pour différents usages (bois énergie, clayonnage, etc.) (Agnoletti, 2002). Généralement un taillis est un peuplement jeune qui se caractérise par une structure horizontale de type agrégée. Ceci est dû à la présence de cépée d'arbres qui se développe à partir des rejets de souches (**figure 3.3.51**).

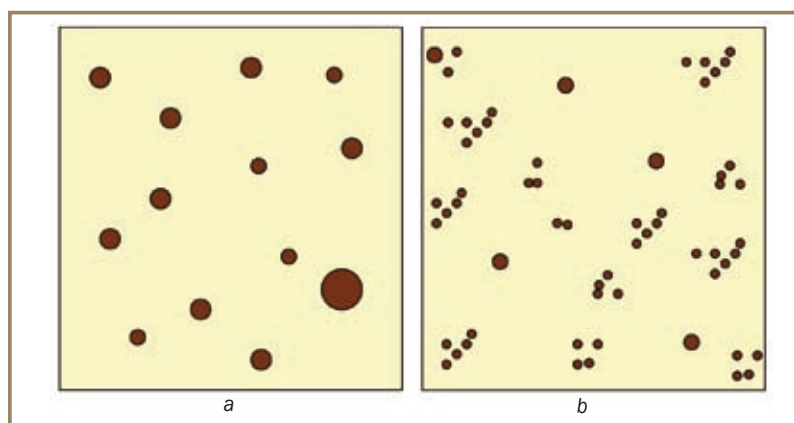


Figure 3.3.51 Structure horizontale type d'une (a) futaie et d'un (b) taillis

Dans les Alpes, les populations locales ont traditionnellement maintenu des taillis en bas de versants et ce pour des raisons de logistique pour l'alimentation des foyers en bois de feu. Logiquement ces populations avaient déjà remarquées que la forte densité des tiges au sein de ce type de peuplement limitait la propagation des pierres. Jusqu'à aujourd'hui, l'effet protecteur des taillis est mentionné dans les guides de sylviculture (Gsteiger, 1993; Wasser et Frehner, 1996; Schwitter, 1998, Gauquelin et Courbaud, 2006), mais cet effet n'a jamais été quantitativement évalué. Nos travaux ont donc eu pour objectif d'apporter des éléments de réponses à cette question. Dans le cadre de ces travaux nous nous sommes focalisés sur le lien qui existe entre l'âge des taillis et leurs caractéristiques aussi bien dendrométrique qu'en termes de protection. C'est la raison pour laquelle nous avons choisis 13 sites d'études sur lesquelles les taillis sont dus à la réalisation d'une coupe à blanc (**figure 3.3.52**).

Figure 3.3.52 Cépée de noisetiers (a) *Corylus avellana* L. et d'aliziers blancs (b) *Sorbus aria* L.



Le rejet de souche

La reproduction végétative par le biais du rejet de souche est une des formes communes de stratégie d'adaptation aux perturbations et de persistance des plantes ligneuses (Grime, 2001). Cette capacité est due à la présence de bourgeon adventice et dormant. Sous nos latitudes la majorité des essences feuillues ont cette capacité. Mais l'expression de cette capacité varie largement d'une essence à l'autre et dépend de l'historique du peuplement (Bond et Midgley, 2001). En règle générale le rejet de souche est favorisé par un climat tempéré, une longue période de végétation, des sols riches en nutriments, une quantité d'eau et un éclaircissement suffisants et l'absence de gelées tardives (Mayer, 1980).

Les relevés de terrain

Les placettes d'inventaires ont une surface variant de 225 à 750 m². La localisation de ces placettes dépend de l'homogénéité des peuplements et de la topographie (pente régulière ou non). La surface des placettes a été déterminée en fonction de la densité des peuplements.

Dans ces placettes, nous avons inventorié et cartographié tous les arbres vivants et morts, les cépées, et ce avec un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de plus de 2.5 cm. Les essences ont été inventoriées. Le volume de bois mort au sol a été mesuré par un comptage exhaustif sur ¼ de la surface des placettes. Toutes les tiges de plus de 1.3 m de long et ayant un diamètre compris entre 2.5 et 10 cm ont été classées dans la catégorie des petits bois et n'ont fait l'objet que d'une numération. Au delà de 10 cm de diamètre la totalité de la tige a été mesurée et classée dans la catégorie gros bois.

L'âge des peuplements a été déterminé pour chacune des placettes en prélevant une carotte de bois à la tarière de Pressler sur les 10 tiges ayant le plus fort diamètre. Ces carottes ont été analysées avec une table de lecture connectée à un ordinateur. Pour certaines des placettes, des informations complémentaires ont été obtenues par l'analyse des photographies aériennes, la consultation des aménagements forestiers et par interview des propriétaires privés.

Principe de la simulation de chutes de pierres en 2D dans les taillis

Pour étudier l'action des taillis sur la propagation des chutes de pierres nous avons réalisé des expériences grandeur nature dans des taillis afin de valider notre méthode de calcul de la dissipation d'énergie par une cépée et développé un modèle en 2D spécifique à l'étude des taillis: RockCop. Nous avons défini 9 scénarios de simulation dans lesquels seul la pente et le diamètre du projectile varient (**tableau 3.3.18**).

Tableau 3.3.18 Données d'entrées pour les 9 scénarios de modélisation utilisés

Scénario	Diamètre du bloc (en m)	Pente (en °)	Hauteur de chute initiale (en m)	Distance d'entrée en forêt (en m)	Longueur de la pente boisée (en m)	Largeur de la pente boisée (en m)	Nombre de simulations
1	0.2	32	10	20	42.4	30	1 000
2		35					
3		38					
4	0.5	32					
5		35					
6		38					
7	1	32					
8		35					
9		38					

Les données dendrométriques proviennent de nos placettes d'inventaires incluant les positions en x et y de toutes les tiges debout de plus de 2.5 cm de diamètre. Afin de pouvoir comparer les résultats des travaux de simulation nous avons généré à partir de ces données des placettes virtuelles de 42.4 m x 30 m.

Afin de simuler de façon réaliste les chutes de pierres dans un taillis, le modèle doit prendre en compte:

- la trajectoire de chacun des blocs;
- l'énergie cinétique de chacun des blocs;
- l'énergie cinétique dissipée par les l'impact avec les brins de taillis.

La trajectoire de chacun des blocs est définie par une ligne droite reliant le point de départ en falaise au bas de la pente, avec une déviation latérale maximale de 10° de par et d'autre du point de départ. Lors de chaque run, le point de départ et la direction initiale sont choisies de façon aléatoire en utilisant la méthode dite de Monte-Carlo. La largeur de la trajectoire est fixée au 2/3 du diamètre du bloc, représentant ainsi une zone d'interception du projectile égale de par et d'autre de l'axe de la trajectoire. Le 1/3 négligé représente la faible dissipation d'énergie que représentent les impacts de types frôlés avec les arbres (Dorren et Berger, 2006). La masse du bloc m [kg] est calculé, à partir de la masse volumique fixée à $\rho = 2\,500$ kg/m³ et du volume du projectile V [m³] = $4/3 \cdot \rho \cdot r^3$, en utilisant la formule:

$$m = \rho \cdot V \quad (3.3.7)$$

Le calcul de l'énergie cinétique du bloc est réalisé en utilisant le principe de la ligne d'énergie de Heim (1932) et adapté par Toppe (1987), Gerber (1998) et Meissl (1998). L'idée de base de ce principe est qu'une ligne fictive permet de relié le point de départ au point maximal d'arrivé sur une pente non boisée. Cette ligne est dénommée ligne d'énergie. A partir de nos expérimentation et de l'analyses de phénomènes bien documentés nous avons fixé la valeur de l'angle de la ligne d'énergie à $\beta = 31^\circ$ (Berger et Dorren, 2007). Ce modèle permet de calculer l'énergie cinétique d'un projectile en tout point de cette ligne d'énergie en considérant qu'elle est égale à l'énergie potentielle de celui-ci. Ainsi, l'énergie du projectile en un point de la ligne d'énergie est déterminée par sa masse m [kg], la différence d'altitude h [m] entre la ligne d'énergie et le terrain au point de calcul, t , et $g = 9.81$ m s⁻², de la manière suivante:

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h \quad (3.3.8)$$

Le calcul de l'énergie dissipée par un arbre est basé sur son essence et son DHP. Là encore, la déperdition d'énergie due aux impacts de types frôlés sont négligés et seul la moitié du diamètre des arbres est prise en compte. Ainsi, pour les taillis nous avons établi la règle suivante pour le calcul de dissipation d'énergie par un brin de taillis: seul les 2/3 du diamètre des projectiles est pris en compte et peut interférer avec seulement la moitié du diamètre des brins constituant le taillis (figure 3.3.53).

Le calcul de dissipation d'énergie par une cépée est basé sur l'utilisation du modèle que nous avons élaboré pour un arbre seul (en utilisant le sapin. comme essence de référence) et en lui intégrant un facteur de correction que nous appelons Facteur Arbre FA. Ce facteur est calculé à partir de nos premiers résultats expérimentaux d'impact de cépées et sur les données disponibles sur la résistance au choc du matériau bois. (Dorren et Berger, 2006). Nous obtenons ainsi la formule suivante:

$$E_{\text{max diss}} = 38.7 \cdot \text{DBH}^{2.31} \cdot \text{FA} \quad (3.3.9)$$

Le **tableau 3.3.19** présente les valeurs de FA que nous avons utilisées.

Figure 3.3.53 (a) trajectoires et arbres impactés (en rouge) dans un taillis. (b) Trajectoire et zone d'interception entre le projectile et les arbres. L'arbre A est considéré comme impacté alors que l'arbre B ne l'est pas. (c) Profil énergétique d'un projectile impactant des arbres calculé à partir de l'intégration de la végétation forestière dans un modèle utilisant le principe de la ligne d'énergie

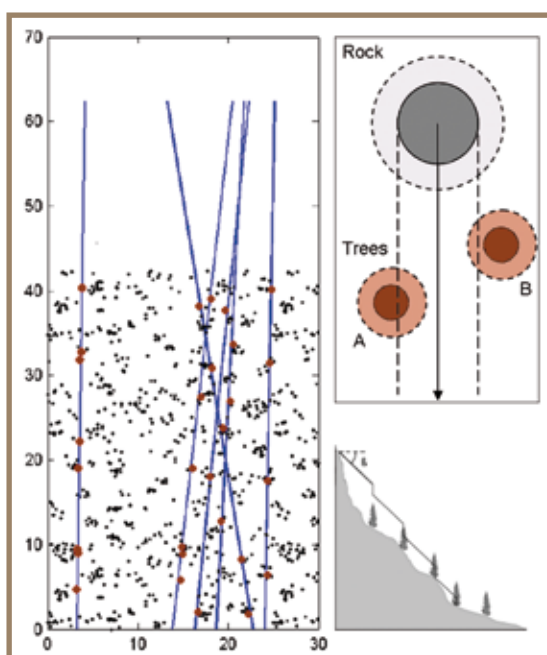


Tableau 3.3.19 Valeur du Facteur Arbre exprimé en ratio par rapport au sapin (*Abies alba*)

Peuplement	E max moy	H moy	V max moy
Sans	300.25	2.01	14.34
C	285.87	1.85	14.26
2 GB	285.70	1.92	14.69
Vaujany	283.45	1.89	14.04
1 GB	277.61	1.91	14.15
1	274.82	1.89	13.73
1 – 2 GB	273.46	1.80	13.83
1 – 3	270.77	1.77	13.74
2	265.68	1.78	13.95
1 – 3 GB	262.15	1.76	13.92
J	257.58	1.75	13.53
1 – 2	256.98	1.74	13.62

Pour chacun des 13 sites, nous avons testé les 9 scénarios en simulant la chute de 1 000 blocs. Le **tableau 3.3.20** présente les données calculées par le modèle. Les variables ARP, EMR et DME sont les facteurs les plus explicatifs de la protection offerte par les taillis. Pour chacun des sites nous avons déterminé 4 classes pour ces variables. Au final nous avons combiné ces variables pour élaborer un Indice de Protection contre les chutes de Pierres (IPP) pour les taillis. Cet indice varie de 1 (la meilleure protection possible) à 4 (pas de protection). Le **tableau 3.3.21** présente la pondération de chacune des variables utilisées pour construire cet indice.

Tableau 3.3.20 Les données calculées par le modèle

	Données calculées	Explication
1	Nombre moyen d'impacts (incluant l'écart type)	
2	Distance moyenne entre les arbres impactés (incluant l'écart type)	
3	Energie moyenne dissipée par impact en kJ (incluant l'écart type)	
4	Energie moyenne dissipée exprimée en % (incluant l'écart type)	Moyenne ((énergie dissipée / énergie des blocs en sortie de la zone en faisant abstraction de la végétation forestière)*100)
5	Energie moyenne résiduelle en kJ (incluant l'écart type) (EMR)	Energie moyenne des blocs en sortie de la zone boisée
6	Energie maximale résiduelle en kJ (incluant l'écart type)	Energie maximale des blocs en sortie de la zone boisée
7	Energie minimale résiduelle en kJ (incluant l'écart type)	Energie minimale des blocs en sortie de la zone boisée
8	Aléa Résiduel Probable en % (ARP)	(nombre de blocs sortant de la zone boisée/ nombre total de bloc entrant dans la zone boisée)*100
9	Dissipation maximale d'énergie en % (DME)	(énergie maximale en sortie de la zone boisée/énergie des blocs en sortie de la zone en faisant abstraction de la végétation forestière)*100

Tableau 3.3.21 Les variables utilisées pour construire l'IPP

Donnée d'entrée	Rang	Critères du groupe	Pondération pour l'IPP
RRH	1	0 - 25%	60%
	2	>25 - 50%	
	3	>50 - 75%	
	4	>75 - 100%	
RRE	1	-∞- 0kJ	20%
	2	>0 - 100kJ	
	3	>100 - 200kJ	
	4	>200 - 500kJ	
MER	1	48.8 - 58.3	20%
	2	> 58.3 - 67.8	
	3	>67.8 - 77.3	
	4	>77.3 - 86.8	

La réalisation d'expérimentation grandeur nature d'impact d'un projectile dans des cépées de taillis

Nous avons réalisé en juin 2007 les premières expérimentations réalisées à ce jour dans des taillis. Au total nous avons impacté 5 cépées. Notre dispositif expérimental consiste à tendre un câble porteur qui passe au travers d'une cépée. Puis de lâcher le long de ce câble une boule d'acier de 250 kg qui vient impacter la cépée. Le déplacement de cette boule est filmé en plan fixe par une caméra vidéo numérique

à prise de vue rapide (250 images/sec). Les films sont ensuite analysés avec deux logiciels de traitement d'images. Les données collectées lors de ces premières expérimentations nous ont permis d'acquérir les



Figure 3.3.54 Extraits des films vidéographique numériques réalisés lors de nos expérimentations grandeur nature. La vitesse de la boule d'acier est de 15 m/s lorsqu'elle percute la cèpée

données pour valider notre principe de modélisation de la dissipation d'énergie d'une cèpée. La **figure 3.3.54** est un extrait d'un des films réalisés lors de ces expérimentations.

De l'analyse de ces films il ressort que pour estimer l'énergie que peut dissiper une cèpée il est nécessaire de combiner les deux modèles que nous avons construits lors de nos expériences grandeur nature sur des arbres en futaie. Le premier de ces modèles permet de calculer l'énergie maximale nécessaire pour casser un arbre lors d'un impact frontal (le centre de gravité du bloc est aligné avec l'axe central de l'arbre) par un bloc rocheux. Le deuxième, quant à lui, permet de calculer en fonction du point d'impact du bloc rocheux sur le diamètre de l'arbre, le pourcentage de l'énergie maximale (lors d'un impact frontal) qui sera dissipée. Dans le cas d'une cèpée, l'impact d'un bloc rocheux générera plusieurs types d'impacts: des frontaux, des latéraux et des frôlés. La question est donc: pour un bloc de volume donné et une cèpée donnée qu'elle sera la répartition entre ces 3 types d'impacts ? Nos films vidéo numériques ainsi que notre cartographie

(localisation en xy de tous les brins d'une cèpée) des cèpées de notre site expérimental ont apporté des réponses à ces questions.

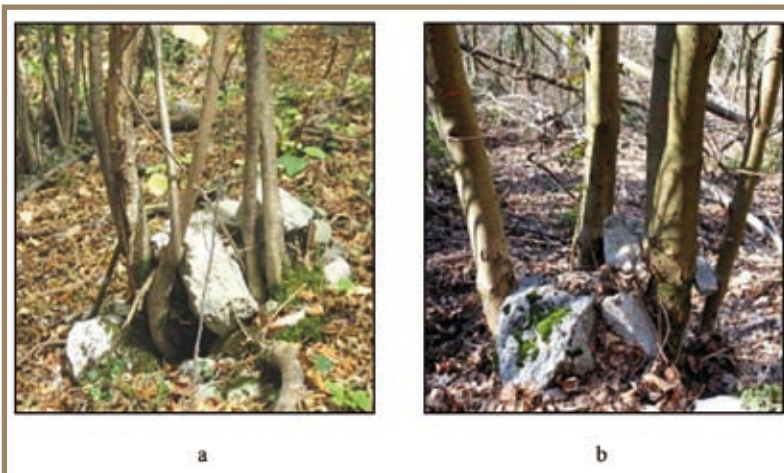
Il s'avère que seuls les brins situés dans la zone impactée par le tiers central du projectile sont brisés par celui-ci. Les brins situés dans la périphérie de cette zone et dans celle d'influence du projectile sont simplement "poussés" sur le côté. A partir de ce constat (qui, bien évidemment, nécessite d'être vérifié par d'autres expériences), nous avons calculé l'énergie théoriquement dissipable par les cèpées utilisées lors de nos expériences. Pour cela, nous avons calculé avec notre formule l'énergie maximale dissipable par un brin d'un diamètre donné. Cette énergie correspond à celle que peut dissiper un brin en fonction de son diamètre et ce pour un impact frontal. Pour les autres impacts, nous avons utilisé notre deuxième modèle qui détermine le pourcentage d'énergie maximale dissipable en fonction de la localisation du point d'impact sur le diamètre d'un brin. D'après nos films, nous avons décidé de négliger les impacts frôlés. De plus, pour les impacts latéraux ceux-ci semble se produire au milieu de la zone latérale des brins. Cela se traduit par une valeur de dissipation de 50% de l'énergie maximale dissipable par un brin.

A partir de ces constats réalisés sur nos images, nous avons donc utilisé nos modèles en conséquence. On obtient ainsi pour les films analysés:

- Film 1, expérience 1:
 - énergie totale de la sphère: 23 864 J;
 - énergie totale dissipée par la cèpée: 21 075 J;
 - énergie dissipée en % de l'énergie totale de la sphère: 88.32%;
 - nombre de brins sollicités: 7 sur un total de 29 brins présents dans la cèpée lors de l'impact;
 - nombre de brins cassés: 2;
 - énergie maximale théoriquement dissipable: 20 980 J;
 - part de l'énergie dissipée observée expliquée avec notre modèle: $20\,980/21\,075 = 99.56\%$.

- Film 4, expérience 4:
 - énergie totale de la sphère: 13 031 J;
 - énergie totale dissipée par la cépée: 9 375 J;
 - énergie dissipée en % de l'énergie totale de la sphère: 71.94%;
 - nombre de brins sollicités: 4 sur un total de 4 brins présents dans la cépée lors de l'impact;
 - nombre de brins cassés: 4;
 - énergie maximale théoriquement dissipable: 9 244 J;
 - part de l'énergie dissipée observée expliquée avec notre modèle: $9\,244/9\,375 = 98.60\%$.
- Film 2 et 3, expérience 2 et 3: inutilisable car la sphère a oscillé latéralement et a ainsi évité la cépée.

Figure 3.3.55 Cépée agissant comme "piège à blocs". (a) *Corylus avellana* L. (b) *Acer pseudo-platanus* L.



Au regard de ces premiers résultats, il semble que notre principe de calcul pour estimer l'énergie maximale que peut dissiper une cépée et ce en fonction du volume du projectile et de la composition en brins de la cépée soit cohérent avec les données observées. En attendant de réaliser d'autres expériences (prévues au printemps 2008) pour assoir la validation de ce principe de calcul, nous avons décidé de l'utiliser pour la suite de nos travaux (figure 3.3.55).

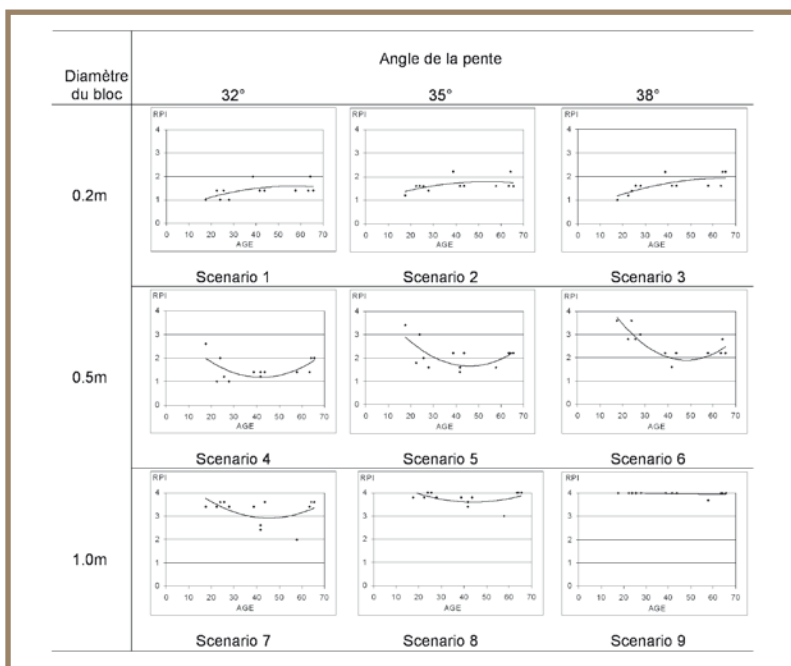
Les résultats et conclusions des travaux de simulation pour les taillis

Les résultats du traitement des données de nos inventaires mettent en évidence le lien qui existe entre les caractéristiques dendrométriques des taillis et leur âge. Plus spécialement le diamètre moyen est très bien corrélé avec l'âge ($R^2 = 0.96$). Pour la densité et la surface terrière il existe des corrélations plus faibles ($R^2 = 0.78$, $R^2 = 0.30$) mais ces paramètres dépendent aussi fortement

Figure 3.3.56 Evolution de l'Indice de Protection contre les chutes de Pierres (IPP) en fonction de l'âge des taillis et des scénarii de simulation

des interventions sylvicoles pratiquées.

Compte tenu de cette corrélation entre l'âge et les paramètres dendrométriques des taillis, et que la mesure de l'âge d'un taillis est facile et rapide à réaliser sur le terrain, nous ne présentons nos résultats de simulation en n'utilisant que l'âge comme variable explicative (figure 3.3.56).



Au regard de ce tableau, et des résultats de nos travaux de simulation il s'avère que pour des projectiles ayant un faible diamètre (inférieur ou égal à 20 cm) c'est principalement la densité qui va déterminer l'efficacité de la protection offerte par les taillis. Etant donné que la densité est très élevée dans les jeunes peuplements (5 000 – 10 000 tiges/ha), nous pouvons en conclure que pour des pierres ayant un diamètre de l'ordre de 20 cm se sont les taillis âgés de 30 ans et moins qui offrent la meilleure protection.

Par rapport à des projectiles de 20 cm de diamètre, ceux de 50 cm de diamètre, développent des énergies 10 fois supérieures. De tels projectiles ne peuvent être arrêtés que par des taillis ayant une forte densité avec un diamètre moyen élevé. Ces critères sont optimisés pour des taillis de 40 à 50 ans. Bien que les taillis âgés de 60 ans aient une surface terrière comparable et un diamètre moyen

bien supérieur, il s'avère qu'ils sont moins efficaces à cause de leur plus faible densité qui réduit d'autant la probabilité qu'à un projectile d'impacter une tige. Au regard de nos résultats il s'avère que l'âge de 50 ans représente l'âge limite à partir duquel la protection offerte par les taillis diminue.

3.3.5 La cartographie des forêts à fonction de protection

Les paragraphes précédents s'ils permettent aux lecteurs de mieux cerner et quantifier la protection que peuvent offrir les différents types de peuplements forestiers, ils ne leur donnent par contre aucun élément pour la cartographie des forêts à fonction de protection. C'est l'objectif de ce paragraphe.

Principe général de la cartographie des forêts à fonction de protection

Une forêt ne peut prétendre être une forêt de protection que si les 3 conditions suivantes sont réunies:

- elle est située entre la zone de départ d'un aléa et l'enjeu socio-économique qu'il menace;
- elle peut occuper soit tout l'espace existant entre la zone de départ et d'arrivée de cet aléa, soit être présente que sur certains tronçons de la zone parcourue par cet aléa;
- elle doit être en mesure de diminuer l'aléa soit en termes de fréquence d'occurrence soit en termes d'intensité.

La personne en charge de la réalisation de la cartographie des forêts à fonction de protection doit donc réaliser 5 grandes étapes distinctes:

- étape 1: faire abstraction de la couverture forestière présente sur le secteur d'étude afin de déterminer quels sont les aléas naturels actifs et potentiels présents;
- étape 2: identifier les enjeux socio-économiques présents dans le secteur d'étude;
- étape 3: déterminer si les aléas sont en mesure de mettre en danger les enjeux présents à leur aval;
- étape 4: identifier les secteurs actuellement occupés par de la végétation forestière et situés entre le point de départ et d'arrivée des aléas menaçant des enjeux;
- étape 5: caractériser l'efficacité de la protection offerte par les peuplements forestiers identifiés lors de la précédente étape.

Actuellement en France cette cartographie peut être réalisée au sein de deux documents d'aménagement du territoire que sont les Plans de Prévention des Risques et les aménagements forestiers. Si les étapes 1 à 3 sont actuellement du ressort des spécialistes des risques naturels, les étapes 4 à 5 sont quant elles du domaine de compétence des forestiers.

Mais ces deux dernières étapes sont nécessaires à la création des zones vertes dans les PPR. Une zone verte est un secteur forestier ayant un rôle de protection avéré et qu'il est impératif d'entretenir. Il convient donc de mettre en œuvre une méthodologie commune permettant d'optimiser le l'acquisition et le transfert d'informations entre ces deux domaines de compétences.

Ceci est d'autant plus nécessaire que:

- tous les spécialistes des risques naturels n'ont pas forcément de compétences en foresterie;
- que la réciproque est vraie à savoir que tous les forestiers n'ont pas forcément de compétences dans le domaine des risques naturels;
- que ces deux documents peuvent avoir des intérêts contradictoires.

Ce dernier point est important car si l'objectif d'un PPR est la mise en œuvre de la politique de prévention des risques naturels par l'affichage du risque, celui de l'aménagement forestier est de garantir une gestion durable des espaces forestiers. Il faut de plus garder à l'esprit qu'un PPR s'impose à tout autre document d'aménagement du territoire.

La **figure 3.3.57** présente les 5 étapes ainsi que les principaux objectifs d'un PPR et d'un aménagement forestier.

Il est important de signaler que ces 5 étapes sont valables quelque soit la nature du document à réaliser

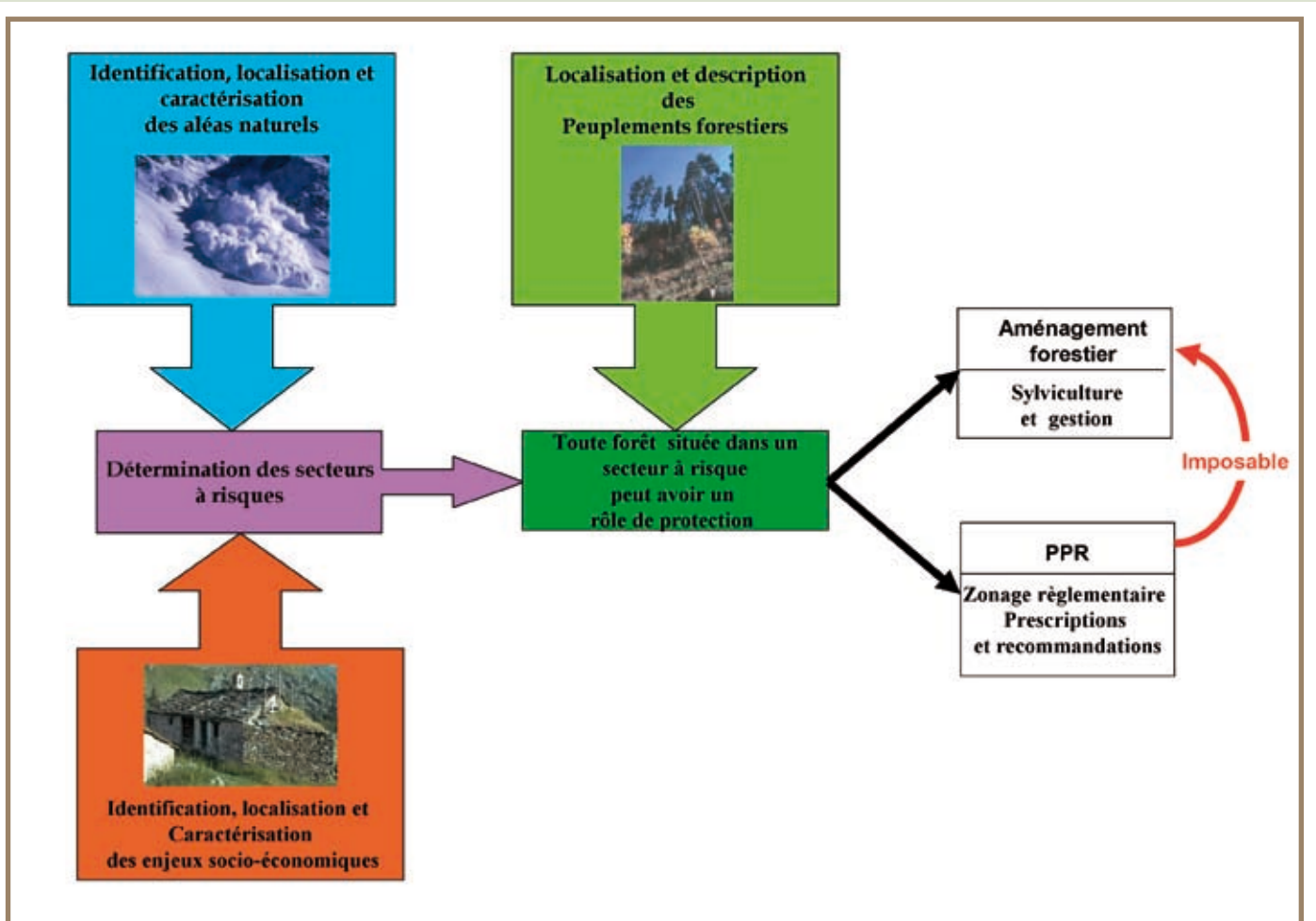


Figure 3.3.57 Les principales étapes nécessaires à la cartographie des forêts à fonction de protection

et le pays souhaitant se doter d'une carte de ses forêts à fonction de protection.

La réalisation des étapes 1 à 3 se fait par une analyse classique de type "enjeux-risques". Les étapes 4 à 5 nécessitent de disposer d'une cartographie des peuplements forestiers ainsi que des descripteurs permettant d'apprécier pour chacun de ces secteurs l'efficacité de la protection offerte par les peuplements présents.

Au sein de ce schéma méthodologique, deux étapes sont particulièrement importantes. Ce sont les étapes 1 et 5. L'objectif de l'étape 1 est d'apprécier les potentialités de présence et d'activité des aléas naturels. Cette étape peut être facilitée par l'emploi d'un modèle numérique de terrain et d'outils de simulation de la propagation des aléas. A ce jour, il n'existe des modèles simples, robustes et utilisables facilement sur une grande surface d'étude que pour les avalanches et les chutes de pierres.

L'étape 5 ne peut être menée à bien que si un inventaire forestier est ou a été réalisé. Cet inventaire doit permettre au gestionnaire de disposer des descripteurs nécessaires à la quantification de la protection actuellement offerte par les peuplements forestiers et à l'estimation de son évolution dans le temps et ce avec ou sans interventions humaines. La réalisation de cette étape est, actuellement pour les Alpes du Nord, grandement facilitée par l'emploi du Guide des Sylvicultures de Montagne. Ce guide propose un schéma méthodologique et des fiches synthétiques pour fixer la nature et l'urgence des interventions forestières. Mais s'il permet de réaliser ce diagnostic, il n'a pas par contre pour vocation de réaliser un zonage des forêts à fonction de protection. De plus, cet ouvrage est destiné à un public de forestier. C'est la raison pour laquelle, le lecteur trouvera dans ce guide une proposition de fiche de terrain pour réaliser l'inventaire forestier qui convient aussi bien à un spécialiste des risques naturels qu'à un forestier.

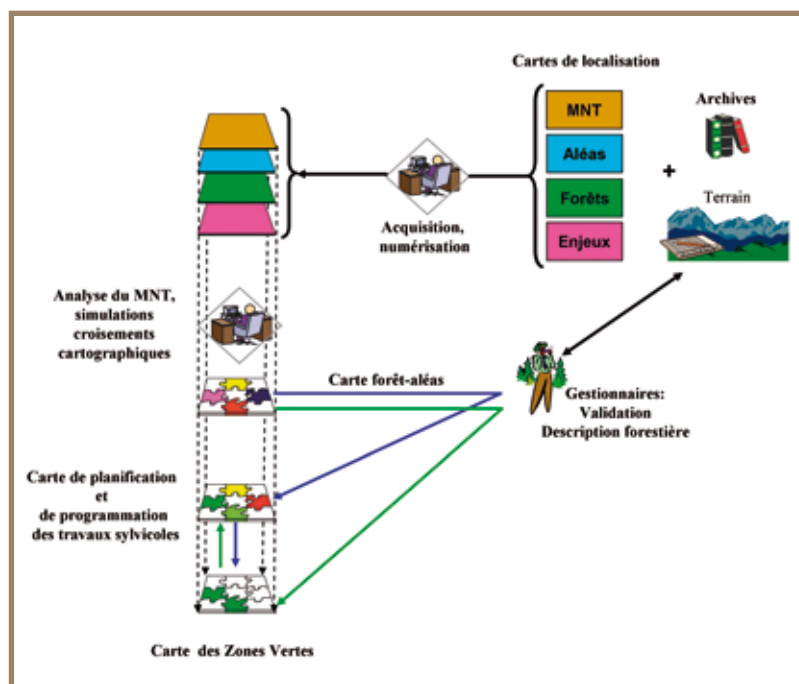
Dans le cadre de l'aménagement forestier, la réalisation de l'étape 5 permet au forestier de définir des secteurs sur lesquels il faut intervenir prioritairement et de proposer un calendrier en fonction des urgences

d'interventions à réaliser. En d'autres termes elle permet de définir des Zones d'Interventions Forestières Prioritaires (ZIFP). De son côté, la réalisation de l'étape 5 dans le cadre d'un PPR si elle a vocation à définir les Zones Vertes, elle n'a par contre par l'objectif de déterminer et prioriser les interventions forestières.

En fonction du calendrier de réalisation de ces deux documents, ceux-ci sont complémentaires à plus d'un titre:

- l'aménageur forestier peut utiliser le PPR ou tout autre document similaire, si celui-ci a été réalisé préalablement et s'il définit des zones vertes, pour "redécouper" les zones vertes en ZIFP. Cela lui permet de passer directement à la phase de description de l'étape 5. De plus, le PPR fixant des prescriptions et des recommandations, l'aménageur forestier pourra définir au mieux les interventions à réaliser;
- le service en charge de la réalisation du PPR, peut utiliser l'aménagement forestier si celui-ci a été préalablement réalisé et s'il propose un classement en ZIFP, pour "regrouper" les ZIFP contiguës et créer ainsi les Zones Vertes. Une attention toute particulière devra être portée sur la rédaction du règlement des Zones Vertes. Cette rédaction ne pourra se faire qu'avec le concours des aménageurs forestiers. En effet, dans une telle situation il existe déjà une définition des interventions sylvicoles à réaliser pour chacune des ZIFP;
- si la date la révision ou la réalisation de ces deux documents coïncide, alors il faut impérativement que les deux services en charge de leur réalisation mettent en phase leurs travaux respectifs.

Ceci permettra alors des économies de moyens et de temps, tout en optimisant les compétences des deux services. Le service forestier se chargeant alors de la cartographie et de la description des peuplements forestiers et l'autre service se focalisant sur l'analyse enjeux-risques.



La **figure 3.3.58** présente les principales sources de données et les principaux traitements à réaliser pour obtenir les cartes des Zones Vertes et des ZIFP.

Méthodes et outils pour déterminer les zones de départ potentiel et estimer les points d'arrêt maximal probable pour les chutes de pierres

Dans le cadre de la réalisation de la cartographie des forêts à fonction de protection, les phases d'identification et de délimitation des zones assujetties aux chutes de pierres, peuvent être grandement optimisées par l'emploi de modèles simples qui permettent de:

- pré-localiser les zones de départs;
- réaliser un pré-zonage des points d'arrêt maximal probable;
- faire abstraction de la couverture forestière et avoir ainsi une vision de ce qui pourrait se produire

Figure 3.3.58 Méthode de classement en ZIFP puis/ou en Zone Verte

en cas de scénario catastrophe de disparition de la couverture forestière (ouragan, feux de forêts, coupes abusives, etc.).

Ces outils permettent uniquement de réaliser un "pré-zonage". Cette notion est importante car tout modèle ne fait que proposer une simplification de la réalité d'une part, et que d'autre part, les résultats obtenus dépendent des paramètres d'entrées choisis par l'utilisateur ainsi que de la qualité du modèle numérique de terrain utilisé.

Par conséquent, ce pré-zonage doit être impérativement validé par une confrontation aux données réelles. Ceci peut se faire en comparant pour des secteurs où l'aléa naturel étudié est actif et pour lesquels on dispose d'une cartographie des phénomènes passés, les résultats des travaux de simulations avec la réalité

observée. Pour les secteurs pour lesquels on ne dispose d'aucune information, il est alors nécessaire de réaliser une validation terrain en parcourant ces secteurs afin de cartographier les indicateurs d'activités des phénomènes (dégâts aux arbres, aux infrastructures, etc.).

Si la surface d'étude est celle d'un territoire communal, il est illusoire de vouloir utiliser des modèles de propagation nécessitant de nombreux paramètres d'entrées. En effet ces paramètres seront d'une part difficiles à acquérir sur l'ensemble du territoire étudié et, d'autre part, les temps de calculs seront bien souvent incompatibles avec l'optimisation de la durée de réalisation du document cartographique. Ce que recherche l'opérateur dans un premier temps est en fait une vision statistique du cas le plus défavorable. Les critères et outils qui sont proposés dans ce guide s'inscrivent dans ce contexte de vision exhaustive statistique d'un territoire et ce sous l'angle des situations les plus défavorables.

Critère de détermination des zones de départ probable de chutes de pierres et de blocs avec un Modèle Numérique de Terrain

Les zones de départ réelles de chutes de pierre sont des barres rocheuses et des falaises. La localisation de ces zones peut se faire soit par reconnaissance de terrain, soit par photo-interprétation soit en utilisant un MNT. Les deux premières méthodes nécessitent de réaliser une vision exhaustive de ces sites. Lors des inventaires de terrain il n'est pas toujours possible de parcourir la totalité du territoire étudié. La photo-interprétation peut s'avérer impossible à réaliser, s'il existe des zones d'ombres portées sur les documents photographiques et/ou si le couvert forestier masque des barres rocheuses. De plus, la lecture d'une carte géologique n'est pas toujours chose facile. Par contre l'emploi d'un MNT, s'il est de qualité et si le traitement est robuste, offre la possibilité d'avoir une vision exhaustive des zones de départ probable présentes sur l'ensemble du site étudié. Dans un MNT, les falaises et les barres rocheuses peuvent être identifiées soit par visualisation en 3 dimensions du secteur d'étude soit à partir du plan dérivé du MNT qu'est la carte des pentes. En fonction de la résolution du MNT (aussi dénommé le pas du MNT), il faut définir la valeur de pente minimale permettant de détecter le plus grand nombre possible de falaise et barre rocheuse.

Ainsi par exemple, dans un MNT au pas de 50 m, une falaise d'une hauteur de 20 m, dont la pente est

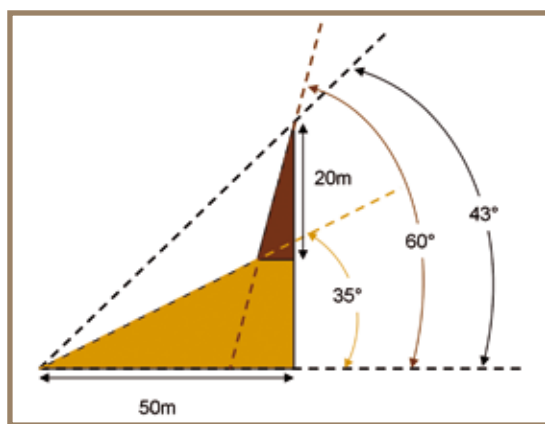


Figure 3.3.59 Exemple de valeur d'angle de pente sur MNT et dans la réalité

égale à 60° et situé à l'amont d'une pente d'éboulis ayant une pente de 35°, l'angle α évalué par le MNT au pas de 50 m sera égal à 43° (figure 3.3.59).

Par conséquent il est nécessaire pour un MNT donné, d'estimer l'angle α évalué par celui-ci dans la carte des pentes qui permet de caractériser les falaises le plus précisément possible.

Nous proposons d'utiliser le **tableau 3.3.22** pour déterminer la valeur seuil de l'angle α caractérisant les zones de départ en fonction de la résolution du MNT utilisé. Pour d'autres valeur de résolution que celles affichées dans ce tableau, nous invitons le lecteur à utiliser la formule suivante:

$$\alpha = 55^\circ \cdot RES^{0,075} \quad (3.3.10)$$

avec:

RES résolution du MNT (par exemple si la résolution est de 15 m x 15 m alors RES = 15)

Résolution du MNT (en m)	Seuil d'angle de la pente à utiliser (en °)
1	55
2	52
5	49
10	46
25	43
50	41

Tableau 3.3.22 Valeur seuil de l'angle α caractérisant les zones de départ en fonction de la résolution du MNT utilisé

Les résultats obtenus avec cette valeur d'angle doivent être impérativement validés par comparaisons avec la réalité du terrain et les données relatives aux phénomènes passés.

Tableau 3.3.23

Sensibilité à l'occurrence de chutes de pierres pour les principaux substrats géologiques

Géologie	Densité (kg m ⁻³)	Sensitivité
Amphibolite	3000	Haute
Ardoise	2 450	Moyenne
Basalte	2 900	Moyenne
Calcaire	2 500	Haute
Diorite	2 850	Haute
Dolomite	2 700	Haute
Gneiss	2 800	Haute
Granite	2 800	Haute
Grès	2 350	Moyenne
Gypse	2 300	Faible
Marne	2 400	Faible
Micaschiste	2 700	Moyenne/Haute

Sensibilité à l'occurrence de chutes de pierres des différents substrats géologiques

Pour les travaux de simulation trajectographique nous proposons de travailler à risque acquis, c'est à dire que l'on fixe la probabilité de départ à 100%. Mais en fonction de la nature des substrats géologiques, la capacité de production de projectiles est plus ou moins marquée. Cette sensibilité a été synthétisée dans le **tableau 3.3.23**. Ce tableau permet de classer au gestionnaire de classer et hiérarchiser les zones de départ déterminées avec la carte des pentes les unes par aux autres en fonction de leur nature géologique.

Modèle statistique pour déterminer le point d'arrêt maximal probable d'un projectile rocheux

Une fois les zones de départ déterminées il faut choisir un modèle de simulations trajectographiques. Il existe différents types de modèles de trajectographiques: modèle en 2D, modèle en 3D, modèle probabiliste, modèle déterministe, modèle à masse concentrée etc. Bien souvent leur usage requiert de déterminer des coefficients de sol. Cette détermination n'est pas chose facile d'autant plus que les différents modèles n'utilisent pas tous les mêmes types ou valeurs de coefficient pour décrire les mêmes sols. Pourtant, il existe un type de modèle dit statistique qui ne nécessite pas à proprement parlé de détermination des coefficients de réponse des sols. Ce modèle est basé sur le principe de la ligne d'énergie et a été présenté dans le paragraphe 3.2.1.

Figure 3.3.60 Schéma méthodologique récapitulatif pour la réalisation de la carte des forêts soumises aux chutes de pierres et de blocs

Schémas récapitulatifs de la méthode et des principales étapes pour cartographier les forêts çà fonction de protection

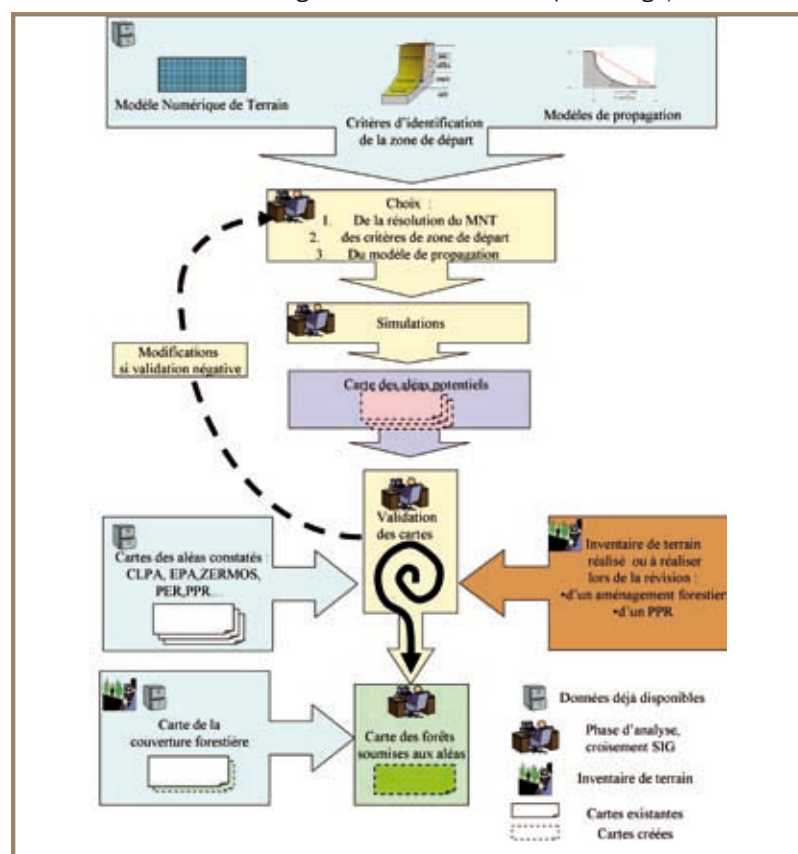
Les paragraphes précédents ont été consacrés aux outils utilisables pour réaliser le zonage (après l'étape obligatoire de validation du pré-zonage) des distances maximales de propagation probables des chutes de pierres.

A ce stade il faut croiser ce pré-zonage avec la carte de localisation des peuplements forestier pour obtenir la carte des forêts soumises à ces aléas.

Il ne reste plus alors qu'à réaliser le dernier croisement cartographique entre la carte des forêts soumises aux aléas et la carte des enjeux socio-économique présents dans le secteur d'étude. Seules les forêts soumises à un aléa pour lequel un ou plusieurs enjeux sont présents dans la zone d'extension maximale de l'aléa sont considérées comme forêt à fonction de protection et peuvent alors faire l'objet d'un classement en Zones Vertes au titre du PPR ou en ZIFP dans la démarche de l'aménagement forestier.

La **figure 3.3.60** présente le schéma méthodologique récapitulatif des principales étapes nécessaire à la réalisation de la carte des forêts soumises aux aléas naturels.

La **figure 3.3.61** quant à elle donne le schéma méthodologique pour réaliser la dernière étape de classement en forêt à fonction de protection à partir de la carte des forêts soumises aux aléas naturels. Ces deux schémas méthodologiques seront aussi



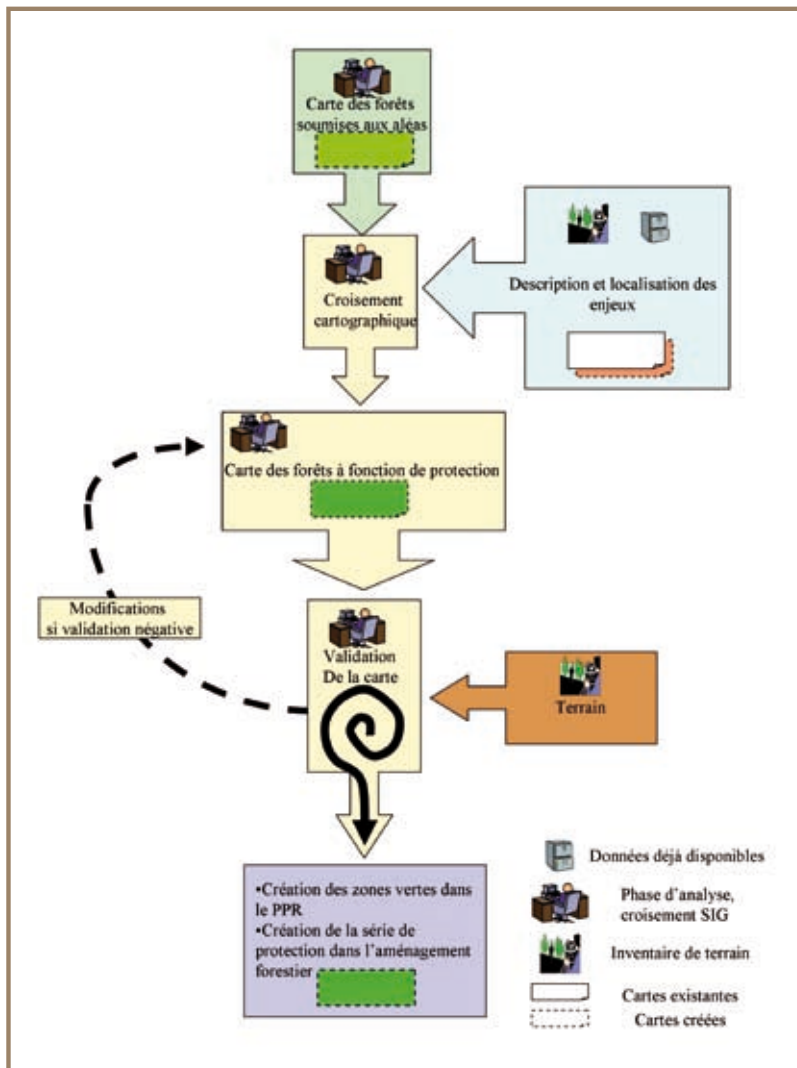


Figure 3.3.61 Schéma méthodologique récapitulatif pour la réalisation de la carte des forêts à fonction de protection à partir de la carte des forêts soumises aux aléas naturels

valables, pour les aléas autres que les chutes de pierres, à compter du jour où des modèles similaires seront disponibles.

Fiches synthétiques de terrain pour l'aide à la caractérisation et la quantification du rôle protecteur du couvert forestier

La validation de la carte des forêts soumises aux aléas et de celle des forêts à fonction de protection nécessite de disposer d'une vision de la réalité du terrain. Pour ce faire, il est donc nécessaire de réaliser un inventaire de terrain. Cet inventaire doit permettre à la fois:

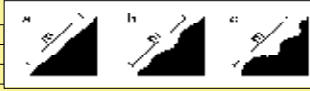
- de décrire les peuplements forestiers;
- de relever les traces d'activité et/ou de passage des aléas naturels dans les peuplements forestiers;
- de vérifier la présence d'enjeu à l'aval des peuplements forestiers;
- de collecter les données nécessaires pour quantifier le rôle de protection des peuplements forestiers et apprécier son évolution dans le temps.

Afin d'être la plus opérationnelle possible cette fiche doit être simple à utiliser et les descripteurs les plus pertinents possibles tout en étant le moins nombreux possibles. Nous proposons une fiche de ce type qui peut être utilisée aussi bien dans le cadre de la réalisation d'un PPR que de celui d'un aménagement forestier.

Le fait qu'elle puisse être utilisée pour la réalisation de ces deux documents est conditionné par le fait que les dates de réalisation de ceux-ci ne coïncident pas forcément. Il convient donc d'optimiser la phase de relevé de terrain en évitant à deux personnes différentes travaillant dans deux services différents de relever deux fois les mêmes informations. L'objectif est donc que la personne en charge de la cartographie des risques naturels puisse transmettre aux forestiers les informations qu'elle aura collectées en milieu forestier et ce de manière compréhensible. Il en est de même le transfère d'informations des forestiers vers les services en charges des risques naturels.

Un code couleur permet à la personne qui remplit cette fiche d'éviter d'omettre un des descripteurs nécessaires à la quantification du rôle de protection du peuplement inventorié. Les secteurs de couleur verte correspondent aux données dendrométriques communes à la fois aux peuplements de production et à ceux de protection. Les descripteurs des secteurs de couleur jaune sont spécifiquement dédiés aux peuplements à fonction de protection. Les descripteurs des secteurs sans couleur sont spécifiques des peuplements sans fonction de protection (figure 3.3.62). Le verso de cette fiche permet d'apporter des précisions sur le volet risque. Son remplissage est toute fois optionnel. Le verso contient aussi un secteur permettant à la personne remplissant la fiche de noter ses observations (figure 3.3.63).

L'utilisation de cette fiche ne peut être qu'optimisée si l'opérateur dispose d'un GPS pour déterminer les coordonnées du point pour lequel il remplit cette fiche. Si ce n'est le cas, il faut alors utiliser une méthodologie (topofil et boussole, etc.) permettant de positionner les points de relevés à partir d'un point fixe de coordonnées connues. Il est en effet nécessaire de cartographier les points de relevés si on veut pouvoir comparer les informations collectées sur le terrain avec celles obtenues par croisements des cartes obtenues par simulation avec celles des phénomènes passés observés.

FORÊT DE :							
Nom :							
DATE	PARCELLE	N° Point					
EXPOSITION <i>gr</i>	PENTE% %	ALTITUDE m	28-55° = 53-143% 25-50° = 47-120%				
RELEVÉS RELATIFS A LA STATION FORESTIERE							
Situation (macro)topographique (thalweg, croupe, bas versant, etc.) (faire un croquis du profil en positionnant le site avec une flèche)							
Relevé de la végétation arbustive ou herbacée (en amont de la placette) * * *							
RELEVÉS RELATIFS A LA RUGOSITÉ DU VERSANT (topo et obstacles)							
MicroTopo							
m < 1 m	type a	type b	type c				
m = 5 m							
m > 25 m							
Obstacles (pierre, souche, arbre couché, etc.) hauteur maximale des obstacles <25 cm 25 cm < < 50 cm 60 cm <<150cm > 150 cm importance des obstacles sur le placette < 10% surface < 20% surface < 70% surface							
INVENTAIRE TYPOLOGIQUE							
Essence futaie	H potentielle	Ho	Do	Ho/Do	Densité/ha (>7,5cm)		
Ess 1:							
Ess 2:							
G m2/ha	Ess	PB(20/25)	BM(30/40)	GB (45/65)	TGB (65+)	Total	
Feuillus							
Résineux							
Total							
Bois secs							
Recouvrement des strates (tous diamètres)	Déficitaire <2/10	Moyenne 3 et 4/10	Dominante >ou=5/10	Avenir *			
S1							
S2							
S3							
S4							
Dénomination du peuplement :							
Code STIR Massif Alpin du type de peuplement identifié :							
Importance de la régé	Ess	0 Absent	1 Rare	2 Suffisant	Avenir (*)		
Feuillus							
Résineux							
(*) mentionner au choix OUI/NON/OUI MAIS Pour "OUI MAIS", préciser les conditions (gibier, travaux sylvicoles, ...)							
Vides non boisables (% de la placette)							
Types	Falaise Rocher	Eboulis	Ravin	Pelouse	Milieu humide	Emprise	Autres
OUI							
NON							
Vides boisables non régénérés							
Surface en Ha	Origine *	A reboiser	Observations (Ess., etc.)				
		NON OUI					
* préciser (coupes récentes, chablis, scolytes, gibier, coulours avalanches ou chute pierre ...)							
Peuplement de taillis (si plus de 50 % des tiges en cépées)							
Ess :	NOI	FRE	SOR	AUL	Autres:	G m²/ha	
Etat sanitaire du peuplement							
	0 (Non)	1 (Rare)	2 (abondant)				
Présence champignons sur les arbres :							
Attaques d'insectes							
Présence de chablis (arbre effondré)							
Dégâts de ski							
Présence d'arbres morts (arbre debout)							
Indice présence gibier							
Autres (à préciser)							
Durée de survie des peuplements							
	< 30 ans	> 30ans					
Futaie							
Taillis							
ENJEUX D'URBANISME, TOURISTIQUES ET AUTRES							
Présence, visible de la placette, et en aval, d'enjeux :							
Type d'enjeux perçu sur la placette	OUI	NON	précisions sur l'enjeu				
route ouverte à la circulation							
zone d'habitat permanent							
zone d'habitat non permanent							
autres :							
INDICATIONS RELATIVES AUX ENJEUX DE PROTECTION							
AVALANCHES							
Zone soumise aux avalanches:	OUI	NON					
Présence d'arbres en crosses:	OUI	NON					
Couvert forestier hivernal par rapport au sol (en surface)							
0-10%	10-30%	30-70%	70-100%				
CHUTE DE BLOCS (entourer les réponses et rayer la mauvaise réponse)							
Zone soumise aux chutes de pierre	OUI	NON					
Présence amont de :	falaise	éboulis	microfalaise	autres			
Forme des pierres :	dalle	sphère					
si oui, diamètre moyen des blocs (dans la plus grande longueur) :							
<25 cm	25 cm < < 50 cm	60 cm <<150cm	>150 cm				
hauteur d'impact sur la végétation forestière:							
<25 cm	25 cm < < 50 cm	50 cm <<150cm	>150 cm				
Blocs arrêtés par des arbres							
	OUI	NON					
A REMPLIR SI ZONE SOUMISE AUX BLOCS ET AVALANCHES							
Densité	Feuillus	Rsx	en nombre de tiges/ha				
futaie			(densité des classes 5 cm et + incluse)				
taillis			(densité des classes 5 cm et + incluse)				
TORRENTIEL-GLISSEMENT							
	OUI	NON					
Couvert forestier estival par rapport au sol (en surface)							
0-10%	10-30%	30-70%	70-100%				
Appréciation terrain de la personne qui remplit la fiche							
le pplt doit-il jouer un rôle de protection :	OUI	NON					
Rôle actuel de protection du pplt :	OUI	NON	PARTIEL				
Pérennité sur 30 ans du rôle de protection	OUI	NON					
PRESCRIPTIONS DE GESTION							
(travaux, coupes préconisées, entretien paysagers, soins minimaux, etc.):							
Nature des travaux	Quantité	Urgence *					

* : 1 = urgent; 2 = inférieur à 15 ans; 3 = au-delà de 15 ans ou facultatifs

Figure 3.3.62 Recto de la fiche d'inventaire de terrain

Cette fiche n'est pas spécifique aux risques de chutes de pierres. Elle traite aussi des autres risques naturels. L'utilisation de cette fiche ne peut être qu'optimiser si les opérateurs disposent d'un vade-mecum auquel ils puissent se référer en cas de besoin. Ce vade-mecum doit être à la fois synthétique et d'usage pratique sur le terrain. Nous proposons donc d'utiliser les fiches du Guide des Sylvicultures de Montagne des Alpes du Nord en tant que vade-mecum associé à la fiche d'inventaire de terrain.

FORÊT DE :											
Nom :											
DATE	PARCELLE										
	N° Point										
EXPOSITION	ALTITUDE										
gr	m										
	28-55° = 53-143%										
	25-50° = 47-120%										
COMPLÈMENTS D'INDICATIONS RELATIVES AUX ENJEUX DE PROTECTION											
AVALANCHES											
Présence :	NON										
de hautes herbes dans les trouées	NON										
d'arbres écorcés et/ou ébranchés côté amont	NON										
de bris de cimes à la même hauteur	NON										
d'arbres en drapeau	NON										
de dépôts à l'amont des obstacles naturels	NON										
Sol 'propre' et 'décapé'	NON										
CHUTE DE BLOCS											
Présence :	NON										
de bris de cimes avec blessure en pied côté amont	NON										
de traces d'impacts au sol (cratères)	NON										
de dépôts à l'amont des obstacles naturels	NON										
Sol 'propre' et 'décapé'	NON										
RAVINEMENT et CRUE TORRENTIELLE											
topographie											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center;">Pas de forme particulière</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Versant, talus</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Cuvette, dépressio</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Entonnement</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Thalweg</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;"></td> </tr> </table>		Pas de forme particulière	Versant, talus	Cuvette, dépressio	Entonnement	Thalweg					
Pas de forme particulière	Versant, talus	Cuvette, dépressio	Entonnement	Thalweg							
Formations rocheuses	Fracturées Meublées										
Cohérentes	Peu cohérente										
RAVINEMENT											
Présence :	NON										
de rigoles (incision < 1m)	NON										
de ravines (incision > 1m)	NON										
d'arbres penchés	NON										
présences de dépôts de sédiments	NON										
présences d'arbres enfouis sous des sédiments	NON										
CRUE TORRENTIELLE											
Présence :	NON										
de bois dépréissant en berge	NON										
d'arbres dans les lits	Fort										
Appréciation du risque d'embâcle	Faible										
Etats des berges	Nul										
Etats des plages de dépôts naturels	Bon										
	Moyen										
	Mauvais										
	Mauvais										

Figure 3.3.63 Verso de la fiche d'inventaire de terrain

Fiche de diagnostic du rôle de protection d'un peuplement forestier vis-à-vis des chutes de pierres (Gauquelin et Courbaut, 2006)

Risques naturels : chutes de blocs

Objectif : répondre à la question "La forêt a-t-elle un rôle de protection ?"

Pour vous aider lors du diagnostic :
les principaux témoins silencieux à rechercher sur le terrain

- Présence en falaise de zones de couleurs différentes et très contrastées (points de départ)
- Chablis avec blessure en pied et volis orientés dans la ligne de plus grande pente
- Arbres blessés côté amont
- Bris de cimes avec présence côté amont de blessures au pied
- Traces d'impacts au sol ("cratères")
- Blocs posés au sol, arrêtés sur des arbres, des souches ou des troncs
- "Cortèges" de blocs orientés dans la ligne de plus grande pente
- Zones avec des blocs, orientées dans la ligne de plus grande pente, correspondant à des :
 - trouées avec des bois cassés ;
 - "coulées" de feuillus et de végétation arbustive ;
 - zones occupées par un peuplement plus jeune.
- Présence d'ouvrages de protection !
- Dégâts sur des infrastructures



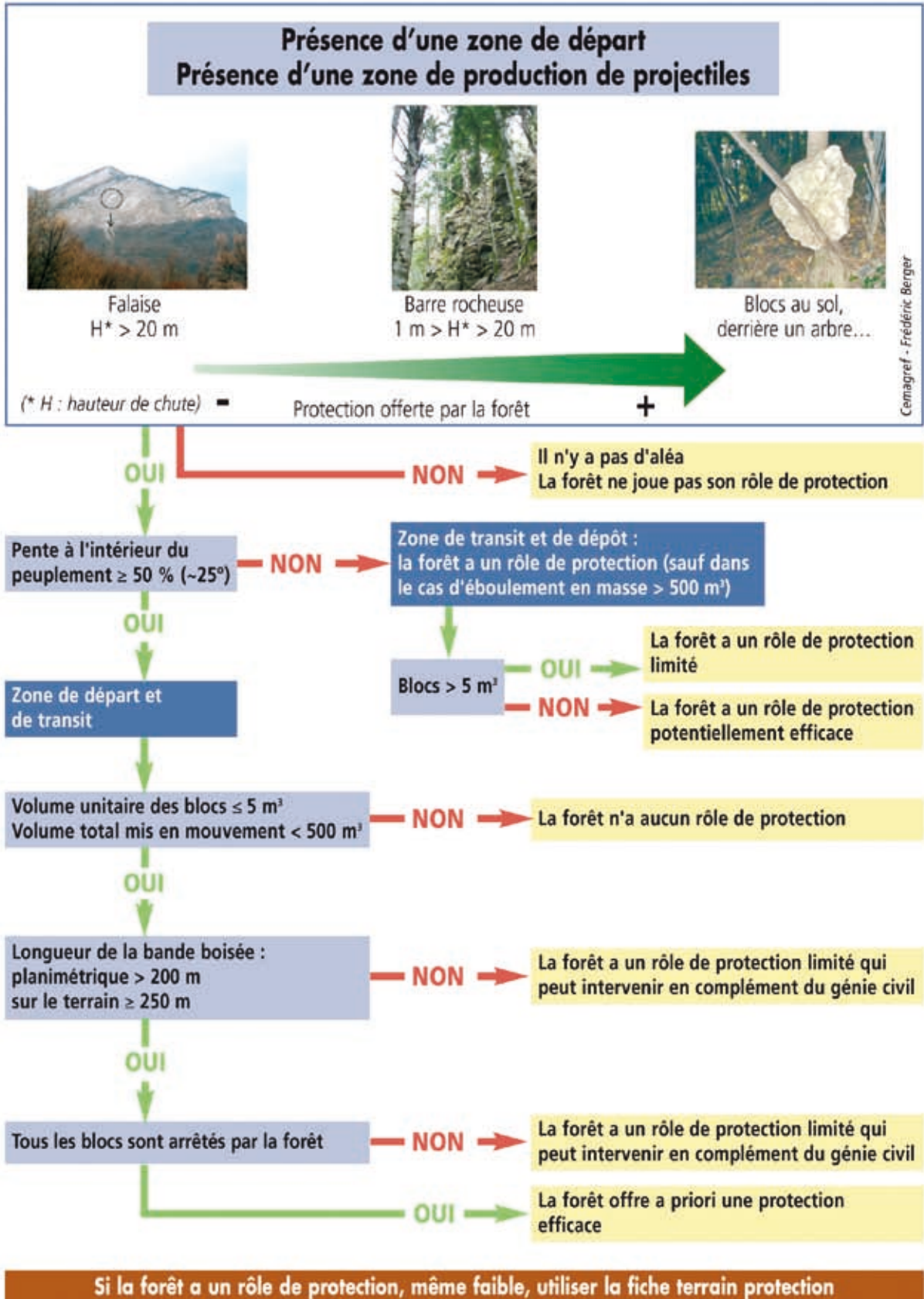
Cemagref - Frédéric Berger

Nouvelles zones de départ identifiées par une coloration différente

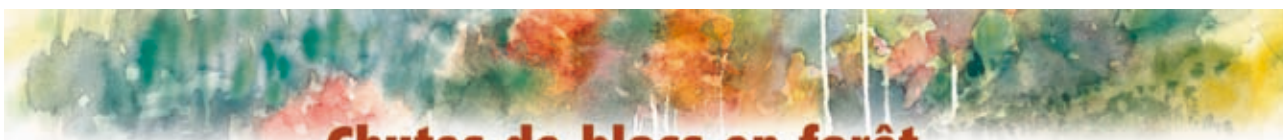


Cemagref - Frédéric Berger

Bloc récent (1) et bloc ancien (2)



Fiche de recommandations et préconisations sylvicoles vis-à-vis des chutes de pierres (Gauquelin et Courbaut, 2006)



Chutes de blocs en forêt

Les peuplements forestiers peuvent jouer un rôle important en matière de risques liés aux chutes de blocs :

- rôle positif, permettant de diminuer le risque au niveau de l'enjeu,
- mais parfois rôle négatif, qu'une intervention peut corriger.

Cette fiche explicite l'ensemble des interactions entre chutes de blocs et peuplements forestiers. Ces recommandations sont fournies par zone (départ de blocs, transit, dépôt) : voir fiche RISQUE page 194.



Type de zone	Action positive de la forêt	Action négative de la forêt	Interventions préconisées	Valeur seuil préconisée
Zone de départ	<ul style="list-style-type: none"> • Ancrage des pierres/blocs/éboulis par le système racinaire 		<ul style="list-style-type: none"> • Éliminer les arbres instables (effet de levier sous l'action du vent) au sommet ou dans la zone de départ 	<ul style="list-style-type: none"> • Résineux : H/D ≤ 65 • Feuillus : H/D ≤ 80
	<ul style="list-style-type: none"> • Piégeage des blocs au pied de la zone de départ 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de mise en mouvement de blocs : - par effet de levier - lors de chablis 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenir en pied de zone de départ une surface terrière élevée et compatible avec la pérennisation du peuplement 	<p>Voir RECOMMANDATIONS SYLVICOLES par station forestière</p>
			<ul style="list-style-type: none"> • Dans la mesure du possible, limiter la distance d'entrée dans le peuplement 	<ul style="list-style-type: none"> • ≤ 20 m
	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la rugosité du sol (le sol forestier est plus amortissant qu'un sol de terrain nu) 	<ul style="list-style-type: none"> • Effet tremplin des souches • Effet bélier possible par mise en mouvement d'arbres cassés 	<ul style="list-style-type: none"> • Exploiter les arbres en laissant des souches de 1,30 m de hauteur ou en les arasant complètement • Abattre en oblique dans la pente et laisser au sol des arbres ne pouvant être mis en mouvement 	

Zone de transit

&

Zone de dépôt

- Limitation de la vitesse maximale des blocs
- Favorise le dépôt des blocs

- Limiter la taille des trouées
- Longueur de trouée (mesurée sur la pente) (H = hauteur moyenne des arbres)
 - Si Taillis < 20 m,
 - Si Futaie < 40 m,
 - Dans tous les cas, valeur préconisée : $L \leq 1,3 H$

- Si possible, augmenter la longueur planimétrique de la bande boisée
- Longueur horizontale de la bande boisée > 200 m

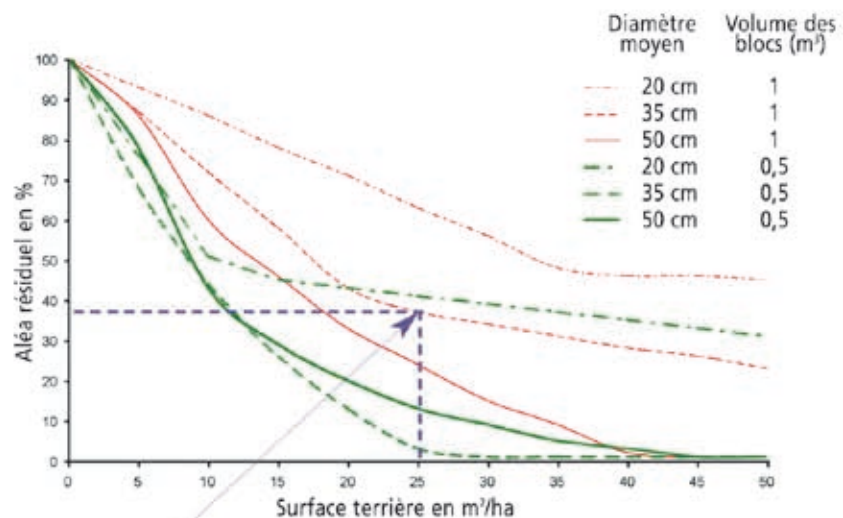
- Favoriser les feuillus qui, à diamètre égal, sont plus résistants que les résineux
- Plus de 30 % de feuillus parmi les plus gros arbres

Objectif :

- En zone de transit avoir une surface terrière des arbres de diamètre de 20 cm et plus, d'au minimum 25 m²/ha
- En zone d'arrêt et de dépôt avoir une surface terrière des arbres de diamètre de 20 cm et plus, d'au minimum 20 m²/ha
- Dans tous les cas, avoir une densité, pour les arbres de 20 cm et plus, d'au minimum 350 tiges par hectare


**Cas de la pessière :
influence du diamètre (mesuré à 1,30 m)
et du volume du bloc sur l'aléa résiduel**

(hauteur de chute 10 m, longueur de bande boisée 500 m, pente 38° = 78 %)




Exemple : environ 60 % des blocs de 1 m³ sont arrêtés par un peuplement de :
- surface terrière 25 m²/ha
- diamètre moyen 35 cm

- Diminution de l'aléa résiduel (pourcentage de projectiles sortant de l'écran forestier)

Type de zone	Action positive de la forêt	Action négative de la forêt	Interventions préconisées	Valeur seuil préconisée
Zone de transit & Zone de dépôt	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la rugosité du sol (le sol forestier est plus amortissant qu'un sol de terrain nu) 	<ul style="list-style-type: none"> Effet tremplin des souches 	<ul style="list-style-type: none"> Exploiter les arbres en laissant des souches de 1,30 m de hauteur ou en les arasant complètement 	
		<ul style="list-style-type: none"> Effet bélier possible par mise en mouvement d'arbres cassés 	<ul style="list-style-type: none"> Abattre en oblique de la pente et laisser au sol des arbres ne pouvant être mis en mouvement 	
	<ul style="list-style-type: none"> Canalisation de l'écoulement si présence d'un couloir 	<ul style="list-style-type: none"> Effet "d'embâcle" par accumulation derrière des troncs au sol en travers de la pente 	<ul style="list-style-type: none"> Maintenir une densité élevée dans une bande de 25 m de part et d'autre d'un couloir 	
			<ul style="list-style-type: none"> Arbres tombant sur des enjeux 	<ul style="list-style-type: none"> Éliminer les arbres pouvant, lors de leur chute, atteindre des enjeux Mêmes conditions d'abattage que ci-dessus

Cemagref - Nicole Sardat

Essence	Résistance mécanique par rapport au Hêtre	Gradient de résistance mécanique
Robinier	1,65	
Chêne	1,31	
Hêtre	1,00	
Merisier	0,92	
Charme	0,92	
Frêne	0,89	
Pin sylvestre	0,68	
Douglas	0,68	
Érable	0,68	
Pin noir	0,67	
Sapin	0,60	
Mélèze	0,54	
Épicéa	0,54	
Cèdre	0,40	
Pin à crochets	0,40	



Bloc arrêté par un tronc
Hauteur de l'impact

Cemagref - Frédéric Berger



Pierre bloquée par une cépée de noisetiers

Cemagref - Frédéric Berger



Tranchée ouverte en forêt par des blocs de plus de 5 m³

Cemagref - Frédéric Berger



Impact en hauteur sur un tronc

Cemagref - Frédéric Berger



Cemagref - Frédéric Berger

- 1 - Impact frais sur un tronc
- 2 - Impact ancien
- 3 - Effet d'un chablis en oblique de la pente



Cemagref - Frédéric Berger

Bloc de 5 m³ arrêté en forêt

Bibliographie

DORREN L.K.A., BERGER F., MÉTRAL R. 2005. La forêt est un filet de protection naturel contre les chutes de pierres. La Forêt 12/05, pp 10-12.

Site Internet : www.rockfor.net (utilitaire de calcul)

Cette fiche peut être utilisée pour rédiger le volet recommandation et prescription des zones vertes d'un document de prévention des risques naturels. Le **tableau 3.3.24** propose un exemple de rédaction.

Prescriptions	Recommandations	Zones vertes N° xx
		GESTION FORESTIERE
		Défrichage
x		Interdit (mais possibilité d'autorisation sous réserve de ne pas aggraver les risques et de ne pas en provoquer de nouveaux)
		Coupes
x		Interdiction de toute coupe à blanc de plus de 50 ares d'un seul tenant et de plus de XX mètres de long calculée dans le sens de la pente et de XX mètres de large
x		Deux coupes jointives devront être espacées de 20 ans minimum
	x	Sylviculture jardinatoire en réalisant des trouées de régénération de la taille d'un parquet voire d'un bouquet
	x	Sylviculture jardinatoire avec agrandissement progressif des trouées de régénération
	x	Pérenniser le mélange des essences feuillues présentes
	x	Maintien de 1/5 des tiges en essences feuillues pour la stabilité du peuplement
	x	Purger les arbres instables pouvant provoquer des départs de blocs rocheux
	x	Lors de l'exploitation forestière laisser des souches de 1.30 m de haut
x		Prendre toutes les dispositions requises pour protéger le bivoies et le spersonnes lors de la réalisation des intervention sylvicoles
x	x	Les bois laissés au sol doivent être positionnés en oblique de la pente et ancrés
	x	Rajeunir les taillis de 50 ans et plus
		Voiries
x		Tout projet de création de piste et/ou de route forestière doit être soumis, en plus des services directement concernés, au service instructeur de ce document pour autorisation de réalisation

Tableau 3.3.24

Proposition de fiche type de recommandation et prescription sylvicoles pour une zone verte

Principe, méthode et grilles de classification en Zones d'Interventions Forestières Prioritaires (ZIFP)

Principe et objectifs de la classification en ZIFP

L'analyse "enjeux-risques" est une méthode d'évaluation du niveau de risque naturel reposant sur le croisement des données relatives aux phénomènes naturels et aux enjeux menacés. Cependant, cette analyse ne distingue pas le rôle de protection que peuvent offrir les peuplements forestiers. Bien souvent, seule leur disparition permet aux gestionnaires d'apprécier a posteriori leur rôle de protection. Faute d'anticiper ces évolutions, le gestionnaire ne peut que se trouver en permanence en train de "courir derrière l'urgence" pour y porter remède en général à coût élevé. La classification en ZIFP a été élaborée afin de permettre de cibler au mieux le lieu et la nature des interventions à réaliser.

Elle est basée sur la quantification de la capacité des peuplements forestiers à maîtriser les aléas naturels. Cette méthode prend en compte la nature et l'importance des aléas naturels, la structure et les paramètres dendrométriques des peuplements et l'importance des enjeux menacés. Une cotation en valeur relative du degré de protection rempli par les peuplements forestiers est déterminée pour des unités territoriales homogènes. En tenant compte des priorités d'intervention (définies par l'importance des enjeux) et de l'urgence de réalisation des interventions (définie par la stabilité des peuplements), l'utilisation des grilles de cotations (réactualisées en 2007 pour les chutes de pierres) permet de déterminer au final des Zones d'Interventions Forestières Prioritaires (**figure 3.3.64**).

Méthode de classification en ZIFP

La méthode de classification en zones d'interventions forestières prioritaires a été construite sur la détermination et la cotation d'unités territoriales forestières homogènes au regard de la problématique risque. Les unités territoriales homogènes sont obtenues par la réalisation d'un certain nombre de croisements

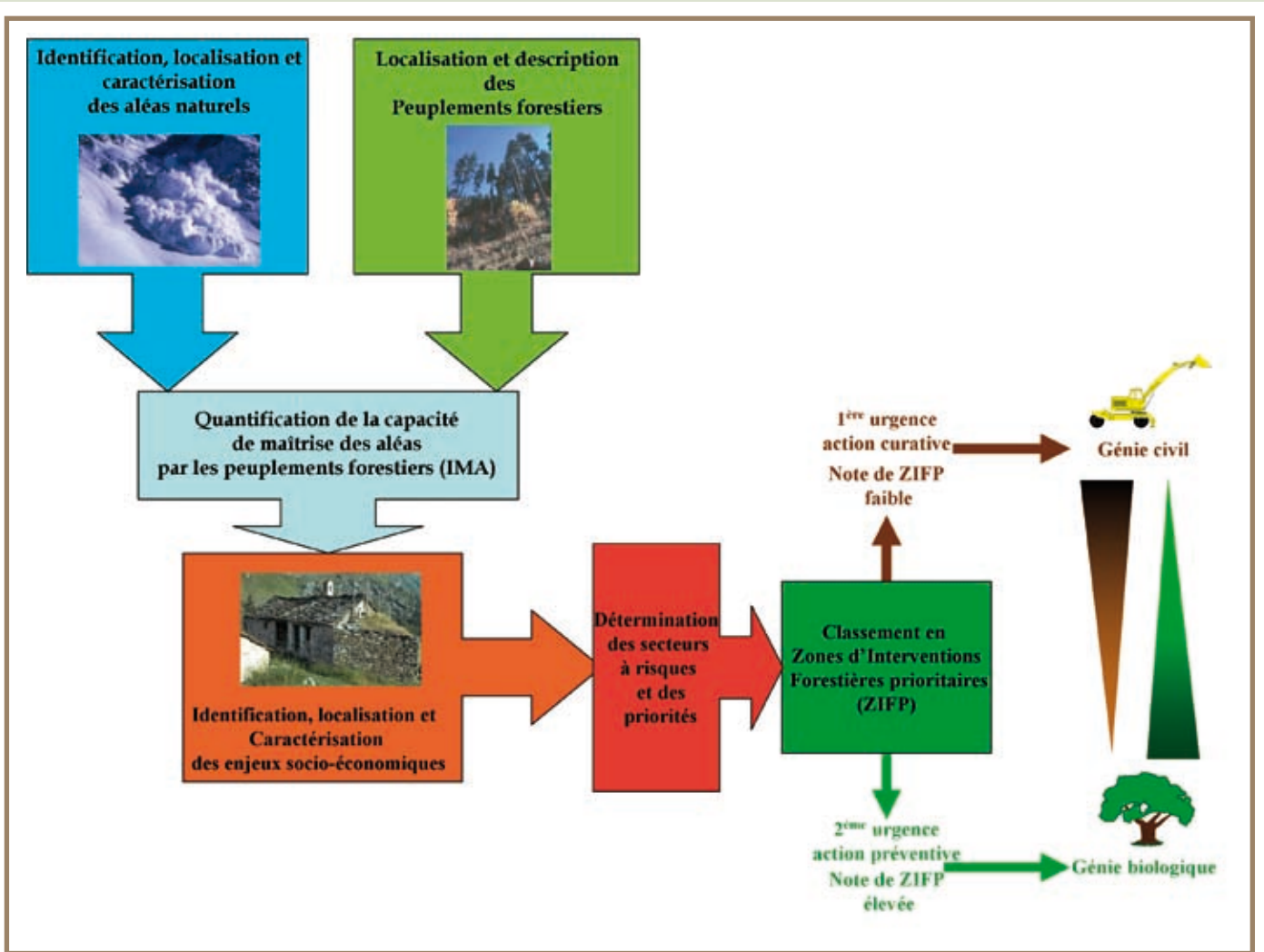


Figure 3.3.64 Principe de la classification en ZIFP (d'après Berger F., Lievois J., 1998)

cartographiques. Leur classification est réalisée en utilisant des grilles de cotation des principaux paramètres (maîtrise des aléas en fonction du type de peuplement et de la nature des aléas, importance des enjeux, stabilité forestière). Pour réaliser cette méthodologie il convient donc:

- de répertorier les documents cartographiques et les études réalisées qui recensent et décrivent les aléas naturels, les forêts, et les enjeux socio-économiques de la zone d'étude;
- d'enrichir ou de réaliser ces documents si ceux-ci sont inexistantes ou incomplets;
- de réaliser les croisements cartographiques nécessaires à la mise en œuvre des clefs de cotation.

La mise en œuvre de cette méthode de classification des forêts à fonction de protection ne peut qu'être facilitée et optimisée si les croisements cartographiques sont réalisés avec un SIG.

Réalisation de la carte de synthèse des aléas naturels

Elle est obtenue en croisant les cartes de localisation des aléas naturels disponibles sur le secteur d'étude. Pour les chutes de pierres les cartes disponibles doivent être complétées par les informations issues de l'analyse du MNT telle que celle présentée dans cet ouvrage. Chacune des zones assujetties à un aléa doit se voir attribuer une note d'aléa qui exprime son intensité.

Réalisation de la carte forestière

L'objectif de cette carte est de localiser les limites administratives des forêts de la zone d'étude et des unités territoriales où les peuplements forestiers sont homogènes vis-à-vis des conditions de stabilité (stable, instable), de couvert forestier ($\leq 30\%$, $30\% < < 70\%$, $\geq 70\%$) ou de surface terrière et d'essences (résineux, feuillus, mixtes). Cette carte est obtenue par le report sur un fond de plan des informations provenant de

photo-interprétation et par les résultats de l'enquête de description des peuplements forestiers réalisée soit auprès des personnels de terrain soit par les personnels de terrain. Cette enquête doit être réalisée en utilisant la fiche d'inventaire présentée dans ce chapitre. La densité de points d'inventaire doit être dans la mesure du possible d'un point par hectare. Une pré-classification des zones forestières à partir de photo-interprétation et de l'analyse des données des aménagements forestiers permet d'optimiser la phase d'inventaire de terrain.

Réalisation de la carte de synthèse forêt-aléas naturels

Cette carte est le résultat du croisement de la carte forestière avec la carte des aléas naturels. Elle permet de déterminer des unités territoriales homogènes parcourues par un ou plusieurs aléas naturels. Un indice de maîtrise de l'aléa naturel (IMA) par le peuplement forestier est calculé pour chacune des unités. Il doit rendre compte de la capacité d'un peuplement forestier à maîtriser un aléa naturel. Il est déterminé grâce à une clef di- ou trichotomique qui prend en compte le couvert ou la surface terrière, le type d'aléa (chutes de pierres, avalanches; glissements de terrain, aléas torrentiels), son origine (interne ou externe) et son importance (potentiel ou actif). Les grilles de cotation des IMA pour les mouvements rocheux sont présentées dans le paragraphe suivant. Ce sont des grilles de cotations relatives permettant de classer les peuplements les uns par rapport aux autres.

Ainsi une note de 4 ne veut pas dire que le peuplement offre une maîtrise de l'aléa 4 fois supérieure à un peuplement ayant une note de 1; mais simplement, que ce peuplement offre une meilleure maîtrise de l'aléa.

Réalisation de la carte des enjeux socio-économique

Les enjeux socio-économiques sont le résultat des activités humaines qui peuvent être un jour ou l'autre menacés par un ou plusieurs phénomènes naturels. Ils regroupent donc tous les types de constructions (habitations, infrastructures publiques ou liées aux activités industrielles, artisanales et commerciales), de voies de communication mais aussi, les forêts, les champs ou encore les activités de plein air.

La carte des enjeux socio-économiques est une localisation géographique de ces enjeux en fonction de leur nature. Leur hiérarchisation nécessite de disposer d'informations caractérisant leur nature et donc leur importance. Le classement en niveaux en fonction de la nature des enjeux ne peut se faire que par décision collégiale de l'ensemble des acteurs du territoire concernée ou imposée par l'autorité de gestion du territoire concerné.

Réalisation de la carte des Zones d'Interventions Forestières Prioritaires

Le croisement de la carte forêt-aléas naturels avec celle de l'importance des enjeux socio-économiques permet d'obtenir la carte des unités forestières concernées par un ou des risques naturels. Chacune de ces unités doit alors faire l'objet de l'attribution d'une note de ZIFP. Pour cela, il faut utiliser la grille de classification proposée dans cet ouvrage. La clef de classification en ZIFP repose sur le croisement de la note d'indice de maîtrise de l'aléa naturel, de celle de l'importance de l'enjeu menacé et de celle de stabilité du peuplement forestier.

La stabilité d'un peuplement forestier caractérise le fait qu'il puisse ou non résister à des contraintes telles que les tempêtes, des attaques phyto-sanitaires, des aléas naturels et se régénérer. L'attribution de la note de stabilité se fait à dire d'expert au regard des descripteurs utilisés dans la fiche d'inventaire.

Elle est également bien adaptée à une utilisation dans le cadre de l'élaboration des plans de prévention des risques (PPR) pour la localisation de zones vertes. En effet, une Zone Verte n'est ni plus ni moins, pour un secteur homogène au regard d'un risque naturel, qu'un regroupement des ZIFP présentes dans ce secteur. De plus, cette méthode nécessite des documents cartographiques très précis (cartes des aléas, carte des peuplements forestiers par exemple) et des résultats d'enquête sur le terrain. Elle semble donc bien adaptée à l'échelle communale des PPR.

Les grilles de cotation de la classification en ZIFP

La cotation des enjeux

Niveau d'enjeu	Note
nul	0
faible	1
moyen	2
fort	3

Tableau 3.3.25 Cotation des enjeux

La cotation de l'Indice de Maîtrise de l'Aléa chutes de pierres et de blocs

La protection offerte par la forêt contre les chutes de pierres est essentiellement due à la capacité de dissipation d'énergie des arbres. Cette capacité dépend de l'essence des arbres, de leurs diamètres et du nombre d'arbres présents dans la zone de propagation. La valeur de ces paramètres dépend avant tout de l'énergie des projectiles lors de leur entrée en forêt. Celle-ci est entre autre déterminée par: la hauteur de chute initiale, la distance d'entrée en forêt, le volume du projectile. La probabilité de rencontre entre le projectile et un arbre dépend de la forme du bloc, du nombre d'arbre et de leur diamètre. La surface terrière d'un peuplement associé à sa densité permet de rendre compte du diamètre moyen d'un peuplement. Ainsi l'IMA sera d'autant plus fort que la distance d'entrée en forêt sera courte, la densité et la surface terrière seront élevées (**tableaux 3.3.26 et 3.3.27**). Pour un volume total de 500 m³ et plus, l'IMA est de 0.

IMA : chutes de pierres (bloc < 5m ³ , longueur de bande boisée > 250m, zone de départ en forêt)		Densité (nombre de tige/ha)		
		<250	250-500	500<
Surface terrière (m ² /ha)	<25	1	3	4
	>25	2	5	6

Tableau 3.3.26 Grille de cotation IMA chutes de pierres avec la zone de départ située en forêt

IMA : chutes de pierres (bloc < 5m ³ , longueur de bande boisée > 250m, zone de départ en amont de la forêt)		Densité (nombre de tige/ha)		
		<250	250-500	500<
Surface terrière (m ² /ha)	<25	0	1	3
	>25	0	4	5

Tableau 3.3.27 Grille de cotation IMA chutes de pierres avec la zone de départ située en amont de la forêt

La cotation de la stabilité forestière

La cotation de la stabilité permet de distinguer deux types de peuplement: les peuplements instables et les peuplements stables. La stabilité représente l'urgence de l'intervention. Les peuplements instables, dont l'évolution naturelle fera diminuer leur IMA, sont ceux auxquels on accorde la première urgence. La stabilité doit être évaluée sur une période de 30 ans. Sur le terrain, on considère que le peuplement est instable si l'IMA évolue négativement (par diminution de la classe de couvert, régularisation de la structure, diminution de la densité et/ou de la surface terrière) durant cette période (**tableau 3.3.28**).

La cotation de la priorité d'intervention

La cotation de la priorité s'obtient en croisant la note de stabilité avec la note d'enjeu définie dans le **tableau 3.3.28**. Pour un IMA donné, on a ainsi 3 degrés de priorité (**tableau 3.3.29**).

Stabilité du peuplement	Note de stabilité
Peuplement instable	1
Peuplement stable	2

Tableau 3.3.28 Cotation de la stabilité forestière

Enjeu	Stabilité	Degré de priorité	
1	1	+	Faible
	2	+	
2	1	++	Moyen
	2	++	
3	1	++	Fort
	2	+++	

Tableau 3.3.29
Cotation de la priorité

La cotation en ZIFP

Avec la grille de cotation de la priorité d'intervention, on détermine seulement l'urgence et la priorité au sein d'une même classe d'IMA. Il faut aussi réaliser une hiérarchisation des priorités entre les différentes classes d'IMA: c'est l'objectif de la cotation en ZIFP. Cette grille a été construite suivant le principe que pour une même valeur d'IMA, l'indice de ZIFP augmente avec le degré de priorité (**tableau 3.3.30**).

Tableau 3.3.30 Grille de détermination des ZIFP

IMA	1			Ne concerne pas les travaux forestiers		
	+	++	+++			
0-1	Amélioration du couvert, et/ ou de la densité et/ou de la surface terrière Recherche stabilité Diminution des enjeux			Degré de priorité		
2				2	2	3
3				2	3	4
4				3	4	5
5				4	5	6
6				5	6	6
				Génie civil et Reconstitution Forestière		
				Travaux d'amélioration et / ou gestion sylvicole		

Comme pour les IMA, le classement en ZIFP est relatif: on classe les peuplements les uns par rapport aux autres. La détermination des ZIFP a pour objectif d'aider les forestiers, désireux d'améliorer la fonction de protection de leur forêt, à établir la programmation des travaux forestiers nécessaires. La carte des ZIFP permet une vision comparative du degré de protection des différents secteurs forestiers et ainsi de déterminer celui où la fonction de protection est satisfaisante ou au contraire insuffisante. On peut alors essayer de maintenir ou d'améliorer ce niveau de protection par une gestion sylvicole adaptée.

L'échelle verticale de la grille de cotation en ZIFP indique la valeur de l'IMA et le type d'opération à mener dans l'objectif d'augmenter le degré de protection offert par les peuplements. Il y a deux façons d'améliorer la fonction de protection. On peut soit:

- Augmenter l'IMA:
 - en diminuant l'intensité des aléas ce qui ne peut se faire que par l'emploi des techniques de génie civil;
 - ou en augmentant les paramètres dendrométriques du peuplement lorsque ceux-ci n'ont pas encore atteint leur optimum.
- Diminuer le degré de priorité:
 - en diminuant le risque ce qui revient à diminuer l'importance des enjeux, on se situe donc hors du domaine d'intervention du forestier;
 - ou en améliorant la stabilité des peuplements, ce qui correspond aux travaux d'amélioration.

3.3.6 La réalisation d'ouvrages de génie biologique avec les produits des coupes

En zone de montagne on observe deux grands types d'abandon de gestion:

- un abandon de gestion forestière dans les secteurs pour lesquels l'exploitation et la commercialisation des bois n'est plus rentable;
- une déprise agricole par abandon de pâturages en altitude et de zones agricoles situées en bas de versant.

Seul le premier cas concerne cet ouvrage. Ce sont les zones forestières situées sur les plus fortes pentes qui sont les premières concernées. Or, ces fortes pentes sont bien souvent le siège de phénomènes de types mouvement gravitaires rapides tels que les chutes de pierres. Par conséquent, les peuplements forestiers présents ont souvent un rôle de protection non négligeable qui s'ils ne permettent pas d'éteindre ces

phénomènes sont par contre en mesure de l'écarter. L'abandon de gestion forestière se traduit à un retour au cycle d'évolution naturelle des peuplements: la sylvigénèse. Au sein de ce cycle coexistent des stades ne permettant pas de maintenir la protection offerte par les peuplements forestiers à un niveau d'efficacité acceptable. Le forestier est ainsi obligé d'intervenir afin de maintenir les peuplements à un stade compatible avec la pérennisation d'un niveau de protection efficace. Ces opérations ne sont pas rentables en termes de vente de bois car la sortie des bois est déficitaire par rapport au prix de vente. Il devient alors nécessaire de laisser les bois abattus sur place. Dans les zones assujettis aux chutes de pierres, ces bois peuvent être réutilisés afin de réaliser des ouvrages de protection de type génie biologique.

Afin d'optimiser l'utilisation des bois laissés sur place il est nécessaire de proposer aux gestionnaires des directives techniques (ancrage des troncs, angle des troncs par rapport à la ligne de plus grande pente, durée de ce type d'ouvrage en fonction des essences utilisées) et de les illustrer par des exemples de réalisation (mise en place de sites pilotes de démonstration, exemples européens les plus pertinents).

Dans le cadre du projet PROVIALP nous avons réalisé ce guide directive technique et un catalogue photographique des principaux ouvrages de ce type.

Principe théorique de l'usage des bois laissé sur place pour réaliser des ouvrages de génie biologique pare pierre

Le principe général est d'utiliser le produit des coupes afin d'accroître la rugosité du sol et ainsi offrir des obstacles à la propagation de projectiles rocheux. Les produits des coupes sont au nombre de trois:

1. *Les souches*. Elles constituent des pieux naturels qui vont pouvoir filtrer en fonction de leur diamètre et répartition au sol les projectiles rocheux en fonction de leur granulométrie et leur énergie. De plus, de part leur ancrage naturel dans le sol elles vont pouvoir servir de support à des ouvrages nécessitant l'usage de grumes. L'efficacité des souches va dépendre: de l'essence des arbres, du type de système racinaire (les systèmes traçant étant plus difficile à déraciner) et donc de la nature du sol prospecté par celui-ci, du diamètre de la souche et de sa hauteur. Des souches de 30 cm de diamètre devront avoir une hauteur d'au moins 1.30 m. Par ailleurs, si les conditions d'exploitation ne permettent pas de laisser une hauteur utile de 1.30 m, il faudra alors araser complètement les souches, ce parallèlement à la ligne de plus grande pente, afin d'éviter de créer des tremplins naturels qui peuvent occasionner des rebonds plus important aux projectiles. Les souches vont aussi avoir un rôle de déflecteur qui va permettre de dévier de leur trajectoire les blocs rocheux.
2. *Les grumes et billons*. Ils interviennent comme déflecteurs et bloqueurs. Cette action n'est efficace que si ces éléments ne peuvent se mettre en mouvement lors de l'impact des pierres. Il faut donc impérativement les ancrer et/ou les arrimer sur des structures dont la probabilité de mise en mouvement est faible. Ainsi les souches et les arbres en place (vivants ou morts) doivent être utilisés comme structure de support. Afin d'accroître la durée de survie des ouvrages construits avec les grumes et billons il faut veiller à limiter la vitesse de décomposition de ces éléments. Pour cela il faudra veiller à limiter si possible la surface de contact entre la grume et le sol afin de limiter la teneur en eau de la grume. En effet, plus la teneur en eau sera élevée plus l'action des agents biologiques (champignon et entomofaune) de décompositions sera efficace. De plus, il faudra veiller à ce que la sève et l'eau des produits fraîchement abattus s'évacue au plus vite. Pour cela il faudra scarifier l'écorce et l'aubier. Un écorçage complet n'est pas nécessaire. De simple "coup" de tronçonneuse sont tout aussi efficaces.
3. *Les rémanents (branches)*. Si le risque d'incendie est faible dans la zone de travail alors les branchages peuvent être utilisés pour construire des andains qui pourront, en fonction de leur largeur et hauteur utiles, stopper les pierres de faibles dimensions.

Tous ces éléments, individuellement ou combinés entre eux, peuvent être utilisés pour construire des ouvrages pare pierres "biologiques".

Les grumes, troncs billons et les rémanents peuvent aussi être utilisés comme structures d'amortissement (notion de blindage actif) d'ouvrages de génie civil.

Une des principales questions est pour les bois laissés sur place de déterminer l'angle qu'ils doivent faire avec la ligne de plus grande pente. En effet, le bois étant un matériau biodégradable par excellence, celui-ci aura donc une durée de survie limitée. Ainsi, si un bois mis en travers de la pente arrête des pierres et blocs rocheux, ceux-ci se remettront un jour au l'autre en mouvement et ce sous l'effet de la décomposition de ce bois et donc de perte de sa résistance mécanique. Il convient donc d'utiliser les troncs laissés sur place pour freiner les blocs et les diriger dans des secteurs où la pente est telle qu'après leur arrêt ils ne pourront se remettre en mouvement.

Détermination des angles d'abattage par rapport à la ligne de plus grande pente

L'angle d'abattage dépend de la zone dans laquelle les travaux sont réalisés. Dans la zone de départ, il est bien souvent impossible de réaliser des interventions autres que la purge des arbres instables. Par conséquent, il faut proscrire la mise en travers d'arbre dans la zone de départ. Par contre, au plus proche de la zone de départ le gestionnaire devra mettre les bois en travers. En effet, cette disposition permettra dans un premier temps d'arrêter les projectiles et dans un deuxième temps, après la décomposition et disparition des bois, re-larguera les projectiles avec une vitesse initiale nulle. Cette disposition devra être complétée, dans la mesure du possible, par des ouvrages annexes situés plus bas dans la pente. Ce mode de disposition est aussi celui à utiliser dans les zones d'arrêt naturel. En effet, dans ces secteurs les projectiles s'arrêtent d'eux-mêmes et ne peuvent se remettre en mouvement. Par conséquent des bois en travers ne pourront que réduire la distance d'arrêt et le risque de re-largage est nul. Par contre dans la zone de propagation, il faudra veiller à disposer les bois en oblique, leur rôle étant de freiner les blocs afin qu'ils s'arrêtent au plus vite quand les conditions de pente le permettent. La **figure 3.3.65** présente le schéma général d'implantation en fonction des différentes zones.

Pour déterminer l'angle optimal d'abattage dans la zone de départ nous avons réalisé des expériences à échelles réduites mais in situ sur un site expérimental. Sur celui-ci des expériences de propagation sans obstacles ont été réalisées avec des projectiles de formes et masse différentes, puis les mêmes expériences ont été réalisées après avoir installé des rondins de bois, ancrés, sur la pente. Les **figures 3.3.66 à 3.3.71** présentent le site et les projectiles qui ont été utilisés.

Au total 4 dispositifs expérimentaux ont été utilisés:

- rondins positionnés perpendiculairement à la ligne de plus grande pente: dispositif dit à angle 0°;
- rondins positionnés en oblique avec un angle de 20°: dispositif dit à angle 20°;
- rondins positionnés en oblique avec un angle de 45°: dispositif dit à angle 45°;
- aucun rondin: dispositif dit sans bois (ssbois).

Figure 3.3.65

Représentation schématique de la mise en travers ou en oblique des bois par rapport à leur situation sur la pente

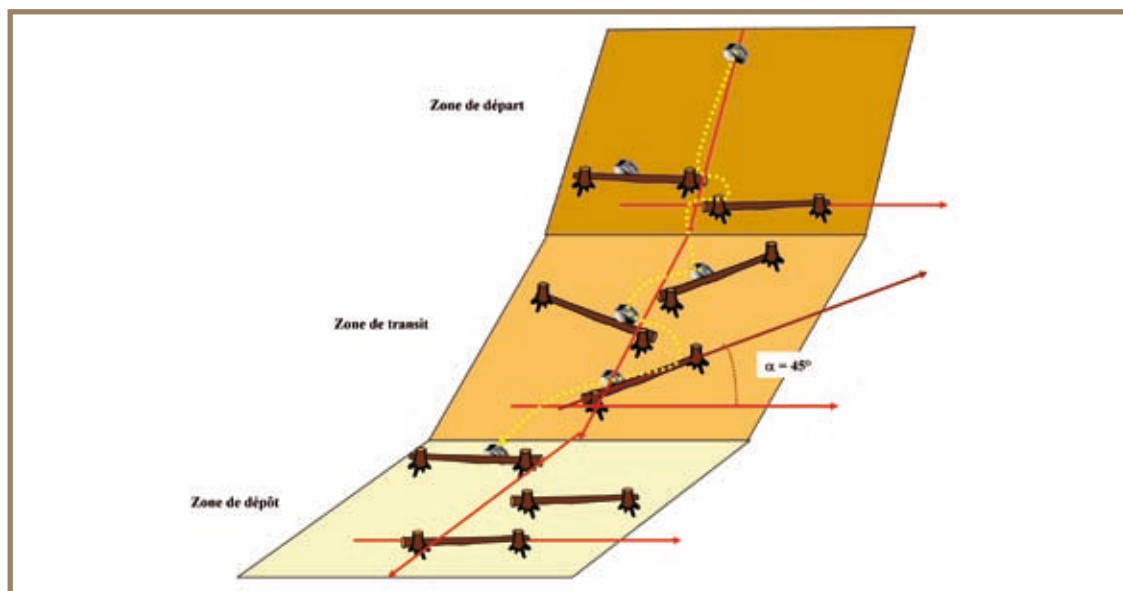




Figure 3.3.66 Vue d'ensemble du site expérimental du Col de Vence (38)



Figure 3.3.67 Vue latérale du site expérimental du Col de Vence (38)



Figure 3.3.68 Les différents types de projectiles utilisés sur le site expérimental du Col de Vence (38)



Figure 3.3.69 Positionnement de rondins en oblique de la pente sur le site expérimental du Col de Vence (38)



Figure 3.3.70 Exemple d'expérience réalisée sur le site expérimental du Col de Vence (38)

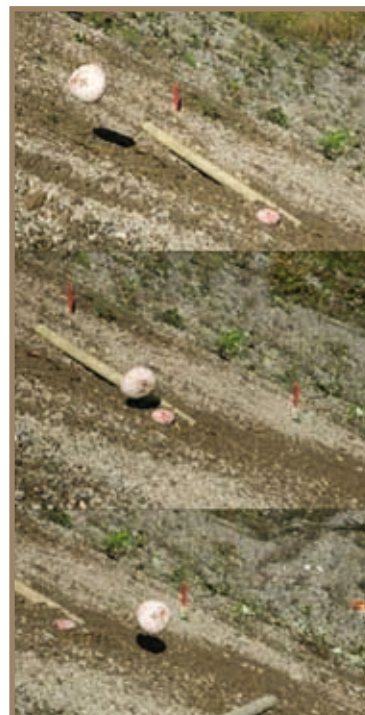


Figure 3.3.71 Exemple d'impact d'un bloc discoïdal sur un rondin de bois

Les figures 3.3.72 et 3.3.73 présentent les statistiques observées sur les vitesses moyennes et la hauteur moyenne de passage des projectiles.

Il ressort de ces graphiques, que l'angle de positionnement des rondins le plus efficace est celui de 45°. En effet cet angle permet de diminuer la vitesse moyenne de passage. Par contre, il est à noter que les 3 dispositifs avec rondins occasionnent une augmentation de la hauteur moyenne de passage. Ceci est dû à l'effet de rebond des projectiles sur la partie sommitale des rondins. Pour les trois dispositifs avec rondins la distance d'arrêt des projectiles est inférieure à celle observée avec le dispositif sans rondins. Pour l'ensemble des trois dispositifs avec rondins et, dans les conditions de notre site expérimental du Col de Vence, la distance maximale d'arrêt observée est de 80% inférieure à celle observée pour le dispositif sans rondins.

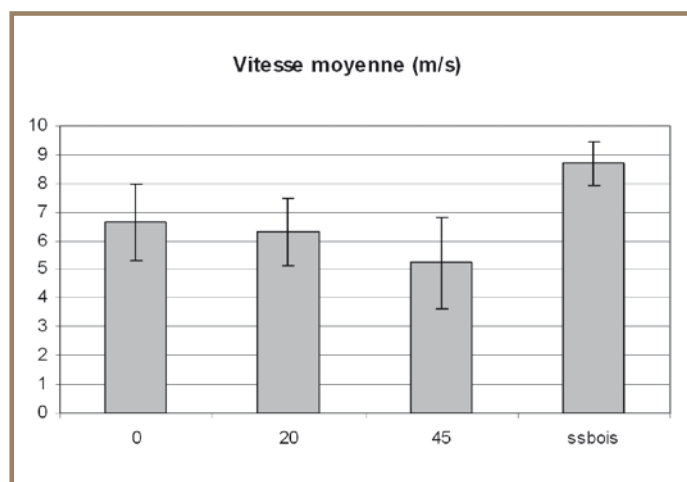


Figure 3.3.72 Statistiques sur les vitesses moyennes de passage pour chacun des 4 dispositifs

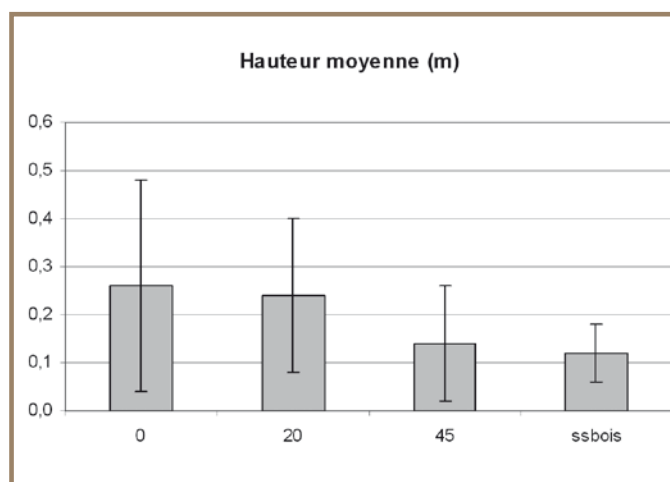


Figure 3.3.73 Statistiques sur les hauteurs moyennes de passage pour chacun des 4 dispositifs

Recommandations

Au regard de ces expériences, on peut donner comme recommandations aux gestionnaires:

- d'abattre dans la zone de transit les arbres en oblique de la pente avec un angle de 45°;
- l'apex de l'arbre abattu doit être dirigé à l'amont et ce afin d'éviter que la grume ne dévale la pente, tête la première;
- le fait de laisser des arbres en travers, s'ils diminuent la vitesse de passage et la distance d'arrêt, peut par contre augmenter la hauteur de passage par effet tremplin. L'abattage avec un angle de 45° permet de limiter cet effet tremplin;
- en fonction de la dimension des projectiles, il peut s'avérer (en fonction des conditions de pente et donc de travail des bûcherons) utile d'empiler des troncs afin d'augmenter la hauteur de l'obstacle. Mais cette empilage d'un tronc sur un autre nécessite de solidariser, avec des câbles, les troncs aux souches qui serviront de support à cet ouvrage;
- dans la mesure du possible et suivant la technique d'abattage utilisée le tronc doit être ancré à l'amont de sa souche, ou à l'amont d'autres arbres;
- il est possible de repositionner un arbre au moyen d'un tire for;
- au plus proche de la zone de départ et dans la zone d'arrêt l'abattage peut se faire en travers de la pente et orienté suivant les courbes de niveau;
- afin d'accroître la durée de survie des ouvrages construits avec les grumes et billons il faut veiller à limiter la vitesse de décomposition de ces éléments. Pour cela il faudra veiller à limiter si possible la surface de contact entre la grume et le sol afin de limiter la teneur en eau de la grume;
- pour éviter des problèmes phytosanitaires et le pullulement d'insectes xylophages il faut veiller à ce que la sève et l'eau des produits fraîchement abattus s'évacue au plus vite. Pour ce faire la meilleure technique est d'écorcer les troncs des arbres abattus. Cette technique n'est pas sans poser des problèmes. Pour écorcer un bois il faut commencer par l'ébrancher, ce qui génère un risque de dévalement

de la grume. De plus l'écorçage se réalise sur des arbres fraîchement abattus, la sève présente sur la grume écorcée facilite le glissement de celui-ci sur le sol (technique utilisée de longue date pour faciliter le débardage des bois par lançage dans la pente). Une technique alternative à l'écorçage complet est la scarification du tronc avec une tronçonneuse. Cette opération consiste à strier les troncs dans le sens de la longueur. L'espacement entre deux stries ne doit pas excéder 15 cm afin que les larves de bostryches ne puissent développer leurs galeries;

- dans la zone de transit il est possible, pour des raisons de sylviculture et quand il n'est pas possible d'abattre un arbre de le faire mourir sur pied en procédant à l'annelation de son écorce en pied.

Les techniques de positionnement des arbres en oblique de la pente

Une telle disposition des produits des coupes nécessite des techniques d'abattages spécifiques et d'ancrer les troncs afin d'éviter qu'ils ne se mettent en mouvement et dévalent les pentes.

Le positionnement des troncs peut se faire après les avoir abattus. Cela nécessite de déplacer les grumes soit avec un tracteur forestier quand les conditions d'accessibilité le permettent, soit d'utiliser des treuils portables ou des tire fort. Au final, ce travail de remobilisation est dangereux et fastidieux et ne donne pas toujours les résultats escomptés.

L'autre possibilité est d'utiliser des techniques d'abattages permettant à la fois de suivre une direction d'abattage fixée par le bûcheron et d'ancrer la grume à l'amont d'un obstacle (souche, arbre, rocher, etc.).

Il existe trois principale technique que nous allons maintenant présenter.

Figure 3.3.74

Positionnement des différents traits de tronçonneuse nécessaires à la réalisation la technique ALPI. Vue perpendiculaire à la ligne de plus grande pente. La fente pour l'espalier peut être indifféremment positionnée à gauche et/ou à droite de la future souche et ce perpendiculairement à la ligne de plus grande pente

La technique ALPI

La technique ALPI permet de laisser à la fois une souche haute et d'ancrer automatiquement la grume sur sa souche et à son amont.

Le principe de cette technique est de façonner l'arbre à la tronçonneuse afin de créer un plan de glissement qui va diriger le tronc lors de sa chute. Ce plan de glissement est constitué par une écaille de bois qui est solidaire de la future souche. Sa réalisation nécessite de disposer d'un espalier afin que le bûcheron puisse travailler à au moins 80 cm du sol. Le tronc va se positionner automatiquement à l'amont de sa souche après que celui-ci est dans un premier temps "rebondi" sur le plancher de la fente d'abattage, puis dans un second temps recule tout en étant diriger par l'écaille de glissement (figures 3.3.74 à 3.3.76).

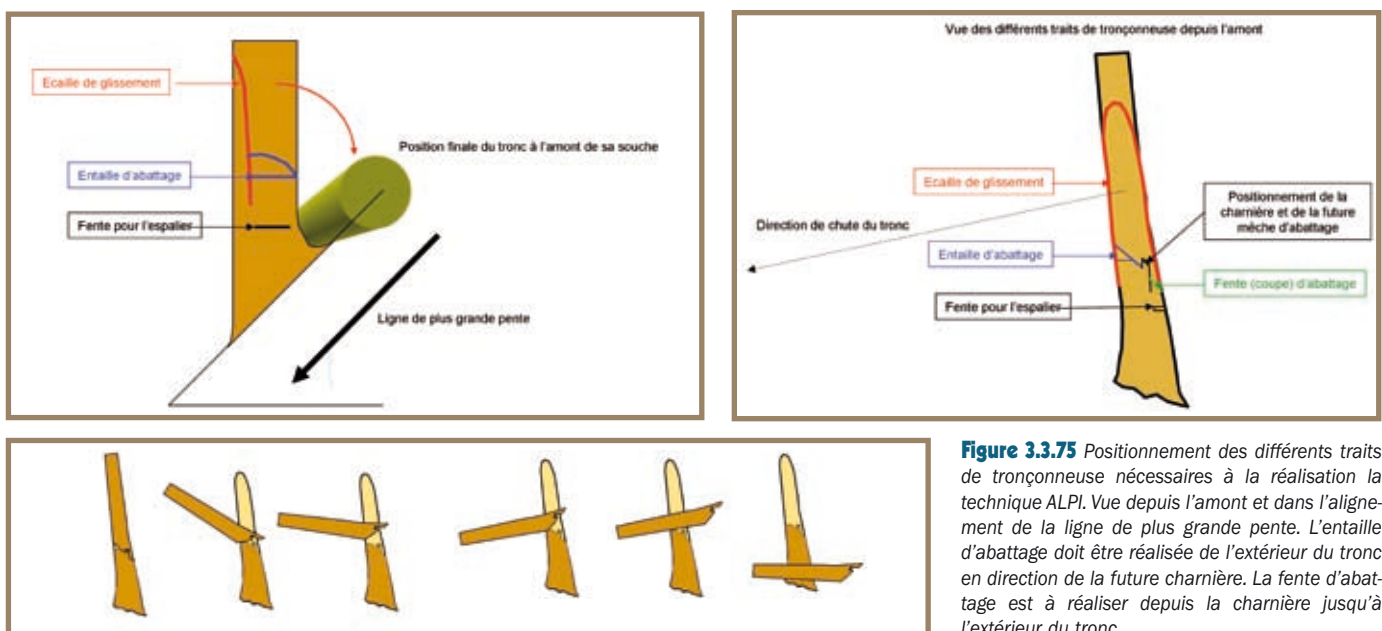


Figure 3.3.75 Positionnement des différents traits de tronçonneuse nécessaires à la réalisation la technique ALPI. Vue depuis l'amont et dans l'alignement de la ligne de plus grande pente. L'entaille d'abattage doit être réalisée de l'extérieur du tronc en direction de la future charnière. La fente d'abattage est à réaliser depuis la charnière jusqu'à l'extérieur du tronc

Figure 3.3.76 Représentation schématique du mouvement du tronc le long de l'écaille de glissement. Le tronc va rebondir sur le plancher de l'entaille d'abattage, puis reculer tout en étant diriger dans se mouvement de recul par l'écaille de glissement, pour finalement tomber à l'amont de sa souche. Vue depuis l'amont et dans l'alignement de la ligne de plus grande pente

Figure 3.3.77 Préparation du plan de glissement



Cette technique est dangereuse à réaliser et nécessite donc de disposer de bûcherons parfaitement formés à sa mise en œuvre. Le bûcheron doit impérativement:

- disposer d'une tronçonneuse en parfait état de marche et affûtée;
- laisser la tronçonneuse travailler par elle-même lors de la réalisation de l'écaillage de glissement (réaliser du haut vers le bas);
- disposer d'un espalier en aluminium;
- bien matérialiser (au besoin baliser) et dégager son chemin de fuite.

Les **figures 3.3.77** à **3.3.81** illustrent la réalisation de cette technique sur notre site de démonstration du Freney (Vallée de la Maurienne 73).

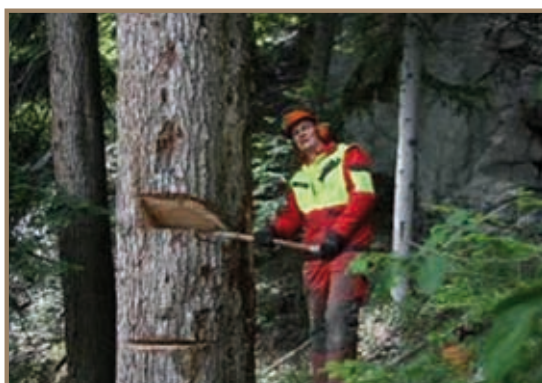


Figure 3.3.78 Préparation de la fente d'abattage



Figure 3.3.79 Chute de l'arbre (1)



Figure 3.3.80 Chute de l'arbre (2)



Figure 3.3.81 Résultat de cette technique d'abattage, la grume se bloque par elle-même à l'amont de sa souche

La technique d'abattage au câble

Le principe de la technique d'abattage au câble est d'imposer la direction de chute du tronc et ce en reliant par un câble l'arbre à abattre à un arbre pivot. Le câble doit être fixé au pied de l'arbre pivot et à mi-hauteur de l'arbre à abattre. Ce câble ne doit ni être tendu, ni reposer au sol. Lors de la chute de l'arbre, le câble va se tendre et ainsi imposer au tronc un mouvement circulaire autour de l'arbre pivot. Le rayon de ce mouvement est égal à la longueur totale du câble utilisé. L'arbre pivot doit être choisi à l'amont de l'arbre à abattre et non aligné avec celui-ci dans la ligne de plus grande pente.

Cette technique permet aussi de diriger le tronc abattu afin de le bloquer à l'amont d'arbres ou de souche situés à son aval. Ce positionnement s'obtient en libérant progressivement les serres câbles ou le tire fort situés au point d'ancrage autour de l'arbre pivot. Une telle action permet ainsi de laisser filer tout en le contrôlant le câble dans la pente et ce jusqu'à ce que le tronc trouve une position stable. Une telle position ne doit pas permettre au tronc de dévaler la pente et ce même après avoir été impacté par un ou des blocs rocheux (figures 3.3.82 à 3.3.84).

Les figures 3.3.85 à 3.3.92 illustrent un abattage de ce type sur notre site de démonstration du Freney.

Figure 3.3.82 Principe général du dispositif d'abattage au câble. La flèche noire matérialise la ligne de plus grande pente. L'arc de couleur rouge représente le positionnement initial du câble d'abattage. L'arbre pivot est situé à l'amont de l'arbre à abattre

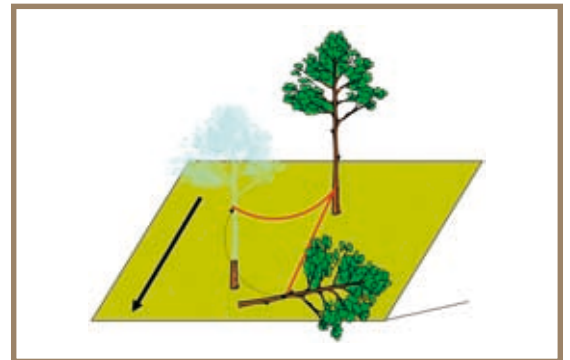
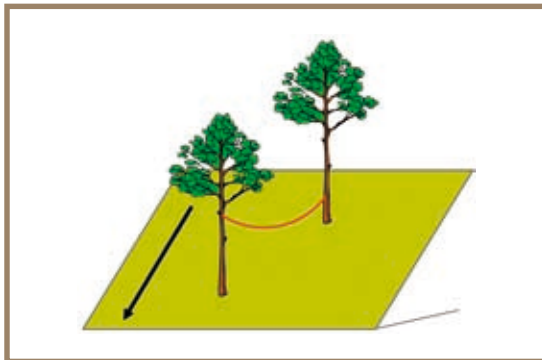


Figure 3.3.83 Mouvement circulaire imposé au tronc par le câble d'abattage

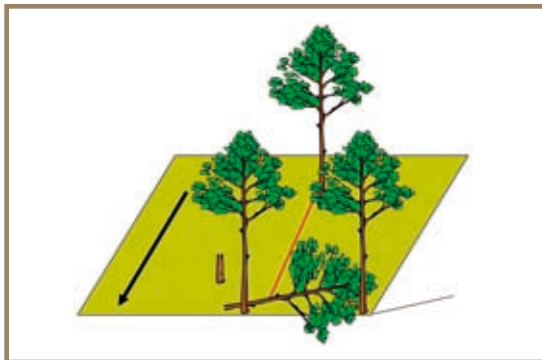


Figure 3.3.84 Exemple de positionnement final du tronc en utilisant le câble d'abattage pour bloquer le tronc sur des arbres ou des souches situées à l'aval. Ce positionnement s'obtient en libérant progressivement les serres câbles ou le tire fort du point d'ancrage autour de l'arbre pivot. Une telle action permet ainsi de laisser filer tout en le contrôlant le câble dans la pente et ce jusqu'à ce que le tronc se bloque à l'amont d'autres arbres ou souches



Figure 3.3.85 Positionnement du câble sur un arbre à l'amont de celui à abattre



Figure 3.3.86 Réalisation d'une fente d'abattage classique afin que la direction de chute soit orientée perpendiculairement à la ligne de plus grande pente



Figure 3.3.87 Chute de l'arbre (1) avec début de mise sous tension du câble



Figure 3.3.88 Chute de l'arbre (2), tension du câble



Figure 3.3.89 Chute de l'arbre (3), le câble est tendu et dirige le tronc



Figure 3.3.90 L'arbre est positionné au sol et retenu par le câble. Le bûcheron procède à l'ébranchage avant d'enlever le câble



Figure 3.3.91 Gros plan sur le point d'ancrage du câble sur la grume



Figure 3.3.92 Vue d'ensemble après l'ébranchage et avant le retrait du câble. Le câble va être détendu progressivement par le bûcheron qui contrôle ainsi la descente de la grume jusqu'à ce quelle se bloque sur les arbres situés à son aval

La technique d'abattage à double fente

Le principe de la technique à double fente, aussi dénommée "technique en V", est de réaliser deux entailles d'abattage inclinées dans la direction de chute souhaitée, puis de couper le coin de bois restant. Afin de maîtriser le mouvement initial de bascule du tronc, le bûcheron peut utiliser un vérin hydraulique. Pour cela il doit au préalable façonner dans la future souche un logement pour le cric hydraulique (**figure 3.3.93**). Les **figures 3.3.94 à 3.3.96** présentent une vue de dessus des entailles d'abattage à réaliser, de la coupe d'abattage et du mouvement que doit avoir la tronçonneuse pour tronçonner le coin de bois restant après la réalisation des deux fentes en V.

Cette technique d'entailles d'abattage en V ne peut être utilisée que quand le bûcheron dispose d'un chemin de fuite dépourvue d'obstacle et pour des pentes inférieure à 20°. Cette technique peut être utilisée en conditions d'exploitation difficiles mais il faut alors la jumeler avec la technique d'abattage au câble.



Figure 3.3.93 Exemple de logement pour un cric hydraulique (Photo Jirikowski, W. 2006)

Figure 3.3.94 Positionnement des deux entailles d'abattage (1) et matérialisation de la coupe d'abattage en V (2, aussi dénommé "coin en V") à tronçonner pour provoquer la chute de l'arbre

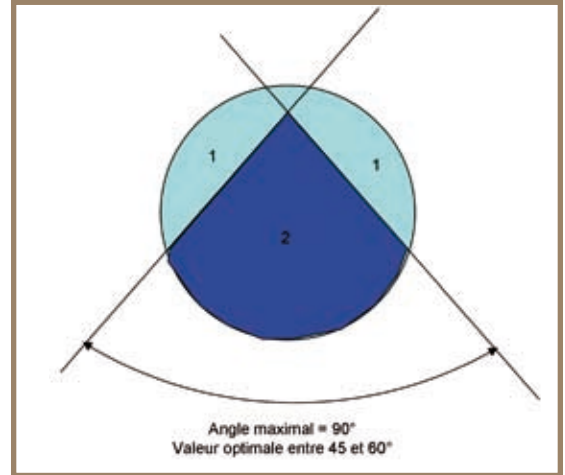


Figure 3.3.95 Exemple de double entailles d'abattage (Photo Jirikowski, W. 2006)

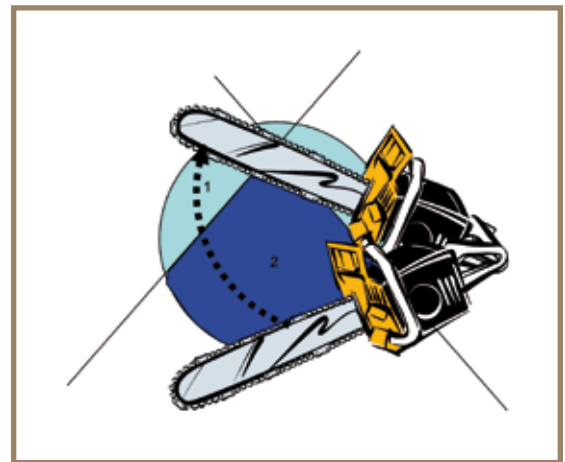


Figure 3.3.96 Direction de tronçonnage pour découper le coin en V

Catalogue photographique des principaux types d'ouvrages pare pierres réalisés avec les produits des coupes forestières

Nos collègues italiens ont présentés précédemment les ouvrages de génie biologique pare-pierres utilisés en Italie. Dans ce chapitre, nous apportons des compléments photographiques sur les principales techniques utilisés en Autriche et Suisse (figures 3.3.97 à 3.3.127). Pour les directives techniques de construction de ces ouvrages, elles sont similaires à celles présentés dans le chapitre 2.12.

Figure 3.3.97 Exemple de souche coupée à 1.30 m, partiellement écorcée et servant de protection à un plant protégé du gibier (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.98 Exemple de souches écorcées et sur lesquelles les troncs abattus sont ancrés (Autriche, vallée du Montafon)





Figure 3.3.99 Exemple d'ancrage de troncs sur des souches écorcées et des arbres vivants (Autriche, vallée du Montafon). Les troncs sont mis en travers car ce secteur est situé au pied de la zone de départ



Figure 3.3.100 Gros plan sur la mise hors sol du tronc écorcé



Figure 3.3.101 Exemple d'ancrage de troncs sur des arbres vivants (Autriche, vallée du Montafon). Les troncs sont mis en travers car ce secteur correspond au début de la zone d'arrêt



Figure 3.3.102 Exemple de dispositif en arrêtes de poisson avec ancrage de troncs sur des arbres vivants (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.103 Exemple d'élingage, à l'aide de câble métallique, de troncs sur des souches (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.104 Exemple d'ancrage de troncs sur des souches et de disposition en oblique. Le tronc au premier plan n'a pas été ancré et représente un danger car il peut glisser et dévaler la pente. Ce genre de situation est à proscrire (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.105 Exemple d'ancrage d'un tronc sur des arbres vivants (Suisse, Martigny)



Figure 3.3.106 Exemple d'utilisation de billons et de grumes pour construire des râteliers pare pierres à l'amont de filets pare pierres et qui ont été dimensionnés en conséquence (Autriche, Tyrol). Noter la présence de souches coupées à 1.30 m de haut entre les deux lignes de filets



Figure 3.3.107 Exemple de râteliers pare pierres et pare avalanche construits avec les produits d'une coupe (souches et troncs) (K. Kleemayer 2006)



Figure 3.3.108 Exemple de râteliers pare pierres construits avec les produits d'une coupe (souches et troncs) (Autriche, Tyrol). Noter la fixation des grumes sur les souches à l'aide de câbles métalliques et le système à claire-voie basé sur l'utilisation de rondins éviter le contact entre les grumes et faciliter l'écoulement de l'eau. Ceci est d'autant plus important que cet ouvrage est situé dans une zone de fort enneigement. La fonte de la neige et l'écoulement de l'eau de fonte sont facilitées par ce dispositif. (K. Kleemayer 2006)



Figure 3.3.109 Exemple de râteliers pare pierres construits avec des grumes ancrées sur des piquets métalliques (Suisse, Martigny). Noter la disposition en arêtes de poisson et la présence de filets pare pierres à l'amont. Le génie biologique est ici utilisé en complément du génie civil pour arrêter les pierres de faibles dimensions qui peuvent passer au travers des mailles du filet



Figure 3.3.110 Vue rapprochée du dispositif de la figure 3.3.109



Figure 3.3.111 Exemple de râteliers pare pierres construits avec des grumes et de disposition en andain des rémanents (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.112 Exemple de tripodes pare pierres et pare avalanches construits avec des grumes (Autriche, vallée du Montafon). Noter la présence de grume en travers à l'amont des tripodes



Figure 3.3.113 Dispositif de la figure 3.3.112 mais avec une prise de vue de l'aval vers l'amont. Noter la présence de grumes (ayant un arrêtees un bloc de 1.5 m³) en travers à l'aval des tripodes



Figure 3.3.114 Autre angle de vue du dispositif des figures 3.3.112 et 3.3.113 (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.115 Exemple de râteliers, tripodes pare pierres et pare avalanches construits avec des grumes (Autriche, vallée du Montafon). Noter la présence de grume en travers au sein et à l'aval du dispositif



Figure 3.3.116 Exemple d'utilisation de râteliers, tripodes et de grumes pour éteindre un couloir de chutes de pierres et d'avalanches (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.117 Exemple de pierre bloquée par un tripodes. (France, Vaujany)



Figure 3.3.118 Exemple d'utilisation conjointe du génie biologique et du génie civil, noter la présence de troncs en oblique et ancrés situés à l'amont des filets pare pierres (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.119 Autre exemple d'utilisation conjointe du génie biologique et du génie civil, noter la présence de troncs en oblique et ancrés situés à l'amont des filets pare pierres (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.120 Tronc en oblique et non ébranché afin de limiter le contact tronc-sol (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.121 Tronc en oblique (40°) et non ébranché afin de limiter le contact tronc-sol (Autriche, vallée du Montafon)



Figure 3.3.122 Exemple de souches hautes et d'andain (à droite du gestionnaire) (Suisse, Martigny)



Figure 3.3.123 Exemple de scarification d'une grume pour faciliter l'évacuation de la sève et limiter la teneur en eau (Suisse, Martigny). L'intervalle entre les traits de tronçonneuse ne doit pas excéder 15 cm



Figure 3.3.124 Exemple de scarification avec une tronçonneuse d'une grume pour faciliter l'évacuation de la sève et limiter la teneur en eau (Suisse, Martigny)



Figure 3.3.125 Exemple d'annellation d'un arbre pour le faire mourir sans l'abattre (Suisse, Martigny)



Figure 3.3.126 Exemple de grume en travers qui a perdu toute résistance mécanique et qu'un projectile a brisé (Suisse, Martigny)



Figure 3.3.127 Exemple de grume décomposée et ne pouvant plus faire obstacle à la propagation de projectiles rocheux (Italie, Quart)

Éléments pour estimer la durée de survie des ouvrages pare pierres réalisés avec les produits des coupes forestières

Dans le contexte de la prévention des risques naturels il est important de connaître la durée d'efficacité des ouvrages de protection afin d'établir un plan d'entretien et de renouvellement de ceux-ci. Cette question est d'autant plus importante dans le cadre de l'emploi du génie biologique.

En effet, les arbres sont des êtres vivants, à ce titre ils "naissent" et ils meurent. Un arbre mort ou abattu et laissé sur place va se décomposer et libérer des substances minérales et organiques qui vont participer au cycle de vie de l'écosystème. Le bois laissé au sol joue aussi un rôle important dans le cadre de la protection des risques naturels. Il permet d'augmenter la rugosité du sol et ainsi limiter la propagation de certains aléas naturels (avalanche, chutes de pierres) et de protéger le sol de l'érosion.

Le gestionnaire doit donc pouvoir disposer d'informations lui permettant d'estimer l'évolution de la résistance mécanique des ouvrages de génie biologique en fonction de la décomposition du bois. Dans ce paragraphe le lecteur trouvera des éléments d'information à ce sujet.

Les Principales données concernant la vitesse de décomposition du bois laissé sur place

D'après Brown *et al.*, 1998; Chen H. *et al.*, 2002; Grote, 2002; Harmon, 1982; Harmon, 1992; Harmon *et al.*, 2000; Kodrik et Kodrik, 2002; Krankina *et al.*, 1999; Matson *et al.*, 1987; Laiho et Presscott, 2004; Le Goff et Ottorini, 2001; Ludovici *et al.*, 2002; Ludovici, 2006; Motta *et al.*, 2006; Naesset, 1999; Parminter, 2002; Richardson et Zu Dohna, 2003; Ranger et Gelhaye, 2001; Stone *et al.*, 1998; Storaunet et Rolstad, 2002; Venalainen *et al.*, 2002; Yatskov *et al.*, 2003; Zielonka, 2006.

Très peu d'études scientifiques abordent cette question sous l'angle de la perte de stabilité mécanique des souches et des troncs au sol. La majorité des travaux scientifique sur ce sujet porte sur les processus chimiques de l'humification et sur la germination de plantules sur du bois en décomposition.

Nous allons présenter les résultats des travaux les plus intéressants dans le contexte de la protection vis-à-vis des chutes de pierres offerte par les souches et troncs laissés sur place.

Le système racinaire des arbres peut représenter jusqu'à 20 à 30% de la biomasse totale d'un arbre. Des chercheurs canadiens ont modélisé le taux de décomposition du système racinaire du pin après la réalisation d'une coupe. Ils ont ainsi mis en évidence que 50% de la masse racinaire se décompose dans les 10

années suivant la réalisation de la coupe. Les travaux d'excavation ont permis de récupérer des portions de grosse racine latérale (diamètre > 5 cm) et de racine pivotante qui persistaient après plus de 35 et 60 ans respectivement. Les résultats qu'ils ont obtenus indiquent clairement que la décomposition de la biomasse racinaire totale et de ses composantes, dans les peuplements matures de pin coupés à blanc, peut être modélisée avec une bonne précision en fonction du diamètre de la souche au niveau du sol et du nombre d'années écoulées depuis la récolte. Pour un arbre de 30 cm de diamètre la formule de calcul est:

$$y = 0.9488 e^{-0.0577x} \tag{3.3.11}$$

avec:

y pourcentage de système racinaire restant après x année de la réalisation de la coupe

L'ensemble des articles scientifiques et études s'accordent sur le fait que la décomposition de la biomasse suit une loi de décroissance exponentielle.

Le modèle employé est de la forme:

$$M_t/M_0 = e^{-kt} \tag{3.3.12}$$

avec:

t date à laquelle la mesure est faite

M₀ quantité de biomasse initiale

M_t quantité de biomasse à l'instant t

Tableau 3.3.31 Moyenne des valeurs du taux de décomposition pour les principales essences forestières

Essence	k
Chêne rouge	0.107
Boulot	0.056
Erable	0.045
Hêtre	0.038
Pin	0.037
Aulne	0.033
Tsuga	0.031
Epicéa de Sitka	0.03
Sapin de Douglas	0.026
Chêne blanc	0.018
Mélèze	0.008

Les valeurs de k, pour les troncs laissés au sol, citées dans la littérature pour les principales essences sont données dans le **tableau 3.3.31**.

Les souches des conifères de part la production et la présence de résine se décomposent moins vite que celles des feuillus. Il en est de même pour les troncs.

Une étude américaine réalisée sur *Tsuga heterophylla* et *Pseudotsuga menziesii* a montré que le long d'une chronoséquence de coupes forestières s'étalant sur une période de 70 ans il n'y avait pas de différence significative entre la densité du bois des souches et des troncs au sol. Par conséquent la vitesse de décomposition des souches et des troncs laissés au sol semble similaire. En utilisant les valeurs de k données dans le **tableau 3.3.31** nous avons calculé l'évolution de la perte de biomasse totale en fonction du temps. Le **tableau 3.3.32** donne les résultats obtenus pour une chronoséquence de 150 ans à compter de la date d'abattage et avec un pas de temps de 10 ans.

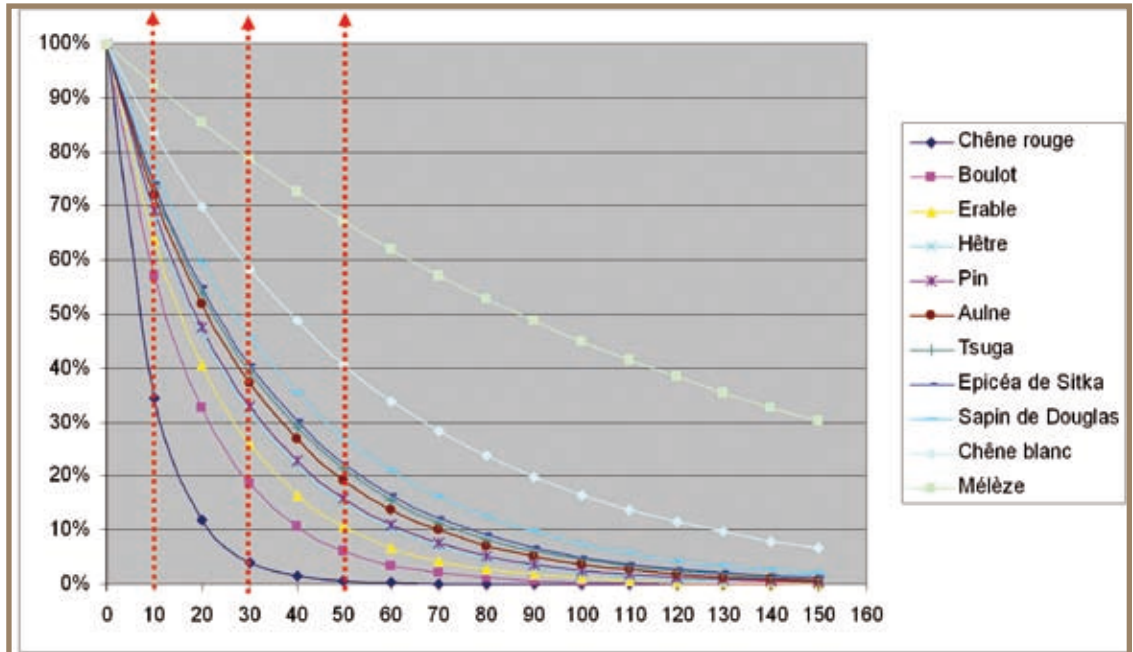
Tableau 3.3.32 Pourcentage de biomasse restante pour une chronoséquence de 150 ans après la date d'abattage d'un arbre en fonction de différentes essences

Temps	Chêne rouge	Boulot	Erable	Hêtre	Pin	Aulne	Tsuga	Epicéa de Sitka	Sapin de Douglas	Chêne blanc	Mélèze
0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10	34%	57%	64%	68%	69%	72%	73%	74%	77%	84%	92%
20	12%	33%	41%	47%	48%	52%	54%	55%	59%	70%	85%
30	4%	19%	26%	32%	33%	37%	39%	41%	46%	58%	79%
40	1%	11%	17%	22%	23%	27%	29%	30%	35%	49%	73%
50	0%	6%	11%	15%	16%	19%	21%	22%	27%	41%	67%
60	0%	3%	7%	10%	11%	14%	16%	17%	21%	34%	62%
70	0%	2%	4%	7%	8%	10%	11%	12%	16%	28%	57%
80	0%	1%	3%	5%	5%	7%	8%	9%	12%	24%	53%
90	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	10%	20%	49%
100	0%	0%	1%	2%	2%	4%	5%	5%	7%	17%	45%
110	0%	0%	1%	2%	2%	3%	3%	4%	6%	14%	41%
120	0%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	3%	4%	12%	38%
130	0%	0%	0%	1%	1%	1%	2%	2%	3%	10%	35%
140	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	3%	8%	33%
150	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	2%	7%	30%

Le **figure 3.3.128** présente ces résultats en identifiant (les flèches en pointillés rouge) les dates de 10, 30 et 50 ans après l'abattage.

Figure 3.3.128

Représentation graphique de l'évolution de la biomasse restante sur une chronoséquence de 150 ans après la date d'abattage d'un arbre en fonction de différentes essences



Au regard du **figure 3.3.128** on observe une importante perte de biomasse dans les 10 premières années après la date d'abattage. En moyenne à 30 ans l'ensemble des espèces ont perdu 60% de leur biomasse. A 50 ans, la perte de biomasse est de 75% et plus. Deux essences se distinguent des autres par une plus faible vitesse de décomposition ce sont le mélèze et le chêne blanc. Nous n'avons pas encore trouvé d'informations chiffrées sur le châtaigner mais il semble (au dire des gestionnaires) que sa vitesse de décomposition soit intermédiaire entre celle du pin sylvestre et celle du chêne blanc.

Il est intéressant de comparer les différences de vitesse de décomposition du système racinaire d'une souche et d'un tronc au sol. Nous avons pu le faire pour le pin sylvestre à partir des données recueillies dans la littérature.

Le **tableau 3.3.33** présente les résultats des calculs et la **figure 3.3.129** l'expression graphique de ceux-ci.

Temps	Biomasse restante du système racinaire d'un pin sylvestre de 30 cm de diamètre	Biomasse restante du tronc d'un pin de 30 cm de diamètre
0	95%	100%
10	53%	69%
20	30%	48%
30	17%	33%
40	9%	23%
50	5%	16%
60	3%	11%
70	2%	8%
80	1%	5%
90	1%	4%
100	0%	3%
110	0%	2%
120	0%	1%
130	0%	1%
140	0%	1%
150	0%	0%

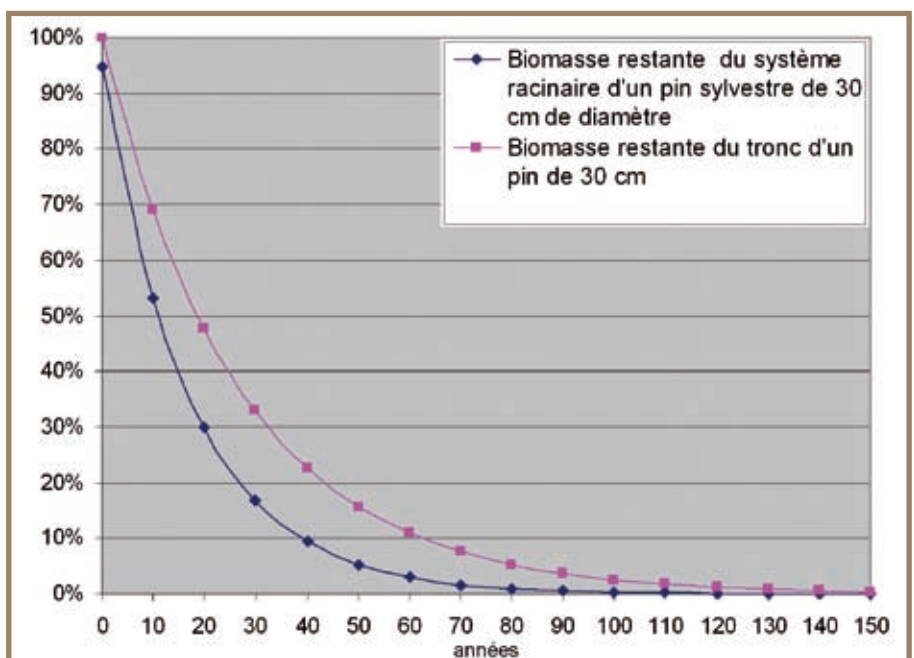


Tableau 3.3.33 Comparaison chiffrée entre le pourcentage de biomasse restante de système racinaire et de bois d'un tronc au sol (de 30 cm de diamètre) pour le pin sylvestre

Figure 3.3.129 Comparaison graphique entre le pourcentage de biomasse restante de système racinaire et de bois d'un tronc au sol (de 30 cm de diamètre) pour le pin sylvestre

De l'analyse du **tableau 3.3.33** et de la **figure 3.3.129** il ressort très nettement qu'il existe une différence significative entre la décomposition du système racinaire d'un arbre et de son ancienne partie aérienne. Ainsi dans le cas du pin sylvestre on observe une disparition de 47% de la biomasse racinaire en 10 ans alors que la disparition de la biomasse d'un tronc au sol n'est que de 31% sur la même période. A 30 ans les chiffres sont respectivement 83% et 67%. A 50 ans la biomasse racinaire et du tronc ont quasiment totalement disparue. Cette information est très importante dans le cadre de l'utilisation des souches comme point d'ancrage des troncs laissés au sol. En effet en l'espace de 10 ans la résistance mécanique au déracinement d'une souche va fortement chuter, diminuant ainsi l'efficacité d'ouvrage biologique s'appuyant sur des souches.

Synthèse sur la durée d'efficacité des arbres laissés au sol

L'ensemble des auteurs s'accorde à dire que:

- la décomposition des troncs des résineux et des feuillus tels que le chêne et le châtaignier nécessite 50 ans. L'effet protecteur de ces essences est reconnu sur une période maximale de 30 ans. Elle chute très vite lors des 10 premières années après l'abattage et est quasiment nul 50 ans après la réalisation de la coupe;
- la décomposition des autres feuillus nécessite 20 à 30 ans. A ce titre leur effet protecteur dure nettement moins longtemps, on peut avancer qu'elle n'excède pas 5 à 10 ans;
- dans tous les cas la vitesse de décomposition du matériel ligneux est augmentée quand les bois sont situés à l'ombre et en contact direct avec le sol. Dans les zones à fort ensoleillement la vitesse de décomposition est ralentie.

Etude phytosanitaire des conséquences de l'impact des blocs sur les arbres

L'impact d'un bloc sur un arbre peut avoir comme conséquence des infections des arbres impactés par des pathogènes d'altération du bois. Si c'est le cas le peuplement forestier au sein duquel des projectiles rocheux se propagent, peut très vite être fragilisé par ses agents pathogènes et voire sa capacité de protection très fortement diminuée.

Le but de notre étude a été de vérifier, sur le plan phytosanitaire, la présence d'éventuelles infections au niveau des blessures consécutives à l'impact sur le tronc des arbres, et en particulier l'action d'agents lignivores, parasites de blessure (lignivore: champignon pathogène qui induit une pourriture de bois).

L'étude a été réalisée en forêt communale de Vaujany (Isère France) à une altitude d'environ 1 300 m et de pente moyenne de 38°. Les quatre principales essences présentes dans le peuplement forestier sont le sapin (50%), l'épicéa (25%), le hêtre (17%) et l'érable (7%). Sur ce site, nous réalisons depuis octobre 2002 des expérimentations grandeur nature de lâchers de blocs sur un site boisée. Les quatre principales essences présentes dans le peuplement forestier sont le sapin (50%), l'épicéa (25%), le hêtre (17%) et l'érable (7%).



Figure 3.3.130 Exemple de carpophore se développant sur une blessure consécutive à l'impact d'un bloc rocheux

Les quatre essences ont été prélevées début juillet 2006: pour les trois premières trois types d'impact ont été étudiés: faible (1), moyen (2) et fort (3); un seul prélèvement a été effectué sur l'érable. Pour chaque arbre et par type d'impact, 4 carottes ont été prélevées 2 au centre et 2 à la périphérie de la plaie. Au total, 10 arbres ont été prélevés entraînant ainsi la prise de 20 échantillons comprenant chacun deux carottes de bois. Les impacts de lâchers de blocs les plus anciens (octobre 2002) ont été privilégiés (**figure 3.3.130**).

Afin d'éviter tout problème de dessiccation, les prélèvements de terrain faits le matin ont été adressés le jour même en fin d'après midi à l'UMAF (Unité de Mycologie Agricole et Forestière) du LNPV (Laboratoire National de la Protection des Végétaux) à Malzéville (proche de Nancy).

A leur réception au laboratoire, les carottes sont retirées de leur conditionnement sous une hotte stérile. Celles-ci sont désinfectées en les passant rapidement au dessus d'une flamme puis déposées, après les avoir préalablement découpées en petites rondelles, sur des milieux de culture gélosés appropriés. L'incubation s'effectue dans une enceinte climatique à $23^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ avec alternance de lumière 12h/12h.

L'identification des champignons se fait suite à des repiquages sur milieux gélosés plus favorables à leur croissance et leur sporulation (délai de réalisation des analyses mycologiques d'environ 3 mois).

La détermination des *Basidiomycètes Aphyllophorales* en culture s'est effectuée grâce à la méthode de J.A. Stalpers (1978) selon 100 critères codés concernant la composition enzymatique, l'aspect, la couleur et la morphologie microscopique du *mycélium*.

Des agents cryptogamiques, pathogènes ou non, ont ainsi été mis en évidence au niveau des zones de bois altérés:

- certains d'entre eux appartiennent à la classe des *Deutéromycètes* ou Champignons Imparfaites (*Fungi imperfecti*);
- d'autres appartiennent à la classe des *Basidiomycètes-Hyménomycètes*, ordre des *Aphyllophorales* ou *Agaricales*.

Les travaux ont souligné la présence d'une quinzaine de champignons imparfaits dont le rôle lignivore est négligeable, sinon nul (codé NL). Ils sont réputés pour envahir d'une façon générale très rapidement le bois mis à nu et pour s'installer en premier (avec certaines bactéries et certains *Ascomycètes*). La coloration anormale souvent brune du bois plus ou moins limitée est sans doute liée à la présence de certains champignons imparfaits (coloration biologique) (codé AC). Certaines bactéries et certains *ascomycètes* non lignivores peuvent également induire des colorations. A noter que la coloration anormale du bois peut également résulter de processus physiologiques normaux, consécutifs à la mise à nu des tissus vivants du bois. Enfin, des agents de bleuissement du bois (*ascomycètes*, champignons imparfaits) peuvent être aussi présents.

Si certains champignons imparfaits peuvent jouer un rôle d'antagoniste vis à vis d'agents de pourriture (codé AN), d'autres au contraire peuvent, en tant qu'organismes pionniers, "préparer le terrain" pour l'installation ultérieure d'éventuels agents de pourriture.

Dans un premier temps et avant les travaux de prélèvement, il convient de signaler la présence sur le site expérimental de trois champignons *basidiomycètes* agents de pourriture identifiés avec certitude à partir de leur fructification (a et b) ou de leurs dégâts (c):

- *Fomitopsis pinicola* (Schw. ex Fr.) P. Karst. (a) (tous résineux);
- *Hericium coralloides* (Scop. ex Fr.) S. F. Gray (b) (sapin);
- *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. (c) (épicéa).

Si la découverte de nombreux champignons imparfaits généralement non pathogènes est normale, la présence d'une douzaine de *basidiomycètes*, agents de pourriture (AP), est étonnante sur des plaies, certes importantes en surface et en profondeur, mais n'ayant que moins de 4 ans d'âge.

On relève que, sur les 14 *basidiomycètes* isolés, 10 découlent de prélèvements en périphérie de la plaie, ce qui semble indiquer une plus grande activité du champignon en périphérie de la blessure plutôt qu'au cen-

tre. Il est à noter que les analyses effectuées sur les échantillons de carottes d'épicéa ne révèlent aucune présence d'agent de pourriture (le fait d'avoir des épicéas plus jeunes, donc possédant des capacités de résistance plus grande à l'infection, peut expliquer cette absence).

Rappelons que, de la nature des enzymes excrétés par le champignon pathogène dépendent le mode de décomposition des bois et son aspect: on distingue ainsi selon la configuration et la couleur du bois atteint trois grands types de pourriture:

- cubique brune;
- fibreuse blanche;
- alvéolaire et tubulaire.

Si la détermination des champignons imparfaits trouvés a été relativement facile, le suivi des analyses devant mener à l'identification des champignons *basidiomycètes* agents de pourriture a rencontré de nombreuses difficultés nécessitant de nombreux repiquages à la suite de pollution de certaines cultures

Si, dans un premier temps, la présence d'un *basidiomycète* agent de pourriture est bien confirmée, l'analyse n'a pas permis d'aller plus loin quant à la détermination du genre, et encore moins de l'espèce. Il s'agit d'être prudent sur l'identification morphologique du champignon généralement à partir du *mycélium*. L'étude des champignons appartenant à l'ordre des *Aphylliphorales* n'est pas toujours facile par le manque de caractères morphologiques microscopiques frappants. La comparaison avec des collections de cultures de référence a été parfois réalisée. Aussi dans l'état actuel, nous n'avons pas pu aller au delà dans l'identité précise des 14 *basidiomycètes* trouvés et on ne peut que leur attribuer un numéro d'identification.

Cependant, pour trois *basidiomycètes* (N° 4, 5 et 10), la présomption de l'identité du champignon est donnée (respectivement *Hericium coralloides*, *Pycnoporus cinnabarinus* (Jacq. ex Fr.) P. Karst. et *Ganoderma* sp.). Il est à noter que *Hericium coralloides*, dont la fructification a été observée sur sapin (voir plus haut), a été trouvé comme proche du *basidiomycète* N° 4 (toujours sur sapin).

Enfin dans le **tableau 3.3.34**, certains *basidiomycètes* portant une (ou) deux étoile (s) possèdent un *mycélium* semblant identique.

En conclusion, il ressort de cette première étude que de tels impacts de blocs sur tronc d'arbre entraînent au niveau des blessures coté amont l'installation de champignons pathogènes *basidiomycètes* agent de pourriture sur 3 des 4 essences étudiées et seulement moins de 4 ans après le lâcher. C'est là l'information principale même si l'identité de ces agents de pourriture n'a pas pu être donnée avec précision.

Les blessures dues à l'impact de blocs rocheux mettant à nu le bois à différents niveaux de l'arbre constituent bien des portes d'entrée potentielles à des champignons pathogènes responsables de pourriture du bois.

Cependant, la présence de telles blessures peut ne pas entraîner forcément l'infection du bois par un champignon (les 5 cas de "champignons non détectés" en sont peut être le témoignage): en effet, sur un arbre vigoureux, les cellules vivantes sous jacentes peuvent réagir en formant un bourrelet cicatriciel au niveau du bois mis à nu qui assure ainsi l'immunité de l'arbre (nombreux cas observés de plaies en cours de cicatrisation sur la parcelle expérimentale).

Par ailleurs, le risque d'infection par des agents de pourritures semble dépendre de l'importance et de la profondeur de la blessure, de la vigueur de l'arbre et de sa résistance à la contamination. L'âge de la blessure est également un élément à prendre en compte dans le déroulement de l'infection. Enfin, les conditions climatiques (températures et humidité) sont d'importance au moment de la contamination.

Nature de l'essence impactée	Type d'impact	N° arbre impacté		Agents identifiés	Nature de l'agent		
		C : centre	P : périphérie				
Sapin	1	36 C		<i>Aureobasidium sp. (Pullularia sp.)</i> <i>Acremonium sp.</i>	NL AC NL		
		36 P		Champignons non détectés			
	2	121 C		<i>Basidiomycète 1</i> <i>Ulocladium sp.</i>	AP NL		
		121 P		<i>Basidiomycète 2 *</i>	AP		
	3	11 C		<i>Fusarium solani</i> <i>Trichoderma sp.</i> <i>Basidiomycète 3</i>	NL AC AN NL AN AP		
			11 A		<i>Fusarium sp.</i> <i>Trichothecium roseum</i> <i>Acremonium sp.</i> <i>Basidiomycète 4 proche de Hericium coralloides</i> <i>Basidiomycète 5 proche de Pycnoporus cinnabarinus</i>	NL AC AN NL NL AP AP	
		Épicéa	1	511 C		Champignons non détectés	
				511 P		Champignons non détectés	
2	12 C			<i>Cladosporium sp.</i> <i>Sporothrix sp.</i>	NL AC NL		
	12 A			<i>Aureobasidium sp. (Pullularia sp.)</i> <i>Periconia sp.</i>	NL AC NL		
3	510 C			<i>Pycnidiaella resiniae</i> <i>Aureobasidium sp.</i>	NL NL AC		
	510 P			Champignons non détectés			
Hêtre	1	98 C		<i>Fusicoccum sp.</i> <i>Truncatella sp.</i> <i>Microsphaeropsis sp.</i> <i>Chaetomium sp.</i>	NL PF NL NL NL		
			98 P		<i>Basidiomycète 6 *</i>	AP	
			2	100 C		<i>Nodulisporium sp.</i> <i>Basidiomycète 7 *</i> <i>Chaetomium sp.</i>	NL AP NL
					100 P		<i>Basidiomycète 8</i> <i>Basidiomycète 9 *</i>
	3	57 C		Champignons non détectés			
		57 P		<i>Basidiomycète 10 proche de Ganoderma sp.</i> <i>Basidiomycète 11</i>	AP		
	Érable		53 C		<i>Libertella sp.</i> <i>Basidiomycète 12**</i>	NL PF AC AP	
				53 P		<i>Basidiomycète 13</i> <i>Basidiomycète 14 **</i>	AP AP

Champignons imparfaits NL: non lignivore

PF : possible parasite de faiblesse

AC: possible agent de coloration du bois

AN: possible antagoniste d'agent de pourriture

Basidiomycètes AP: agent de pourriture

*: basidiomycètes dont le mycélium semble identique

** : basidiomycètes dont le mycélium semble identique

Tableau 3.3.34 Résultat des analyses des prélèvements phytosanitaire des arbres impactés sur le site expérimental du Cemagref

Les travaux ont souligné l'existence de nombreux champignons imparfaits, dont le rôle n'est pas pathogène, mais qui peuvent cependant induire une coloration du bois et favoriser, en tant que champignons pionniers, l'installation d'éventuels agents de pourriture.

Les arbres des ouvrages "enregistreurs"

Dans les zones parcourues par des chutes de pierres, les arbres peuvent être utilisés comme des bio-indicateurs de l'activité de ce phénomène naturel. En effet, les dégâts occasionnés par les impacts sur les troncs vont être littéralement enregistrés par les arbres. Quand l'arbre est cassé on peut dater l'événement responsable et quand il est simplement blessé on peut alors déterminer la date de la ou des blessures. Ainsi pour un secteur d'étude on peut réaliser une cartographie des dégâts sur les arbres et ainsi, en fonction de la répartition spatiale des arbres et des dégâts, estimer la zone d'emprise du phénomène, un ordre de grandeur de l'énergie au moment de l'impact en utilisant nos courbes du paragraphe 3.3.4 et estimer les hauteurs de passage des projectiles à partir de la hauteur des blessures. De plus, la datation, le nombre et fréquence des blessures permettent d'estimer les zones de passage préférentiel et la fréquence des événements.

La datation n'est possible que par l'étude des cernes de croissance des arbres: cette science s'appelle la dendrochronologie.

Principe général de la dendrochronologie

La dendrochronologie (du grec: *dendron* = arbre, *chronos* = temps, *logos* = étude) est une méthode de datation qui se base sur les arbres et qui, grâce aux cernes de croissance de ces derniers, permet de les dater. Cette méthode peut être utilisée dans toutes les régions où la croissance des arbres est rythmée par les saisons et, ainsi, toutes les essences d'arbres produisant des cernes annuels de croissance sont analysables. Cette science s'applique à divers domaines. La dendrochronologie englobe ainsi plusieurs disciplines utilisant les cernes datés pour étudier des phénomènes tels que le climat, l'archéologie, les mouvements des glaciers, l'environnement, l'eau, les feux de forêt et les processus géomorphologiques.

Les cernes annuels de croissance des arbres constituent donc le point de départ de la dendrochronologie. En règle générale, l'arbre produit chaque année un anneau dont la largeur varie en fonction de nombreux facteurs. L'analyse d'une section d'un tronc ou d'un échantillon permet de connaître les conditions dans lesquelles l'arbre a grandi, puisque la succession des cernes, du cœur à l'écorce, retrace toute la vie du végétal. Le rythme de croissance de chaque bois est donc une sorte de curriculum vitae, une véritable mémoire qui retrace les événements ayant affecté la vie de l'arbre au cours du temps. A partir de l'échantillon prélevé, on obtient une séquence de cernes qui est ensuite comparée à une courbe de référence datée, ce qui permet d'obtenir une datation de l'arbre. Cette datation permet donc d'établir une frise historique du processus géomorphologique étudié.

Nous ne développerons pas plus la dendrochronologie appliquée aux chutes de pierres car cela a été fait dans le cadre du paragraphe 2.13, par contre nous allons présenter une méthode alternative: la dendrogéomorphologie.

Principe général de la dendrogéomorphologie appliquée aux chutes de pierres

La dendrogéomorphologie est une science qui interprète et date des processus géomorphologiques à l'aide de la dendrochronologie. Cette approche, développée par Alestalo (1971) précisée par Shroder (1980) repose sur le fait que les arbres forment des anneaux de croissance chaque année et qu'ils réagissent immédiatement aux perturbations extérieures. Elle fournit des méthodes pour reconstituer des événements géomorphologiques passés tels que les avalanches, les laves torrentielles, les glissements de terrain, les mouvements de glaciers et les chûtes de blocs. Elle se base sur l'identification de perturbations de croissance (cicatrices, rejets, étêtage, etc.) à l'origine de la formation de cernes diagnostics de densité

anormale. La présence de bois, jaune ou brun-rouge, court, à cellules denses et à cloisons épaisses, appelé bois de réaction, est, par exemple, révélatrice d'un impact. L'existence d'un bourrelet constitué de tissu calleux à forte densité traduit la cicatrisation suite à une blessure (Stoffel, 2006).

Puisque la dendrogéomorphologie n'est qu'une application à un domaine particulier de la méthode de datation dendrochronologique, l'idée de base est identique: le principe général est de prendre des mesures sur des arbres ayant été affectés par des processus géomorphologiques, de même que des mesures sur des arbres "sains" et non affectés par ces processus. Il est nécessaire de construire une chronologie individuelle pour chaque arbre, puis d'établir des chronologies locales et régionales. Pour dater l'arbre, on compte les cernes: le nombre de cernes équivaut à l'âge de l'arbre. Afin d'éliminer les erreurs d'encodage, on compare la séquence à la chronologie et on la positionne de manière à dater l'échantillon. A partir de là, des méthodes plus spécifiques aux différents effets liés aux processus géomorphologiques sont utilisées.

Les processus géomorphologiques qui affectent un tronc d'arbre agissent comme des facteurs écologiques, soit directement, soit indirectement. Ces facteurs sont de diverses natures: ils sont mécaniques (tensions, compressions ou changement de forme du tronc dus à des stress imposés à l'arbre, ...), édaphiques (effet de l'apport de sédiments dans l'atmosphère, variations des températures, érosion, déposition, eau, ...).

Ces facteurs ont des effets sur les arbres: en réponse aux événements qui l'affectent, l'arbre réagit. Constamment, il doit s'adapter à son environnement qui évolue. Les réactions de l'arbre varient selon l'effet induit par le processus géomorphologique. Elles sont visibles à plusieurs niveaux:

- les branches: l'arbre forme de nouvelles pousses s'il veut modifier la direction dans laquelle il croît;
- les racines;
- le cambium: il peut accélérer ou ralentir la croissance de l'arbre;
- les cellules vivantes: elles peuvent, si besoin est, former de nouvelles substances comme le bois de réaction;
- les cellules mortes: elles peuvent expliquer les raisons de la mort de l'arbre;
- la décomposition du bois: la façon dont le bois se décompose après sa mort donne des informations sur les conditions auxquelles le bois a été exposé après la mort de l'arbre.

Dans les sites géomorphologiquement actifs, de telles réactions peuvent être observées. Toutefois, il est souvent difficile d'associer un type de réaction à un processus, car de nombreux processus ont les mêmes effets sur les arbres et ces derniers y réagissent de la même manière. C'est donc l'interprétation du contexte géomorphologique qui permet l'identification du processus.

Dans le contexte des chutes de pierres, les conséquences d'un impact sur un arbre sont:

- le bris de l'arbre au point d'impact;
- un déracinement et une blessure au niveau du point d'impact;
- un étêtage de l'arbre (bris de sa cime) et une blessure sur le tronc. Cet étêtage peut provoquer une réitération (un bourgeon adventice ou une branche se développe pour former une nouvelle cime);
- pour les arbres impactés mais encore sur pied, les impacts vont être à l'origine de la création de bois de réaction et de bourrelets cicatriciels en périphérie du point d'impact. Au fil du temps l'écorce va pourvoir dans certain cas complètement masquée la cicatrice. Mais ces deux types de réaction des tissus d'un arbre vont se traduire par une modification de la densité du bois des cernes (**figure 3.3.131**).

Traditionnellement, la dendrogéomorphologie repose sur l'identification des cernes de croissance simplement par lecture directe des échantillons prélevés. La lourdeur des méthodes de mesure de la densité en laboratoire, méthode volumétrique ou micro densitométrie à rayons X est incompatible avec une étude dendrogéomorphologique fine qui repose, en général, sur plusieurs centaines de prélèvements. Des instruments de terrain non destructifs tels que le torsiomètre ou le pénétromètre de type "Pylodin" existent. Ils

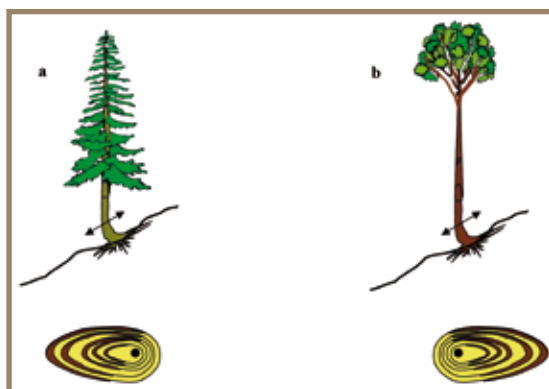


Figure 3.3.131 La formation de bois de réaction. A: conifère: bois de compression formé en aval. B: feuillus: bois de tension formé en amont



Figure 3.3.132 Unité de forage du résistographe "IML Resi F400"

ne permettent cependant qu'une mesure relative, très localisée, limitée aux cerne périphériques et connaissent des dérives liées, notamment, à l'épaisseur variable de l'écorce.

La densitométrie, étude basée sur l'analyse des variations de densité d'un cerne à l'autre offre une alternative intéressante dans le cadre de l'analyse dendrogéomorphologique. Le résistographe offre une alternative. Conçu pour l'expertise phytosanitaire préventive afin de détecter in situ la présence d'altérations ou de cavités, de densités faibles à nulles, au niveau d'arbres sur pieds ou de bois de construction, il traduit les variations de résistance de forage d'une aiguille en valeur de densité (figure 3.3.132).

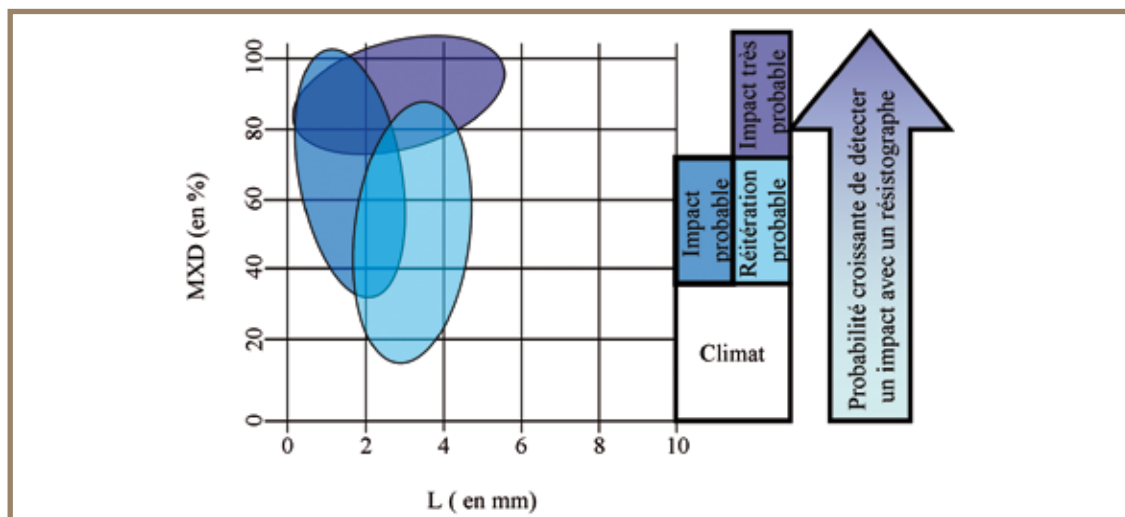
Cet appareil enregistre donc le profil densitométrique du forage. Cet enregistrement se fait à la fois sur une bande cirée et sous format numérique. Le traitement des données numériques ainsi collectées permet de définir deux paramètres:

- la densité maximale relative, notée MXD et exprimée en %. Elle correspond au rapport entre la hauteur du pic densité enregistré pour un cerne et la hauteur maximale enregistrable par l'appareil;
- la largeur de cerne, qui correspond à la distance entre deux pics de densité enregistrés.

Avec cet appareil le sondage d'un arbre est réalisé en 3 à 5 minutes. Il est ainsi possible de réaliser un relevé de terrain exhaustif, d'autant plus que le traitement des données est automatisable. Ceci est impossible avec l'utilisation d'une tarière manuelle.

A partir de sondage sur des zones de dépôts avalancheux, nous avons été en mesure de construire une typologie de probabilité de mesure d'un impact sur un arbre. Cette typologie a été utilisée avec succès dans une zone de propagation de chutes de pierres. Il semble donc qu'elle soit aussi opérationnelle pour les aléas de chutes de pierres et de blocs. En attendant de confirmer la validation cette typologie, elle est utilisable par les propriétaires de ce type de matériel avec toutes les précautions d'usage (figure 3.3.133).

Figure 3.3.133 Grille d'identification probabiliste des perturbations au sein d'un signal densitométrique mesuré avec un résistographe



3.3.7 Evaluation de la valeur économique de la protection par une forêt de protection

L'évaluation de la valeur économique de la protection offerte par une forêt est une composante oubliée dans les calculs économiques de type coûts-bénéfices des études de mise en sécurité d'un site.

D'autre part, l'économétrie forestière ne s'intéresse qu'au rôle de production des forêts par le biais du bilan des coûts des interventions forestières et des revenus de la vente des bois.

Ce sont les raisons pour lesquelles le chiffrage de la valeur économique de la forêt en tant qu'ouvrage de protection naturelle est rarement effectué.

Pour réaliser ce chiffrage deux méthodes sont utilisables:

- la première est basée sur la notion d'estimation du coût de remplacement du service rendu par l'écosystème forestier. L'hypothèse pour calculer cette valeur est la disparition pure et simple du couvert forestier. La valeur de remplacement représente ainsi l'investissement financier nécessaire mais suffisant pour obtenir le même niveau de protection offert par le couvert forestier avant sa disparition. La nature de l'investissement peut être: l'expropriation, une modification des axes de communication, l'implantation de génie civil, génie biologique ou une combinaison des deux, etc. L'approche la plus simple est de réaliser une traduction de la protection offerte par la forêt en équivalent ouvrage de génie civil;
- la deuxième est basée sur la notion d'estimation du coût d'évitement du dommage qui représente la valeur du service rendu par la forêt. La présence du couvert forestier permet d'atténuer ou d'éteindre le risque de chutes de pierres. Par conséquent cette présence permet de limiter les dommages. Ces dommages se répartissent en dommage potentiel, qui représente l'action de la forêt, et en dommage réel qui représente les conséquences de ce que la forêt ne peut maîtriser. Le dommage potentiel peut être quantifié en utilisant le coût de réparation. Le dommage réel est facilement quantifiable par la somme des coûts de remise en état et d'indemnisation, aussi dénommée coût de réparation.

Éléments pour estimer le coût de remplacement

Le coût de remplacement peut se calculer de la manière suivante:

$$C_{\text{rem}} = (\text{Coût}_{\text{implantation}} + \text{Coût}_{\text{entretien}})_{\text{Mesures de remplacement}} - (\text{Coût}_{\text{entretien}} - \text{Revenus})_{\text{Forêt en l'état actuel}} \quad (3.3.12)$$

Afin d'illustrer ce calcul considérons l'exemple suivant:

- pour un secteur donné de 100 de large par 200 m de long, le résultat de la simulation trajectographique de chutes de pierres, sans tenir compte de la forêt est que les blocs qui arrivent sur les enjeux ont une énergie cinétique maximale de 2 000 kJ. Considérons que le coût total d'implantation et d'entretien de filets pare pierre pour garantir la protection des enjeux est de 200 000 Euros pour 15 ans;
- pour le même secteur, le résultat de la simulation avec forêt est qu'aucun bloc atteint les enjeux. Cette forêt procure un revenu de 5 000 Euros et ses coûts d'entretien sont de 15 000 Euros pour 15 ans;
- le coût de remplacement de cette forêt est donc de: $(200\ 000) - (15\ 000 - 5\ 000) = 190\ 000$ Euros.

Éléments pour estimer le coût d'évitement

Le coût d'évitement se calcul, pour une unité de temps donné, de la manière suivante:

$$C_{\text{evi}} = (\text{Coût}_{\text{réparation potentiel}} - \text{Coûts}_{\text{réparation actuel}}) - (\text{Coût}_{\text{entretien}} - \text{Revenus})_{\text{Ouvrages de protection présents}} \quad (3.3.13)$$

Il ne peut y avoir de revenus pour les ouvrages de protection présents que pour la forêt.

Le coût de réparation potentiel se calcul en faisant abstraction de l'action de la couverture forestière actuelle. Le coût de réparation actuel correspond quant à lui aux sommes payés au jour d'aujourd'hui pour les dommages actuellement observés. Il prend indirectement en compte le rôle protecteur de la forêt sans le chiffrer.

Afin d'illustrer ce calcul considérons l'exemple précédent:

- pour un secteur donné de 100 m de large par 200 m de long, le résultat de la simulation trajectographique de chutes de pierres, sans tenir compte de la forêt, est que les blocs qui arrivent sur les enjeux ont une énergie cinétique maximale de 2 000 kJ. Considérons que le dommage potentiel est l'interruption d'une fois par an d'une voie TGV sans dégâts matériels et corporels. Les coûts de réparation ne concernent que les frais d'indemnisation du retard d'une heure. Fixons ces frais à 1 500 Euros de la minute (source SNCF), on obtient ainsi un coût de réparation de 90 000 Euros;
- le coût d'évitement annuel de cette forêt est donc de: $(90\ 000 - 0) - (10\ 000/15) = 89\ 333$ Euros;
- sur la durée de 15 ans de notre exemple, le coût total d'évitement est donc de: 1 340 000 Euros. C'est la valeur réelle du service rendu par cette forêt moyennant 10 000 Euros d'investissement pour son entretien.

3.4 PRÉSENTATION DES ÉTUDES DE CAS

Frédéric Berger, Luuk Dorren, Christophe Bigot - Cemagref

Au total nous avons travaillé sur 4 sites d'études, chacun de ceux-ci ayant une vocation différente. Le premier couvre la totalité du versant situé en rive gauche de l'Arc entre Saint Michel de Maurienne et le village du Freney. Il nous a permis de tester le principe de la ligne d'énergie à grande échelle. Le deuxième correspond au versant du Freney. Il a été utilisé pour comparer les résultats de la ligne d'énergie à petite et grande échelle, pour tester les données LIDAR et caractériser le rôle de protection des peuplements forestiers avec le logiciel Rockyfor. Le troisième est celui de Sainte Marie de Cuisnes. Ce site a permis de construire le modèle de dissipation d'énergie des cépées de taillis. Les travaux réalisés sur ce site ayant déjà été présentés précédemment dans cet ouvrage nous ne les représenterons pas dans ce paragraphe. Le quatrième et dernier site, est celui situé au-dessus de la commune de Murianette. Ce dernier site a été exclusivement utilisé pour les travaux de tests des données LIDAR.

3.4.1 Description général de la vallée de la Maurienne: de Saint Michel de Maurienne à Modane

La vallée de la Maurienne est une vallée Alpine située dans le département français de la Savoie. Elle est une des vallées française de communication transfrontalière avec l'Italie. Elle débute à environ 300 m d'altitude au niveau d'Epierre pour atteindre 1 100 m au niveau de l'entrée du tunnel du Fréjus. Le point culminant est de 3 751 m, c'est le sommet du Charbonnel. Au total 41 625 habitants vivent dans la vallée.

Figure 3.4.1 Photo de la vallée de la Maurienne



Entre Saint-Michel-de-Maurienne et Modane, les deux versants de la vallée sont très uniformes. La géologie de ces versants est constituée d'alternances de grès et de schistes (**figure 3.4.1**).

La vallée de la Maurienne est un des principaux axes de communication entre la France et l'Italie. Trois grandes voies de communications sur l'axe Lyon-Turin sont présentes dans cette vallée: l'autoroute A43, les nationales 6 et 566 et la voie ferroviaire.

En 2006 le trafic de l'A43 a été de plus 8 000 véhicules par jour. Le tableau ci-dessous donne le détail (source www.sfrtf.fr). La répartition entre le fret ferroviaire et le fret routier est de 25% pour 75%. Actuellement de l'ordre de 30 millions de tonnes circulent par les tunnels du Fréjus et du Mont Blanc (**tableau 3.4.1**).

D'après la Commission Européenne, le trafic routier européen de fret doit augmenter de 70% en 15 ans, et la route doit absorber 84% de cette croissance. Dans ce contexte, les conditions du franchissement des Alpes par les transports de marchandises sont préoccupantes. Selon le rapport d'information n°15 du Sénat français, l'évolution du trafic routier de marchandises transalpin (tunnels du Mont-Blanc et du Fréjus) dépend fortement de l'ouverture par la Suisse de son territoire au trafic de l'Union Européenne. Actuellement 33% des flux passe par La France, 50% par l'Autriche et 17% par la Suisse. Ce

Chiffres 2006	Autoroute de la Maurienne (A43)	Tunnel Routier du Fréjus
Longueur	67.46 km	12.87 km
Dont rampe d'accès au tunnel	4.4 km	
Trafic Moyen Journalier VL	5 588	2 328
Trafic Moyen Journalier PL et cars	2 534	2 368
Trafic Moyen Journalier Total	8 122	4 696

Tableau 3.4.1 Trafic moyen journalier 2006 de l'autoroute A43 (source www.sfrtf.fr)

rapport cite comme estimation pour les capacités à moyen terme (horizon 2020) des tunnels du Fréjus et du Mont-Blanc les chiffres de respectivement 48 millions de tonnes pour le Fréjus (soit environ 8 000 poids lourds par jour) et 20 millions de tonnes pour le Mont-Blanc (environ 3 000 poids lourds par jour), soit une capacité totale estimée de 68 millions de tonnes. Ces chiffres sont loin des flux constatés aujourd'hui et des flux prévisionnels pour l'année 2010, même si l'on retient la projection la plus haute, de 35 millions de tonnes par an (Amoudry, 2002).

Dans ces conditions, la réalisation de la ligne Lyon-Turin, décidée par un accord franco-italien de janvier 2001, qui concernerait à la fois les voyageurs et les marchandises et dont la réalisation est prévue pour l'année 2012, apparaît indispensable. Cette ligne fait partie des 14 projets prioritaires européens et du réseau ferroviaire trans-européen. Le coût en serait de 10.7 milliards d'euros.

De plus, la limitation du trafic dans les tunnels alpins, consécutive à un renforcement des contraintes en matière de sécurité et de protection de l'environnement, rend la réalisation de cette liaison d'autant plus indispensable.

Dans ce contexte général d'augmentation des trafics routier et ferroviaire, le volet de prévention des risques de chutes de pierres et de blocs sur ces voies de communication est d'autant plus important. En effet, l'augmentation du trafic ne peut qu'engendrer une augmentation de manière significative de la probabilité de rencontre entre un véhicule (train, automobile, etc.) et les projectiles en mesure d'atteindre ces voies. Il convient donc de réaliser un zonage de ce risque naturel le long de ces axes de communication.

Dans le paragraphe suivant nous présentons les résultats de notre méthodologie de travail pour nos sites d'étude. Les gestionnaires peuvent, dans le futur, utiliser cette méthodologie peut être utilisée sur l'ensemble de cette vallée et pour n'importe quelle autre vallée des Alpes.

3.4.2 Localisation de sites d'étude

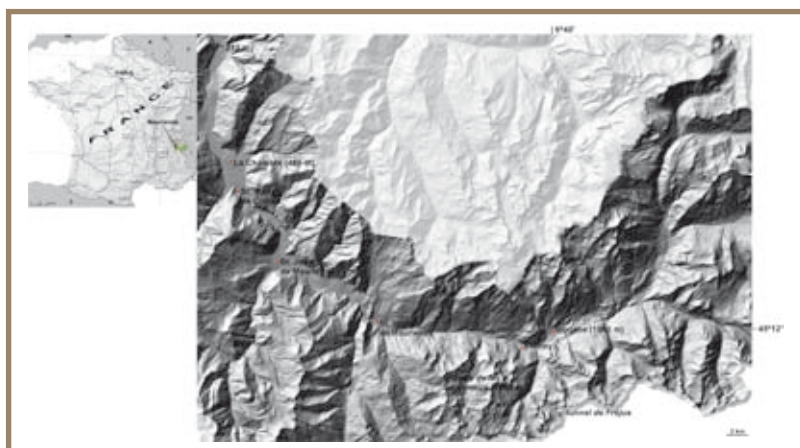


Figure 3.4.2 Localisation des sites d'étude en Maurienne

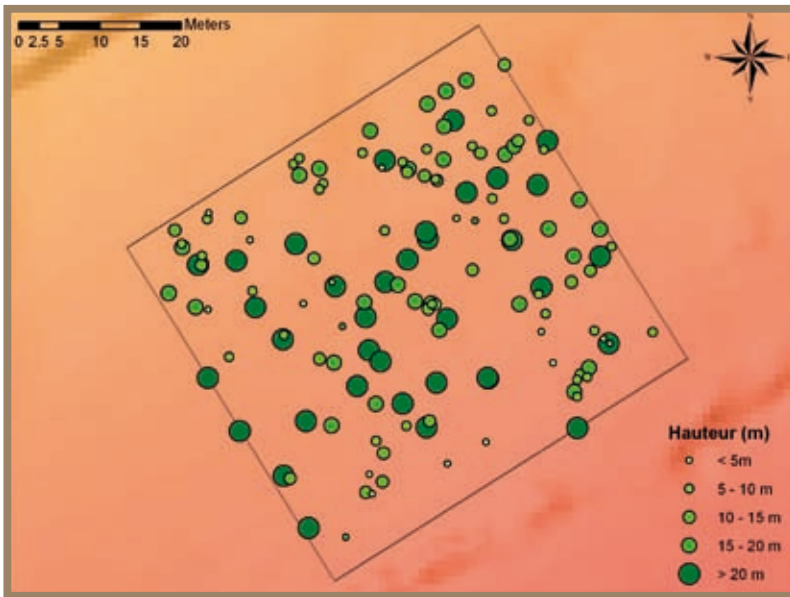


Figure 3.4.3 Localisation des sites d'étude de Murianette

3.4.3 Mise en place de placettes de références sur nos sites d'études de Murianette et du versant du Freney

Pour le site de Murianette, la placette couvre une superficie de 50x50 m. Tous les arbres ont été inventoriés et cartographiés. Pour tous les arbres présents les données suivantes ont été levées:

- position en x, y et z;
- diamètre à hauteur de poitrine;
- hauteur totale;
- essence.



Pour les sites d'étude du versant du Freney nous avons implanté:

- 7 placettes de référence de 25 m x 25 m sur lesquelles les mêmes données ont été mesurées. Compte tenu de la surface du site de Maurienne, nous avons décidé de réduire la surface des placettes de références afin de pouvoir en augmenter le nombre sur ce site;
- 18 placettes dites de "sondage", pour lesquelles seuls les 6 arbres les plus proches de ces placettes ont été inventoriés. Ces placettes ont été par la suite utilisées afin des tester l'extrapolation des analyses dendrométriques réalisés sur les placettes de 25 m x 25 m.

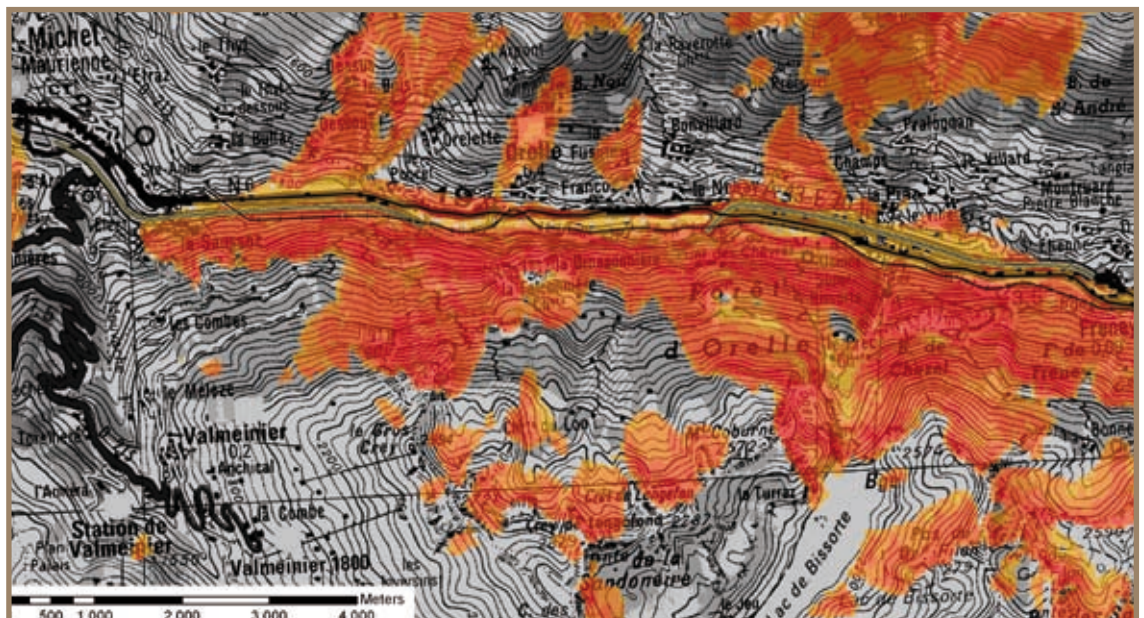
La **figure 3.4.4** présente un exemple de cartographie d'une placette de référence.

Figure 3.4.4 Cartographie de la placette de référence du site de Murianette

3.4.4 Cartographie des zones de propagation maximale à grande échelle avec le principe de la ligne d'énergie

Pour la totalité de la vallée entre Saint Michel de Maurienne et Modane et en utilisant le MNT de l'IGN au pas de 50 m, nous avons localisé avec les critères du **tableau 3.3.22** et le principe de la ligne d'énergie, les zones de départ probable et les zones de propagation maximale de chutes de pierres. Nous avons utilisé une valeur d'angle de 32° pour appliquer le principe de la ligne d'énergie. La **figure 3.4.5** présente les résultats obtenus. Par simple croisement de la localisation des voies de communication avec les zones cartographiées on délimite les secteurs à risque. Au final, les chutes de pierres font potentiellement peser un risque sur 40% de la route nationale et 61% de la voie ferrée. La présence des ouvrages de génie civil de protection, implantés suite à des évènements, dans ces secteurs confirme nos résultats. Cette méthode permet donc d'obtenir rapidement un zonage préliminaire à grande échelle. Néanmoins elle nécessite d'être complétée par des études à échelle plus fine. Une telle échelle nécessite un MNT à une résolution plus fine et de vrais outils de simulations trajectographiques. C'est pourquoi nous avons testé l'apport des données LIDAR et l'usage du logiciel Rockyfor.

Figure 3.4.5 Cartographie des zones de propagation obtenues avec le principe de la ligne d'énergie



3.4.5 Le traitement des données LIDAR des sites de Murianette et du versant du Freney

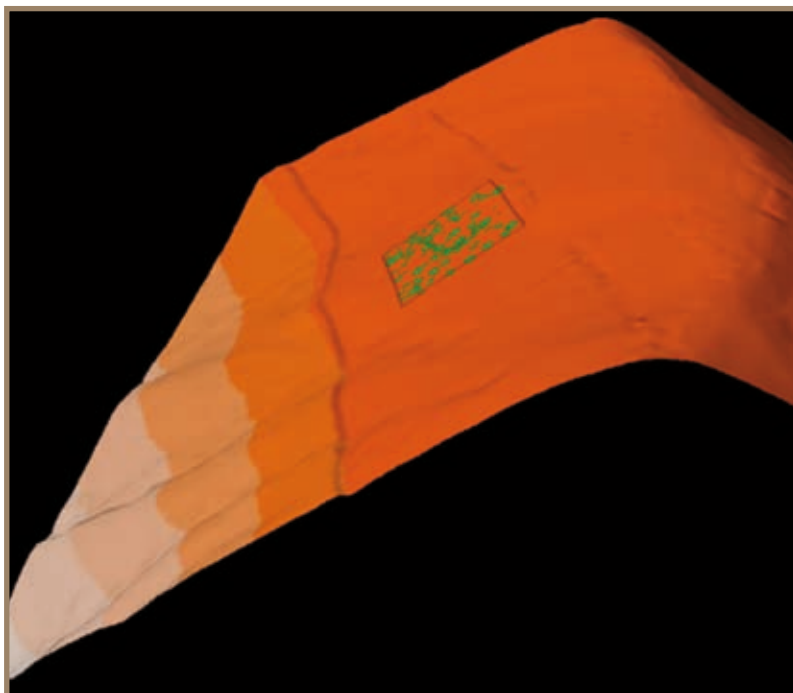


Figure 3.4.6 Bloc diagramme en 3D du MNS du site Murianette avec le positionnement de notre placette de référence. Cette placette de référence a une surface de 50x50 m sur laquelle tous les arbres ont été inventoriés et cartographiés et pour laquelle un MNT au pas de 1 m a été réalisé par levé de géomètre (avec GPS et théodolite)

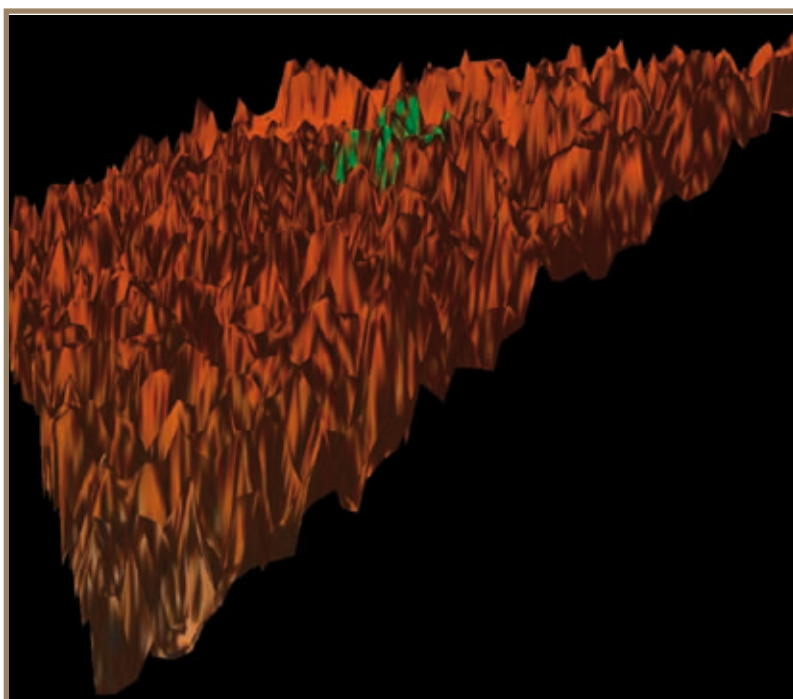


Figure 3.4.7 Bloc diagramme en 3D du MNE du site Murianette avec le positionnement de notre placette de référence. En milieu forestier le MNE représente l'ensemble des informations altimétriques au toit de la canopée. L'effet forêt de pain de sucre correspond à la représentation des houppiers des arbres en 3D

Rappel du principe général de notre méthode d'analyse des données LIDAR

Les données LIDAR donnent pour chacun des points du terrain, interceptant l'impulsion lumineuse émise par le scanner aéroporté, son altitude et sa position ainsi que le temps de retour de cette impulsion. Le premier traitement consiste donc à séparer les données relatives au sol proprement dit de celles caractérisant l'occupation de celui-ci (figure 3.4.6, 3.4.7). Ce premier traitement est réalisé par la société en charge de l'acquisition des données initiales. Pour chacun de nos sites d'études nous avons acquis les données LIDAR au pas de 1 m x 1 m.

Le deuxième type de traitement est réalisé par l'utilisateur. En fonction de sa problématique, il va analyser plus ou moins finement le jeu de données correspondant au sol (MNT) et au sur-sol (MNE). Le sur-sol est la couche d'information représentant les obstacles présents sur le sol.

La première analyse est celle qui concerne l'appréciation de la qualité du modèle numérique de terrain au sol. Pour cela l'opérateur doit disposer de points de terrain fiables tels que: des bornes IGN, des points levés au GPS mais avec un temps de présence du GPS sur le point de levé permettant de minimiser l'erreur de mesure. Dans notre cas, nous avons utilisé le centre de nos placettes de références. Nous avons positionné notre GPS au centre de la placette et celui-ci a fonctionné en continu au minimum 8h00. En plus de ces levés GPS nous avons utilisé la présence d'éléments remarquables tels que les chemins, les pistes forestières, les voies de chemin de fer, les falaises et la présence d'ouvrages de protection pour tester la qualité des MNT LIDAR de chacun de nos sites d'études.

Si le MNT LIDAR est considéré comme robuste par l'opérateur alors il peut travailler à la caractérisation des éléments du sur-sol qui l'intéresse. Pour cela, il ne dispose que des données altimétriques. Il doit donc développer des algorithmes lui permettant de classer les données et de ne conserver que celles correspondants aux objets qu'il veut caractériser.

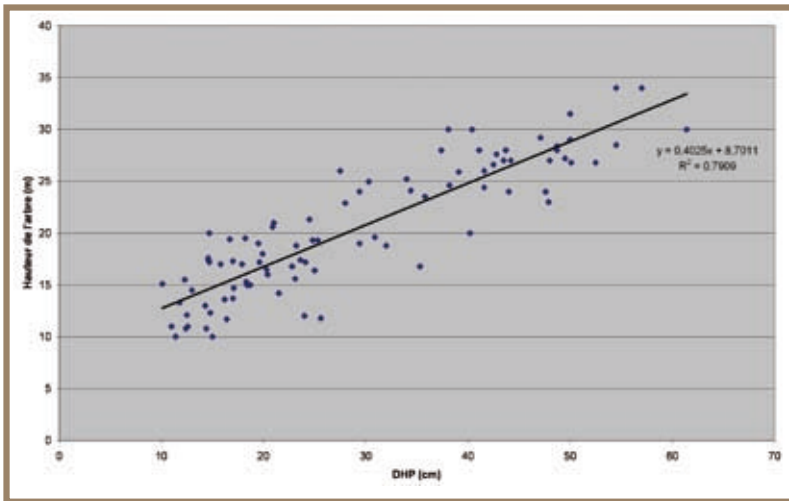


Figure 3.4.8 Corrélation entre le diamètre des arbres présents sur la placette de référence du site de Murianette et leur hauteur ($H = 0.4025 \text{ DHP} + 8.7011$ $R^2 = 0.79$)

reliant la hauteur au diamètre des arbres (figure 3.4.8). En ce qui concerne les courbes de corrélation entre la hauteur d'un arbre et son diamètre, il s'avère que la qualité de la corrélation dépend du type de peuplement. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de travailler sur chacune des zones LIDAR correspondant à nos placettes de référence avec uniquement les courbes obtenues sur chacune de ces placettes.

Résultats des analyses sur la qualité des MNT LIDAR

Pour le site de Murianette nous avons utilisé les données des relevés GPS réalisés lors de la mise en place de la placette de référence ainsi que la localisation des pistes forestières présentes sur ce site.

Pour le site de Maurienne nous n'avons utilisé que les relevés GPS du centre de nos placettes ainsi que la localisation des pistes, routes, voies de chemin de fer et de certain ouvrages tels que: merlon, échelles de perroquets et talus des voies ferrés.

Puis, pour l'ensemble des sites nous avons comparé les MNT LIDAR à celui de l'IGN.

Les figures 3.4.9 et 3.4.10 présentent une vue en 3 dimension de chacun de ces sites.

A partir du MNS de chacun de ces sites (figure 3.4.11, 3.4.12) nous avons généré le modèle numérique de terrain de la topographie au sol et ainsi pu extraire les courbes de niveau par interpolation. L'équidistance des courbes est de 1 m (figure 3.4.13 à 3.4.15). Puis nous avons procédé à deux comparaisons pour évaluer la robustesse de notre MNT.



Figure 3.4.9 Présentation de la localisation du site de Murianette en Isère sur une vue en 3D Google Earth. Ce site est situé sur une zone de glissement superficiel et couvre une superficie totale de 422 ha

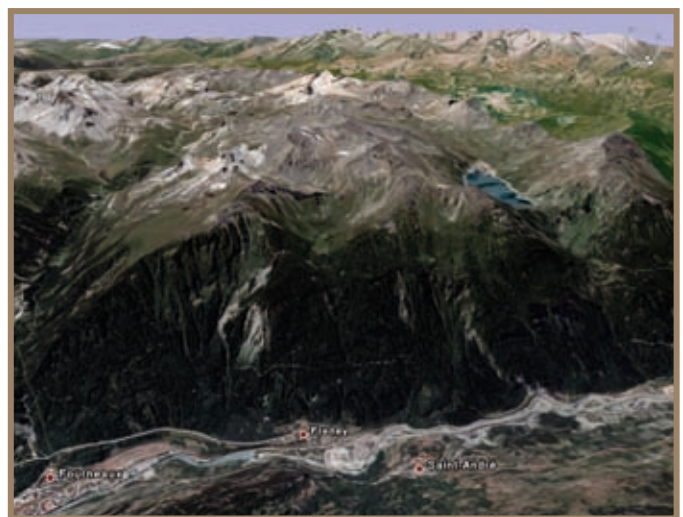


Figure 3.4.10 Présentation de la localisation du site de Maurienne en Savoie sur une vue en 3D Google earth. Ce site est situé sur une zone assujettie aux chutes de blocs et aux avalanches. Il couvre une superficie totale de 34 000 ha

En ce qui concerne les arbres il faut donc pouvoir identifier pour chacun des arbres présents son apex et sa hauteur totale. Ces deux données sont nécessaires afin, entre autre, de pouvoir attribuer à chacun des arbres recensés une valeur de diamètre. L'extraction des apex nécessite de pouvoir identifier le point le plus haut dans une surface donnée. L'attribution d'une valeur de diamètre à une hauteur donnée nécessite quant à elle de disposer de la courbe de corrélation qui existe entre ces deux paramètres dendrométriques.

A partir des données cartographiées et des relevés dendrométriques nous avons donc étudié la relation

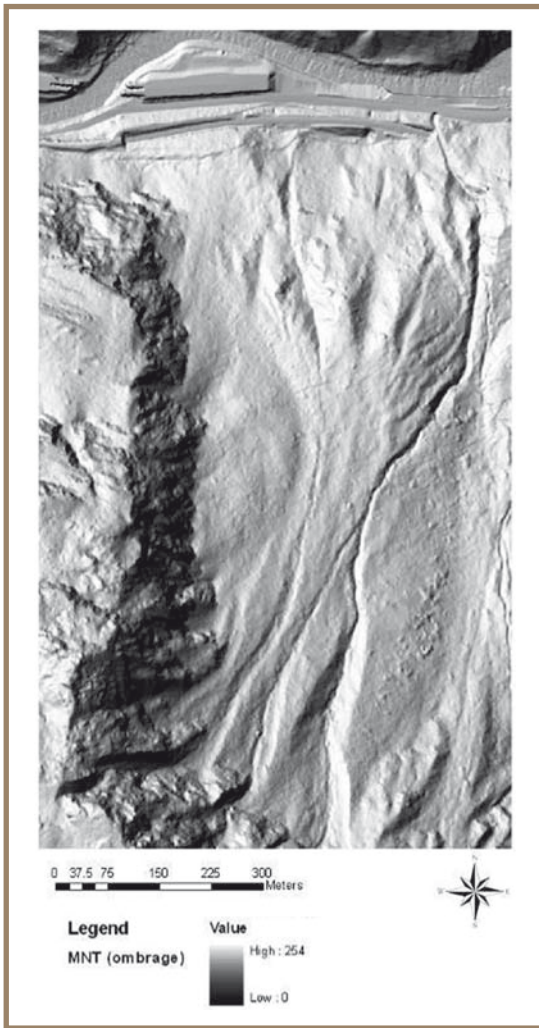


Figure 3.4.11 Extrait du MNS du site de Maurienne



Figure 3.4.12 Visualisation en 3 dimensions de l'extrait du MNS du site de Maurienne donné en figure 3.4.11

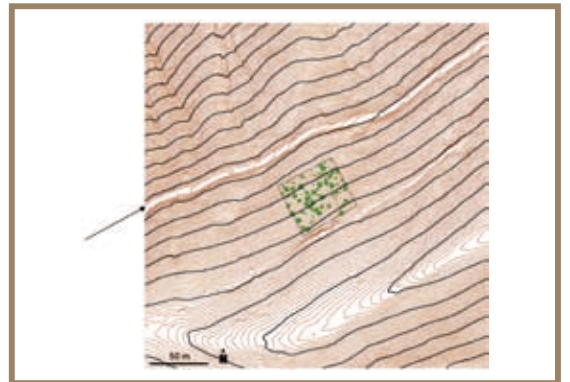


Figure 3.4.13 La couverture de courbes de niveau (courbe avec une équidistance de 1 m en marron, courbes avec une équidistance de 10 m en noire) obtenues par interpolation du MNS du site de Murianette. Noter la mise en évidence d'un chemin forestier (indiqué par la flèche) ayant une largeur de 2 m. La zone centrale correspond à notre placette de référence

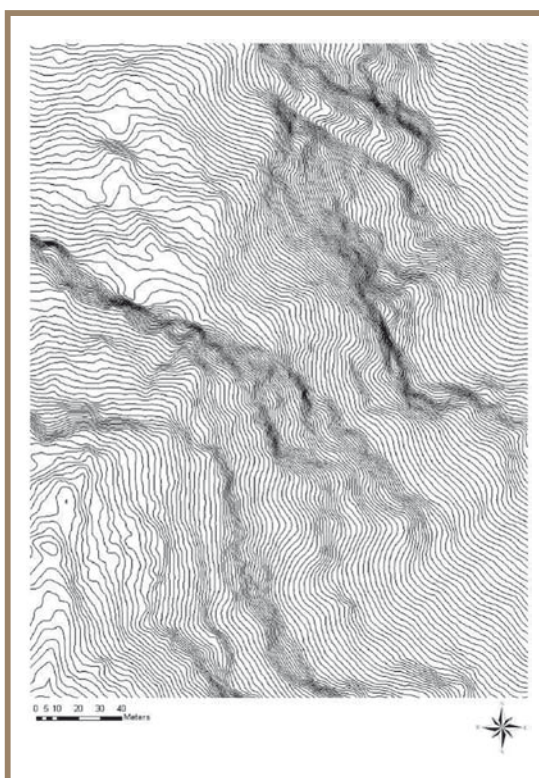


Figure 3.4.14 Extrait de la couverture de courbes de niveau dans les zones de falaises (courbe avec une équidistance de 1 m) obtenues par interpolation du MNS du site de Maurienne

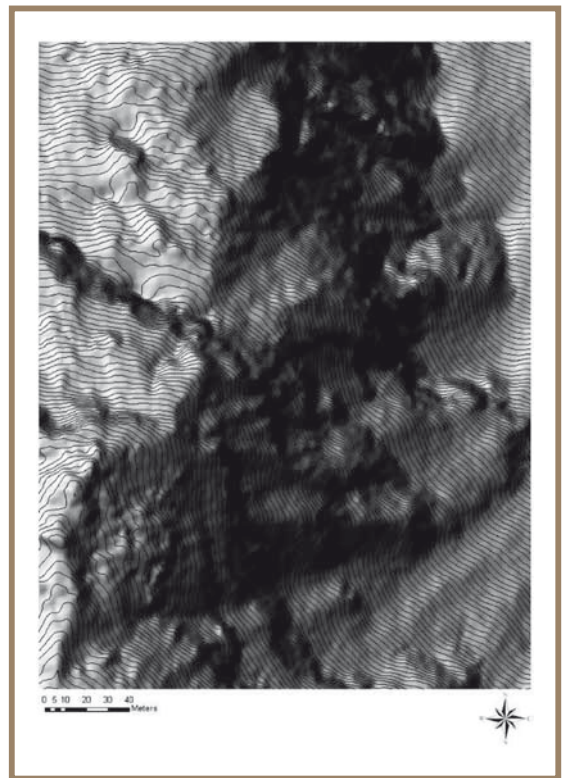


Figure 3.4.15 Ombrage de l'extrait de la couverture de courbes de niveau dans les zones de falaises (courbe avec une équidistance de 1 m) obtenues par interpolation du MNS du site de Maurienne. Les barres rocheuses correspondent aux zones les plus sombres

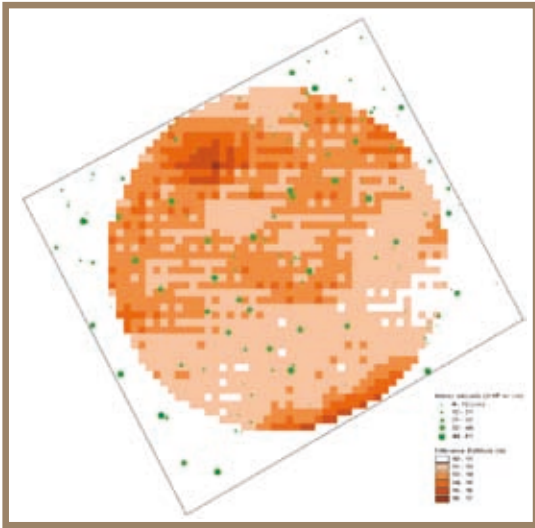


Figure 3.4.16 Carte des différences de valeurs altimétriques entre le MNS et le MNT obtenu par levés de terrain pour le site de Murianette

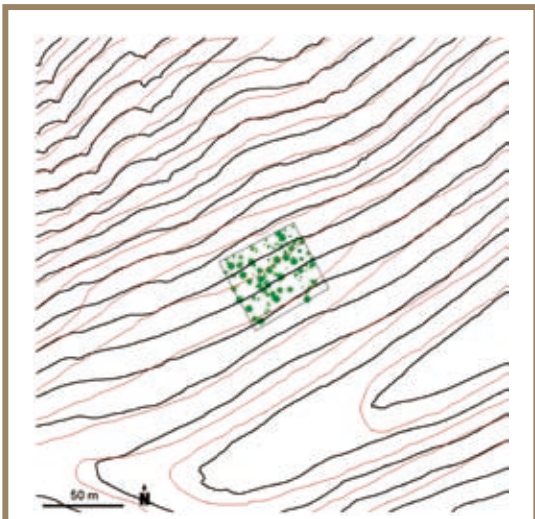


Figure 3.4.17 Comparaison des courbes de niveau avec une équidistance de 10 m obtenues par interpolation de notre MNS (en noire) et celles de l'IGN (en rouge) pour le site de Murianette

Pour le site de Murianette, les premières comparaisons ont été de confronter les MNS obtenus à partir des données LIDAR aux MNT générés à partir de nos semis de point de levés terrain olite, mesurer pour chacun des arbres son diamètre, sa hauteur et donner son essence. L'erreur de positionnement du GPS pour le site de Murianette en xy est de ± 1 m et en z de ± 6 m. Par conséquent pour nos relevés GPS l'erreur absolue en z est de 12 m pour le site de Murianette.

Ces deux modèles de représentation de la topographie (MNS LIDAR et MNT inventaire de terrain) ont été réalisés avec une maille de 1x1 m. A partir de ces deux jeux de données nous avons créé un troisième plan dérivé par différence entre le MNS et le MNT terrain. Nous avons ainsi obtenu une couverture raster contenant la différence d'altitude entre le MNS et le MNT et avec une maille de 1 m x 1 m.

La **figure 3.4.16** présente la carte du nouveau plan dérivé pour le site de Murianette.

Pour le site de Murianette, la différence d'altitude varie de 10 m à 17 m. *A priori* les données LIDAR semblent surestimer l'altitude des points au sol. Mais, si on prend en compte l'erreur absolue des levés GPS, qui est de 12 m, alors soit:

- H1: la différence d'altitude varie de -2 m à +5 m et on peut alors considérer que les deux jeux de données sont similaires;
- H2: la différence d'altitude l varie de 22 m à 29 m et alors les deux jeux de données sont différents.

La seconde comparaison a été réalisée en confrontant notre couverture de courbes de niveaux aux courbes de niveau de l'IGN. Pour ce faire, nous avons extrait de notre couverture de courbes de niveaux les courbes maîtresses avec une équidistance de 10 m. La **figure 3.4.17** présente le croisement de ces deux sources d'information pour le site Murianette.

Il ressort de cette comparaison, que 60% des courbes de niveau ont une localisation géographique et une altitude similaire. Par contre 40% des courbes ne coïncident pas entre les données LIDAR et celles de l'IGN. On observe un fort effet de lissage pour les données de l'IGN alors que les données LIDAR permettent de cartographier les thalwegs masqués par le couvert forestier. De plus, les données LIDAR permettent d'identifier les chemins et la voirie. Le MNT de l'IGN ne le permet pas et ce dans les deux cas (**figure 3.4.18**).

Figure 3.4.18 Localisation de la piste forestière et d'un sentier (en rouge sur la figure a), des micros thalwegs et des lignes de crêtes sous couvert forestier (en bleu et violet sur la figure b)

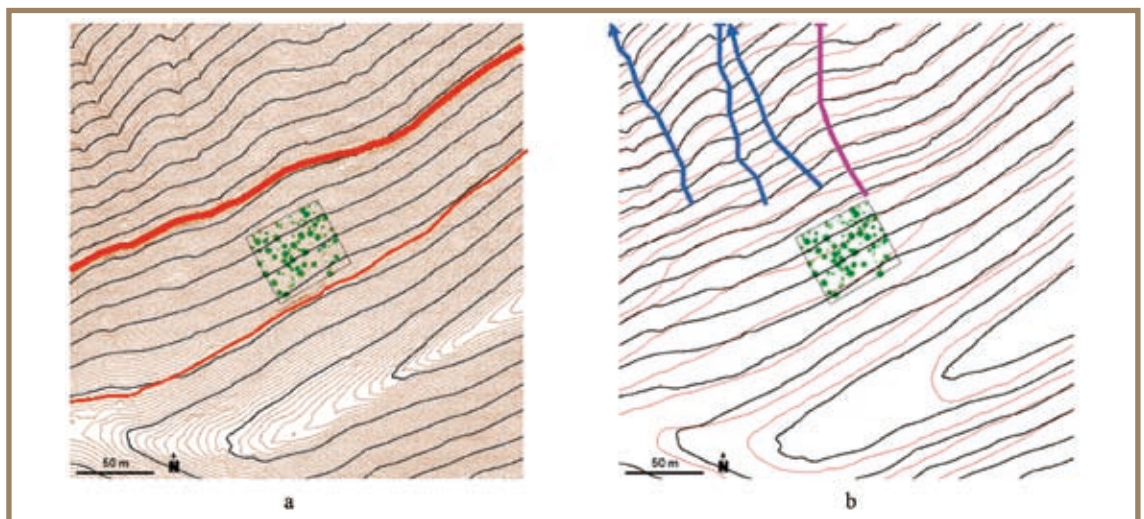
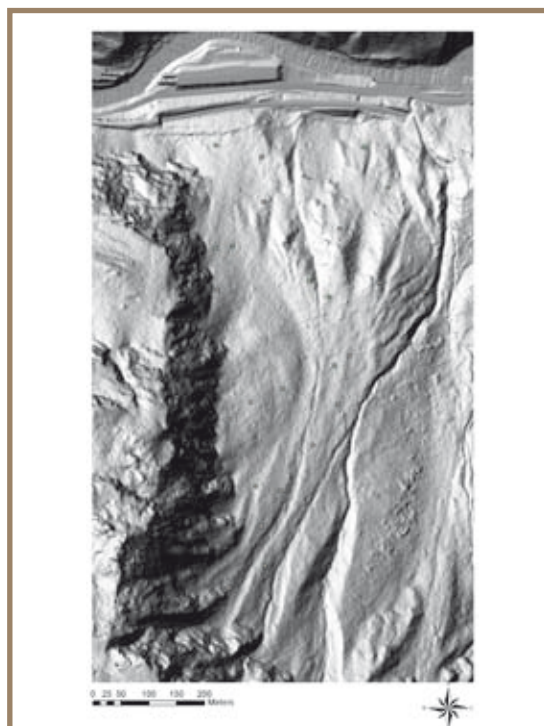


Figure 3.4.19

Localisation de nos placettes (cercles en vert) de références sur le versant test du site de Maurienne



Au regard des 60% de correspondance entre ces données, il s'avère que la condition H1 est valide. Par conséquent, le MNS obtenu avec les données LIDAR semble bien refléter la réalité de la topographie et ce de manière plus robuste que les données de l'IGN.

Pour le site de Maurienne, nous avons travaillé à l'échelle du versant sur lequel sont implantées nos placettes de références de 25 m x 25 m et celles dites des 6 arbres les plus proches. La **figure 3.4.19** présente la localisation de ces placettes.

Nous avons comparé entre elles les données de levés GPS, du MNT de l'IGN au pas de 25 m (produit commercial de l'IGN obtenu par ré-interpolation du MNT au pas de 50 m), et celles du MNS LIDAR et ce pour chacun des centres de nos placettes de références (25 au total).

Le **tableau 3.4.2** présente les résultats de ces travaux de comparaison.

Tableau 3.4.2 Tableau de présentation des résultats des calculs d'erreurs pour les données altimétriques du versant test du site de Maurienne

Numéro de placette	Altitude du point GPS (m)	Altitude du MNT de l'IGN (m)	Erreur IGN en m (IGN-GPS)	Erreur IGN en valeur absolue en m	Erreur IGN en % (IGN-GPS/GPS)	Erreur IGN en valeur absolue en % (IGN-GPS/GPS)	Altitude du MNT Lidar (m)	Erreur Lidar en m (Lidar-GPS)	Erreur Lidar en valeur absolue en m	Erreur Lidar en % (Lidar-GPS/GPS)	Erreur Lidar en valeur absolue en % (Lidar-GPS/GPS)
25-01	1045.02	1036	-9.02	9.02	-0.86%	0.86%	1045.65	0.63	0.63	0.06%	0.06%
6-09	1282.3	1277	-5.3	5.3	-0.41%	0.41%	1282	-0.3	0.3	-0.02%	0.02%
6-04	1450.31	1447	-3.31	3.31	-0.23%	0.23%	1447	-3.31	3.31	-0.23%	0.23%
6-14	1200	1197	-3	3	-0.25%	0.25%	1200.5	0.5	0.5	0.04%	0.04%
25-06	1447.89	1445	-2.89	2.89	-0.20%	0.20%	1445	-2.89	2.89	-0.20%	0.20%
6-02	1164.3	1162	-2.3	2.3	-0.20%	0.20%	1160.5	-3.8	3.8	-0.33%	0.33%
25-04	1330	1329	-1	1	-0.08%	0.08%	1331	1	1	0.08%	0.08%
6-11	1230	1230	0	0	0.00%	0.00%	1229	-1	1	-0.08%	0.08%
6-05	1500	1501	1	1	0.07%	0.07%	1501	1	1	0.07%	0.07%
6-08	1378.12	1380	1.88	1.88	0.14%	0.14%	1380	1.88	1.88	0.14%	0.14%
25-07	1034.86	1039	4.14	4.14	0.40%	0.40%	1033.5	-1.36	1.36	-0.13%	0.13%
6-16	1160	1166	6	6	0.52%	0.52%	1159	-1	1	-0.09%	0.09%
6-06	1590.63	1597	6.37	6.37	0.40%	0.40%	1595.7	5.07	5.07	0.32%	0.32%
6-07	1541.29	1549	7.71	7.71	0.50%	0.50%	1545.8	4.51	4.51	0.29%	0.29%
6-03	1360.19	1368	7.81	7.81	0.57%	0.57%	1358.8	-1.39	1.39	-0.10%	0.10%
25-02	1166.93	1175	8.07	8.07	0.69%	0.69%	1168.7	1.77	1.77	0.15%	0.15%
6-18	1021.83	1031	9.17	9.17	0.90%	0.90%	1021.47	-0.36	0.36	-0.04%	0.04%
6-15	1220	1232	12	12	0.98%	0.98%	1219.9	-0.1	0.1	-0.01%	0.01%
25-05	1387.86	1400	12.14	12.14	0.87%	0.87%	1381.8	-6.06	6.06	-0.44%	0.44%
6-10	1330	1343	13	13	0.98%	0.98%	1330	0	0	0.00%	0.00%
6-01	1101.8	1116	14.2	14.2	1.29%	1.29%	1098.6	-3.2	3.2	-0.29%	0.29%
25-03	1293.51	1308	14.49	14.49	1.12%	1.12%	1290	-3.51	3.51	-0.27%	0.27%
6-12	1230	1250	20	20	1.63%	1.63%	1227.5	-2.5	2.5	-0.20%	0.20%
6-13	1210	1230	20	20	1.65%	1.65%	1209	-1	1	-0.08%	0.08%
		Moyenne	5.47	7.70	0.44%	0.62%	Moyenne	-0.64	2.01	-0.06%	0.15%
		Erreur Max	20	20	1.65%	1.65%	Erreur Max	5.07	6.06	0.32%	0.44%
		Erreur Min	0	0	0.00%	0.00%	Erreur Min	0	0	0.00%	0.00%
		Ecart type	7.99	5.75	0.66%	0.48%	Ecart type	2.57	1.68	0.19%	0.12%

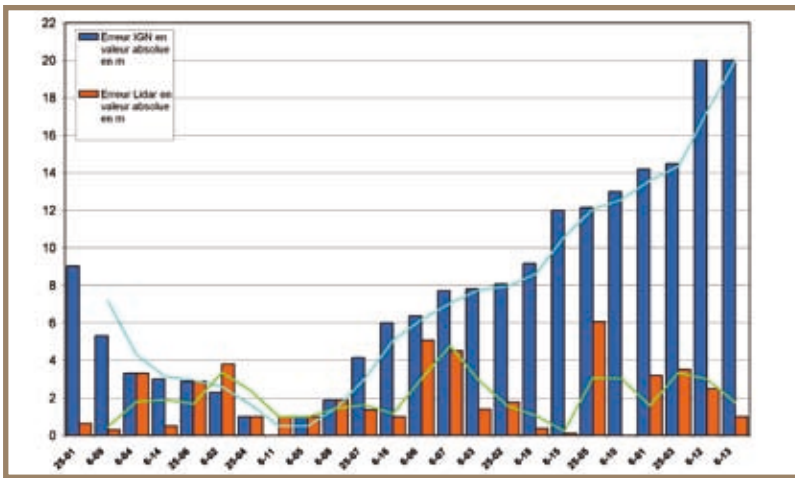


Figure 3.4.20 Représentation graphique des histogrammes des erreurs du LIDAR et du MNT de l'IGN en valeur absolue

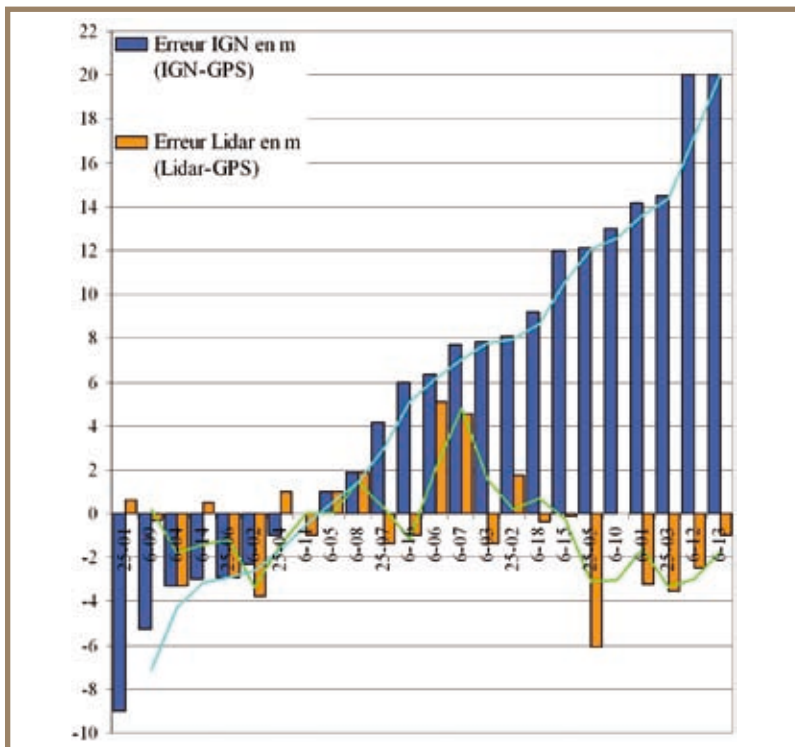


Figure 3.4.21 Représentation graphique des histogrammes des erreurs du LIDAR et du MNT de l'IGN

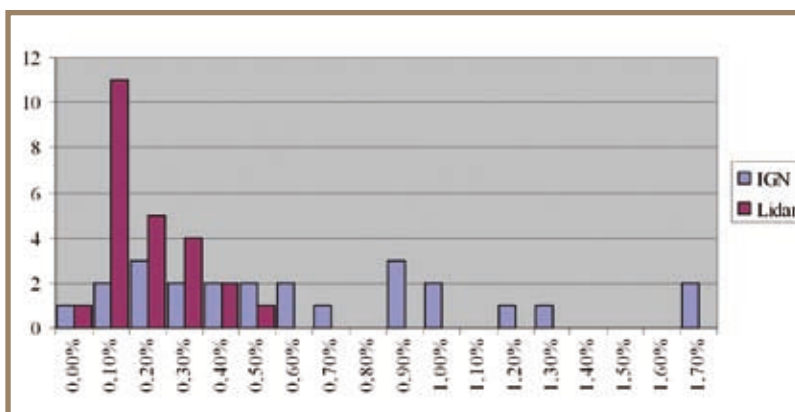


Figure 3.4.22 Représentation graphique des histogrammes des ratio d'erreurs du LIDAR et du MNT de l'IGN

Les figures 3.4.20 à 3.4.22 sont des représentations graphiques de ces résultats. Afin de faciliter la comparaison nous avons calculé des ratios d'erreurs en utilisant la formule type suivante:

$$\frac{\text{(Altitude calculée - Altitude GPS) / Altitude GPS}}{\quad} \quad (3.4.1)$$

Le résultat de ce calcul est donné en pourcentage. Une valeur négative indique une sous-estimation alors qu'une valeur positive est une surestimation. Nous avons aussi calculé une erreur absolue en ne prenant que la valeur absolue de l'erreur calculée.

Au regard du tableau 3.4.2, il s'avère que les différences entre les données LIDAR et GPS sont plus faibles que celles entre les données IGN et GPS. Pour les données LIDAR le ratio d'erreur absolue varie de 0,00% à 0,44% alors que pour le MNT de l'IGN il varie de 0,62% à 1,65%. L'altitude moyenne du versant test est de 1 278 m. Un ratio d'erreur de 1,65% représente une variation d'altitude de 21 m alors qu'un ratio de 0,44% représente une variation de 5,62 m.

De l'analyse du tableau 3.4.2, il ressort que l'erreur absolue du MNT de l'IGN est très variables et ne correspond donc pas à une erreur systématique qui pourrait être occasionnée par l'effet de masque de la canopée forestière par exemple. A l'opposé l'erreur absolue des données LIDAR est très fortement centrée sur la classe 0,10% et a une faible gamme de variation. Par conséquent le MNT LIDAR est plus robuste que celui de l'IGN au pas de 25 m x 25 m. La précision altimétrique absolue moyenne du MNT LIDAR est de 2 m alors que celui de l'IGN est de 7,70 m. Ce dernier chiffre est conforme à la précision octométrique donnée par l'IGN.

Comme pour les sites de Murianette nous avons comparé le positionnement des courbes de niveaux obtenues par interpolation des deux sources de données (IGN et LIDAR). La figure 3.4.23 présente cette comparaison.

La figure 3.4.23 fait bien ressortir le lissage du relief que génèrent les données de l'IGN par rapport aux données LIDAR. Ceci est d'autant plus marqué dans les thalwegs. La figure 3.4.24 représente une comparaison des données altimétriques à l'échelle de tout le site de Maurienne.

La dernière comparaison a porté sur les éléments artificiels visibles sur les deux types de MNT. Les **figure 3.4.26, 3.4.27 et 3.4.28** présentent la détection par le LIDAR de la zone d'emprise d'échelles de perroquets qui sont des ouvrages de protection pare pierres ainsi que le talus de la voie SNCF.

Seul le profil en long réalisé avec les données LIDAR permet de mettre en évidence la présence de ces deux zones d'emprises. Par conséquent, il doit être possible par traitement des données LIDAR de caractériser les plateformes d'emprises d'ouvrages de protection et celles des voies de communication. Cette dernière information est très importante dans

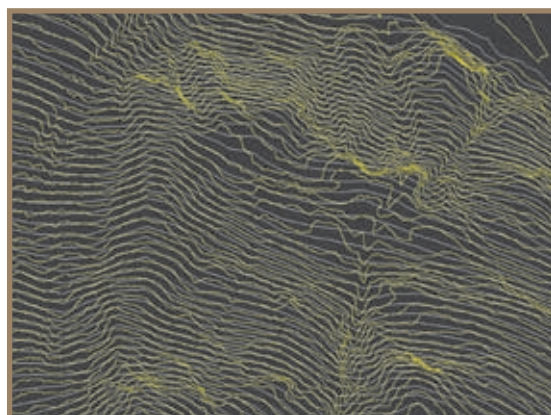


Figure 3.4.23 Comparaison entre les courbes de niveau obtenues par interpolation des données IGN (en bleu) et LIDAR (en jaune). Extrait de la partie sommitale du versant test du site de Maurienne. L'équidistance des courbes est de 10 m

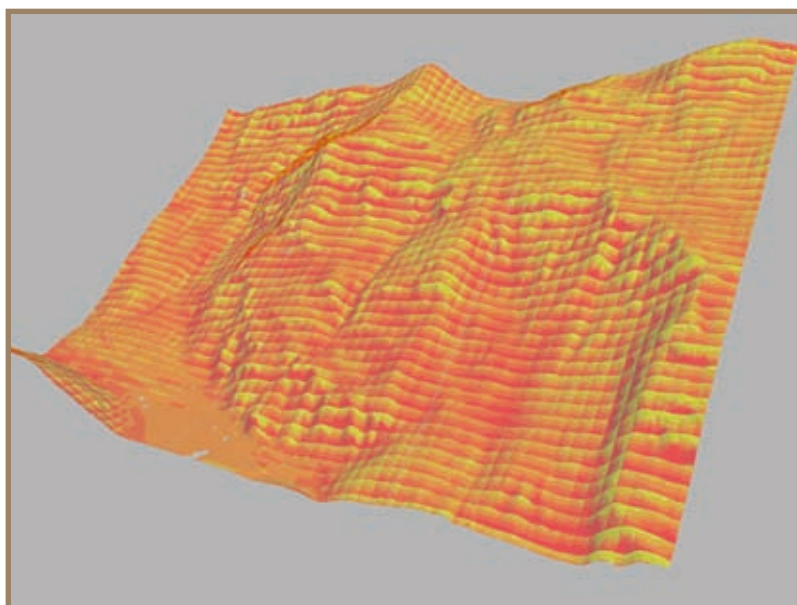


Figure 3.4.24 Comparaison maille à maille entre le MNT LIDAR et celui de l'IGN (LIDAR - IGN). Les pixels en jaune correspondent à une erreur de 20 m et ceux en rouge à une erreur de -40 m. Le MNT LIDAR a une résolution de 1 m x 1 m et celui de l'IGN de 25 m x 25 m. Il est intéressant de noter le côté harmonique de la différence qui fait ressortir visuellement la résolution du MNT de l'IGN

Figure 3.4.25 Photo du site du versant du Freney



le contexte de la modélisation de la propagation des aléas de type mouvement gravitaire rapide. En effet, les plateformes et autres types de terrassements influencent très fortement la propagation des chutes de blocs rocheux par exemple. Il est donc nécessaire de pouvoir disposer d'un MNT permettant de caractériser de telles zones.

Mais si le LIDAR offre un tel avantage, il génère aussi une contrainte dans l'utilisation du MNT. En effet, la modélisation de la propagation d'un aléa naturel doit s'effectuer en premier lieu à terrain nu. Or le fait que le LIDAR est en mesure de cartographier des ouvrages tels que des échelles de perroquet, nécessite de la part de ses utilisateurs de pouvoir corriger le MNT afin de supprimer ces ouvrages et ainsi de pouvoir travailler réellement à terrain nu.

Si ces résultats sont très prometteurs quant à l'intérêt du LIDAR pour la réalisation de MNT robuste et fiable pour les travaux de simulations de la propagation des aléas naturels de types mouvements gravitaires rapides, il faut néanmoins garder à l'esprit qu'il faut systématiquement vérifier la qualité du MNT et ce quelle qu'en soit la source de données initiales. Ainsi sur le site de Maurienne nous avons détecté des erreurs lors du traitement initial des données par notre prestataire de service. La **figure 3.4.29** est un exemple d'erreur d'interpolation des données brutes. De telles erreurs nécessitent de ré-interpoler le MNT dans de tels secteurs.

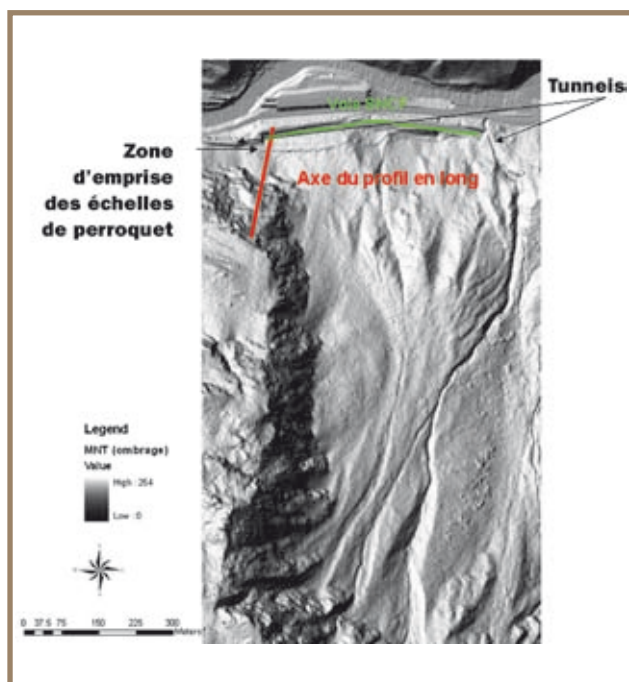


Figure 3.4.26 Localisation du profil en long réalisé avec les données LIDAR

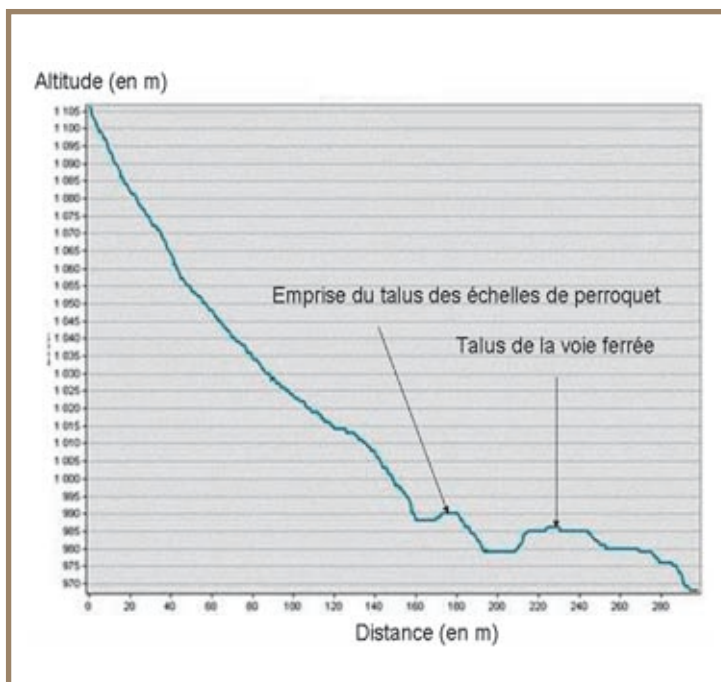


Figure 3.4.27 Profil en long réalisé avec le MNT LIDAR



Figure 3.4.28 Photo des échelles de perroquet situé sur le profil en long

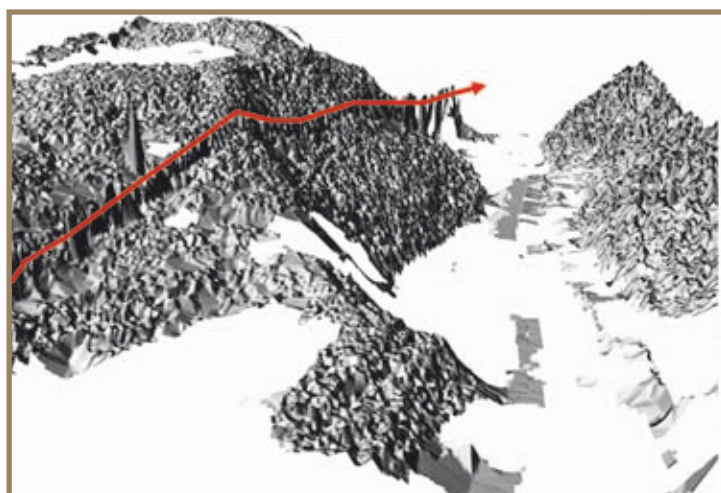


Figure 3.4.29 Exemples d'erreurs lors du traitement des données brutes du LIDAR. Noter la présence d'une dorsale (matérialisé par la fleche rouge) à l'interface de deux bandes de survol de l'avion. La largeur de cette "dorsale" est de 3 m

Résultats des analyses dendrométriques

Après avoir testé la qualité des données altimétriques nous avons testé nos outils d'extraction de la position des arbres et des paramètres dendrométriques.

Dans un premier temps nous avons établi pour chacune de nos placettes de référence la corrélation qui existe entre la hauteur et le diamètre des arbres. La **figure 3.4.8** et la **figure 3.3.24** donnés précédemment présentent ces courbes. Cette relation a été par la suite utilisée pour attribué à chacun des arbres obtenus par analyse du MNE un diamètre en fonction de sa hauteur. Puis nous avons comparé les résultats obtenus avec les données de nos inventaires de terrain.

Compte tenu de la composition en essence de notre placette de référence du site de Murianette, soit 7% de résineux pour 93% de feuillus, nous avons du adapter notre outil d'analyse. En effet, nous n'avions

jusqu'à présent testé notre outil que sur des peuplements constitués à plus de 80% de résineux. La forme du houppier d'un feuillu est très différente de celui d'un résineux. Le fait que le houppier d'un feuillu s'étale au toit de la canopée, génère dans le MNS plusieurs *first impulse* pour le même arbre. Pour résoudre ce problème nous avons testé différents filtres. Le plus efficace s'est avéré être une combinaison d'unique-ment deux filtres différents pour moyenner la hauteur, celui qui permet de moyenner les données sur une fenêtre glissante de 2 m de rayon et celui pour une fenêtre de 5 m.

Pour chacune des placettes de références de nos sites d'étude nous avons appliqué le même protocole d'analyse. Les **figures 3.4.30 à 3.4.32** illustrent pour la placette de Murianette, les résultats des principales étapes de ce protocole et le **tableau 3.4.3** présente une synthèse des résultats pour l'ensemble des sites d'études. Les principales étapes du protocole d'analyse sont:

1. cartographier les arbres à partir du MNE et comparer cette cartographie à celle réalisée sur le terrain (**figure 3.4.30**);
2. déterminer à l'échelle de la placette le nombre d'arbre correctement identifié et comparer l'histogramme de répartition des hauteurs calculées avec celui des données de l'inventaire de terrain. (**figure 3.4.31**);
3. attribuer aux arbres identifiés avec le LIDAR une valeur de diamètre à partir de leur hauteur calculée avec les données LIDAR. Pour cela, nous avons utilisé la corrélation existante entre le diamètre et la hauteur. La **figure 3.4.32** présente les histogrammes de la fréquence de répartition en classe de diamètre;
4. calculer et comparer la surface terrière obtenue avec les données LIDAR à celle mesurée sur le terrain. Nous rappelons que la surface terrière est la somme de toutes les surfaces des sections d'arbres mesurées à 1.30 m de haut (hauteur de poitrine).

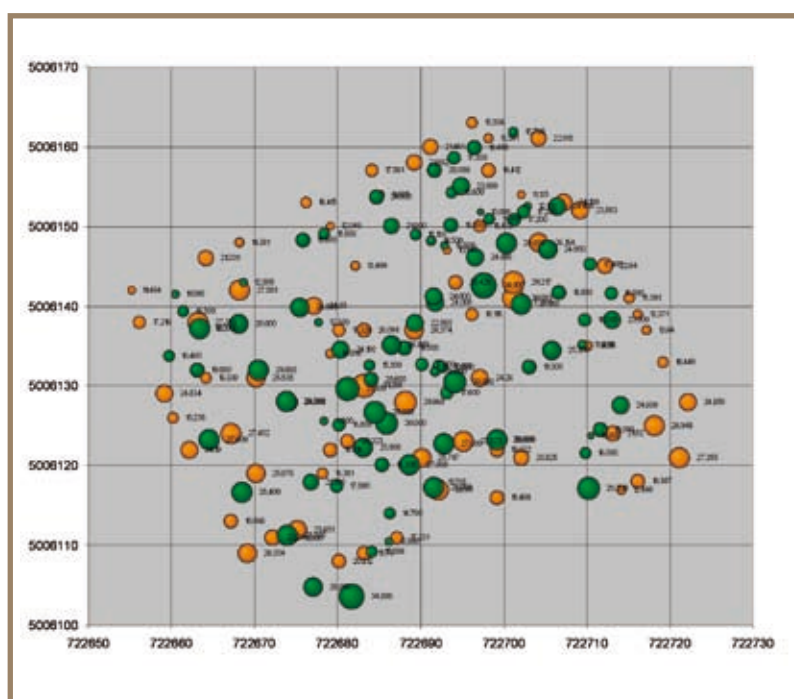


Figure 3.4.30 Cartographie des arbres de la placette de référence (en jaune les arbres présents en vert les arbres obtenus par analyse du MNE). Compte tenu de l'erreur de précision en XY de notre GPS, qui est de ± 1 m, on obtient que 65% des arbres identifiés est correctement cartographié

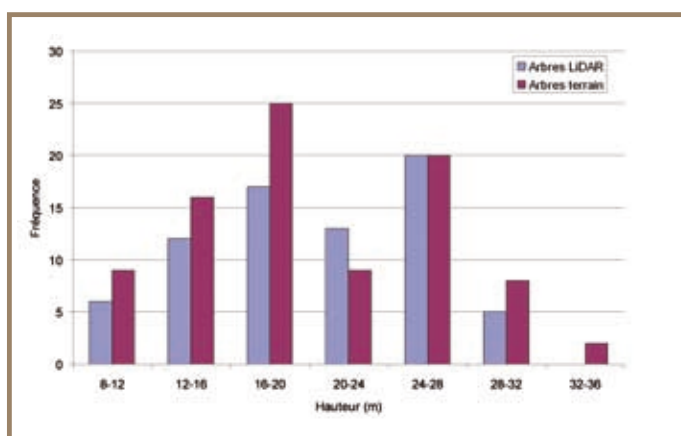


Figure 3.4.31 Comparaison des histogrammes de la répartition en classe de hauteur. Sur la totalité de la placette, 80% des arbres de plus de 10 m de haut ont été identifiés avec nos traitements des données LIDAR. Il est intéressant de noter que l'allure des histogrammes de la fréquence de répartition en classe de hauteur est similaire entre les données terrain et les données "extraites"

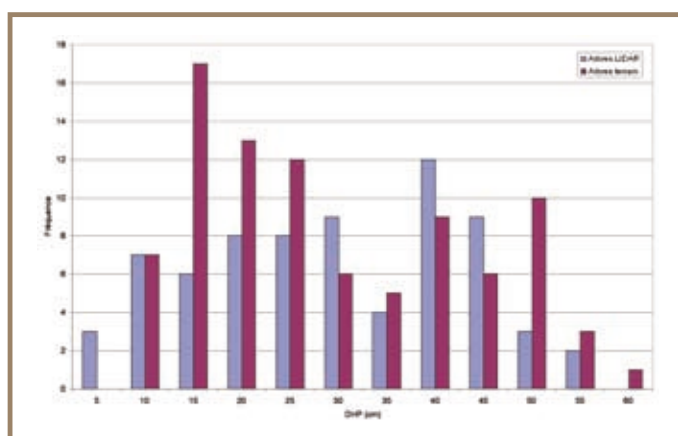


Figure 3.4.32 Comparaison des histogrammes de la répartition en classe de diamètre à hauteur de poitrine (DHP)

De l'analyse du **tableau 3.4.3**, il ressort que:

- les résultats les meilleurs sont obtenus pour des peuplements constitués d'une seule strate. On obtient ainsi 89% d'arbres de plus de 10 m de haut qui sont détectés et 91% de la surface terrière qui est détectée;
- les résultats obtenus pour les peuplements de type taillis sont les plus mauvais. En effet, seul 30% des tiges sont détectées et pour la surface terrière ce chiffre est de 44%. Ceci peut s'expliquer par le fait que le toit de la canopée d'un taillis est très homogène et que les cépées ont toutes la même hauteur. Ainsi le LIDAR ne détecte que l'apex des cépées et représente celle-ci par un seul individu alors qu'en fait elles sont constituées de plusieurs brins;

Tableau 3.4.3 Synthèse de l'ensemble des résultats de l'inventaire des placettes à partir des données LIDAR

Placettes	Inventaire de terrain				Inventaire réalisé avec le LIDAR			Pourcentage d'identification (valeur LIDAR/valeur terrain)			Ratio d'erreur [(valeur terrain-valeur LIDAR)/valeur terrain]					
	Placette	Surface (en ha)	Pourcentage de résineux	Type de peuplement suivant le GSM	Nombre d'arbre de plus de 10 m de haut (tige/ha)	Hauteur moyenne des arbres de plus de 10 m de haut (m)	Surface terrière (m ² /ha)	Nombre d'arbre (tige/ha)	Hauteur moyenne (m)	Surface terrière (m ² /ha)	Nombre d'arbre de plus de 10 m de haut (tige/ha)	Hauteur moyenne des arbres de plus de 10 m de haut (m) (sauf pour les peuplements de type T)	Surface terrière (m ² /ha)	Nombre d'arbre de plus de 10 m de haut (tige/ha)	Hauteur moyenne des arbres de plus de 10 m de haut (m)	Surface terrière (m ² /ha)
Murianette	1 placette	0.25	7%	1-2	352	20.45	29.04	284	20.61	23.48	80.68%	100.78%	80.85%	19.32%	-0.78%	19.15%
Maurienne (7 placettes)	25-01	0.06	17%	1-3 GB	256	17	28.72	201	20	27.36	78.52%	117.65%	95.26%	21.48%	-17.65%	4.74%
	25-02	0.06	70%	Peuplement pauvre sur éboulis	128	27.27	40.32	121	25.8	29.12	94.53%	94.61%	72.22%	5.47%	5.39%	27.78%
	25-03	0.06	100%	1 GB	576	26.73	68	512	29.81	62.08	88.89%	111.52%	91.29%	11.11%	-11.52%	8.71%
	25-04	0.06	31%	Taillis	784	10.05	6.9	240	5.59	3.04	30.61%	55.62%	44.06%	69.39%	44.38%	55.94%
	25-05	0.06	76%	1-2	352	28.73	45.92	272	26.39	32.96	77.27%	91.86%	71.78%	22.73%	8.14%	28.22%
	25-06	0.06	76%	2-3	528	18.67	44.48	352	17.48	24.96	66.67%	93.63%	56.12%	33.33%	6.37%	43.88%
	25-07	0.06	86%	2-3	656	13.35	13.6	464	11.45	11.52	70.73%	85.77%	84.71%	29.27%	14.23%	15.29%
										Moyenne	73.49%	93.93%	74.54%	26.51%	6.07%	25.46%
										Moyenne sans tenir compte des taillis	79.61%	99.40%	78.89%	20.39%	0.60%	21.11%

- que pour les peuplements ayant plusieurs strates, la strate la plus faible est sous-estimée ou totalement invisible au LIDAR. Ceci est dû à l'effet de masque de la strate supérieure. Pour ces peuplements le LIDAR ne peut détecter que 78% des tiges de plus de 10 m de haut et 77% de la surface terrière;
- au final notre méthode permet de caractériser en moyenne 74% du matériel ligneux présent sur un site et ce en terme de densité et de surface terrière. En ce qui concerne la hauteur moyenne l'erreur est de seulement 6.07%. Si on fait abstraction des peuplements taillis ces chiffres deviennent: 79% pour la densité et la surface terrière et 0.60% pour la hauteur.

3.4.6 Les résultats des travaux de simulations

Le protocole d'analyse que nous avons établi est le suivant:

- déterminer les volumes des blocs se propageant le long du versant étudié;
- réaliser une série de simulation avec le MNT LIDAR en faisant abstraction de la végétation forestière (scénario dit à terrain nu);
- réaliser une série de simulation avec le MNT LIDAR en prenant en compte la végétation forestière actuellement présente sur le site (scénario dit à terrain réel);
- apprécier le rôle de protection de la forêt par comparaison des résultats scénario terrain et scénario terrain réel;
- sélectionner un site test au regard de son activité chutes de pierres.

Les travaux ont été réalisés sur le site du versant du Freney. Notre choix c'est porté sur ce site car lors de ces 10 dernières années un bloc a atteint la voie ferrée et auparavant l'activité du site était telle que la SNCF a implanté des échelles de perroquets (figure 3.4.33).

Le modèle de trajectographie que nous avons utilisé est le modèle Rockyfor.

Pour ce site nous disposons de l'inventaire (réalisé avec la fiche de terrain de la figure 3.4.34) de terrain nécessaire aux choix des paramètres relatif aux sols et à la végétation forestière.

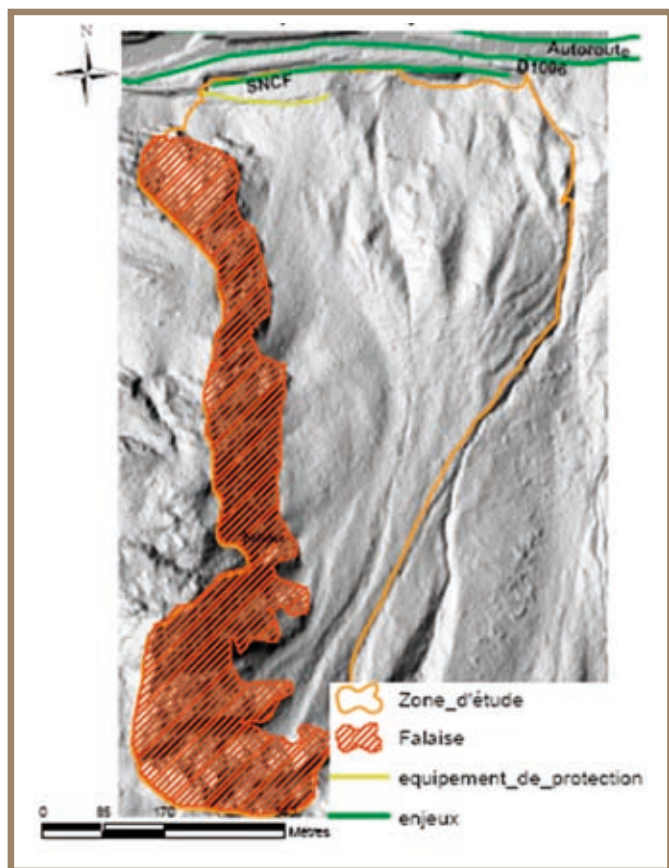


Figure 3.4.33 Localisation du périmètre d'étude, des falaises et des enjeux du site test de Maurienne

Recording Sheet for Rockfall / Chutes de Pierres / Steinschlag Simulation		Comagry	
General / Général / Allgemeine			
Date	Polygon nr.	*Polygon = homogeneous terrain unit	
Location	Mean slope angle	Type of zone <input type="checkbox"/> Source <input type="checkbox"/> Transit <input type="checkbox"/> Deposit	
Rock / Pierre / Stein			
Shape	<input type="checkbox"/> disc <input type="checkbox"/> sphere <input type="checkbox"/> square <input type="checkbox"/> rectangle		
Size (cm)	Height	Width	Depth
Density (kg/m ³)	(Gneiss = 2850, Granite = 2700, Mica schist = 2650, Limestone = 2500)		
Surface elasticity / Élasticité du sol / Untergrund Dämpfung			
Material:	<input type="checkbox"/> Soft surface, loose soil	<input type="checkbox"/> Medium hard, compact soil	<input type="checkbox"/> Medium hard, sorne (éboulis/ Hangschutt)
	<input type="checkbox"/> Hard, bedrock + scree/sol	<input type="checkbox"/> Very hard, bedrock	
Surface roughness / Rugosité du versant / Rauigkeit der Oberfläche			
1. Topography	Sample length =	a b c	
	rock diameter	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
2. Obstacles			
Taken for representative area in the polygon			
MOH: mean obstacle height normal to the slope surface (m) that rock encounters in 70%, 20% and 10% of the cases during a rebound on the slope surface. Potential depth of future impact crater should be accounted for (difficult to estimate).		MOH for 70% of the sample area	cm
		MOH for 20% of the sample area	cm
		MOH for 10% of the sample area	cm
Lying tree stems	Mean height = cm	Mean length = m	Nr. stems =
Forest & bushes / Forêt et brousses / Wald und Bewuchs			
1. Representative forest plot ... m x ... m		2. Representative bush cover plot ... m x ... m	
Nr. of trees in plot		Nr. of stems	Species
Diameters in plot: 25, 30, 35, 40, ...		Mean diam. [cm]	
		Stove diam. [cm]	
Mean diam. [cm]	Coniferous %		
Stove diam. [cm]	Broadleaved %		
Species:			
3. Rockfall indicators			
% of trees impacted	Height of rockfall impacts on trees (m)	Mean =	
% of trees with fresh, deposited rocks in polygon		Max =	
Remarks / Remarques / Bemerkungen			

Figure 3.4.34 Fiche de relevé de terrain pour utiliser le logiciel Rockyfor

A partir des inventaires de nos 25 placettes de références et de nos travaux d'inventaires forestiers à partir du LIDAR, nous avons spatialisé à l'échelle du versant les données relatives aux types de peuplement et aux coefficients de réponse des sols (**figure 3.4.35** et **3.4.36**).

Avec l'ensemble de ces données nous avons réalisé au total 10 000 simulations à partir de la zone de départ et ce pour chacun des scénarios. Les projectiles ont un volume qui varie de 1.5 à 2 m³, conformément à ceux observés sur le terrain.

La première simulation a été réalisée pour le scénario à terrain nu. Sans tenir compte de l'action actuelle des ouvrages de protection présents, pour ce scénario 328 blocs arrivent sur la voie ferrée. Cela représente 3.28% des blocs simulés. La **figure 3.4.37** présente les résultats de ces simulations. Il est intéressant de noter que la majorité des blocs s'arrête au niveau des échelles de perroquets. En tenant compte de l'action de ces ouvrages, on obtient 21 blocs qui arrivent sur la voie ferrée dans la zone non actuellement protégée par des ouvrages, soit 0.2% des blocs. Ceci est confirmé par nos relevés de terrain. En effet, ces ouvrages piègent bien des blocs. Ces résultats mettent bien en évidence le rôle de la résolution et de la précision du MNT sur les résultats de simulation trajectographique.

La deuxième simulation a été réalisée pour le scénario terrain actuel. Pour la même population de projectiles et là aussi sans tenir compte de l'action des ouvrages de protection présents, 131 blocs atteignent la voie ferrée. Cela représente une probabilité d'atteinte de 1.31%. En tenant compte de l'action des ouvrages présents, la zone non protégée est atteinte par 1 bloc soit une probabilité d'atteinte de 1/10 000 soit 0.01%. Avec notre utilitaire Rockfor^{NET} et pour le profil correspondant à la zone de la voie SNCF non actuellement protégée par des ouvrages de génie civil nous obtenons un Aléa Résiduel Probable de 1%. Un ARP de 1% signifie que la probabilité d'atteinte d'une zone par un projectile est comprise entre 0 et 1%. Ce chiffre est donc en adéquation avec celui obtenue avec Rockyfor. Le **tableau 3.4.4** présente les valeurs des paramètres du profil utilisé pour ce calcul.

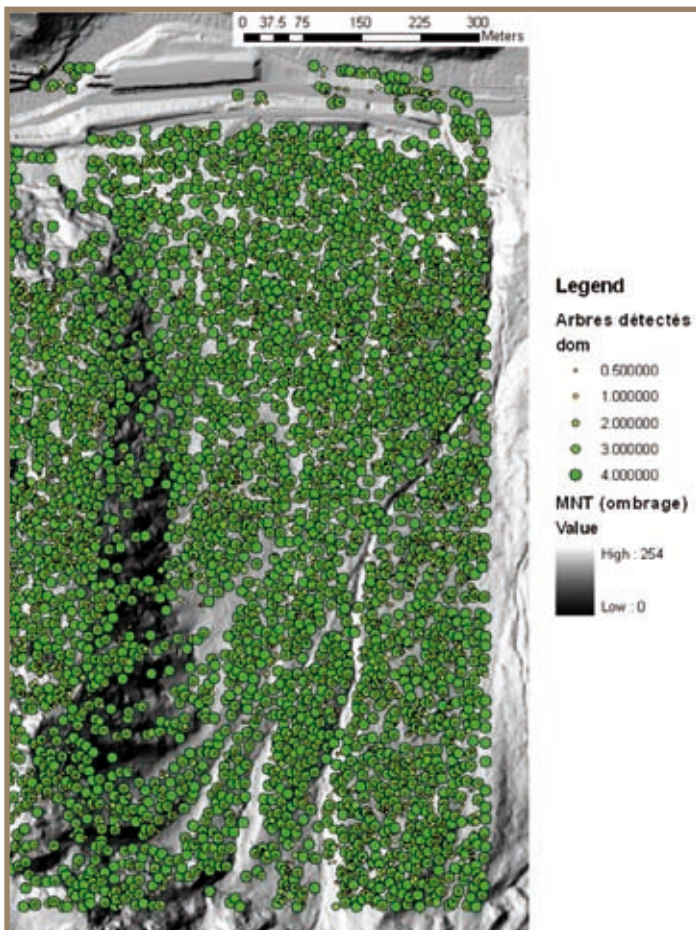


Figure 3.4.35 Cartographie des arbres présents sur le versant à partir des données LIDAR

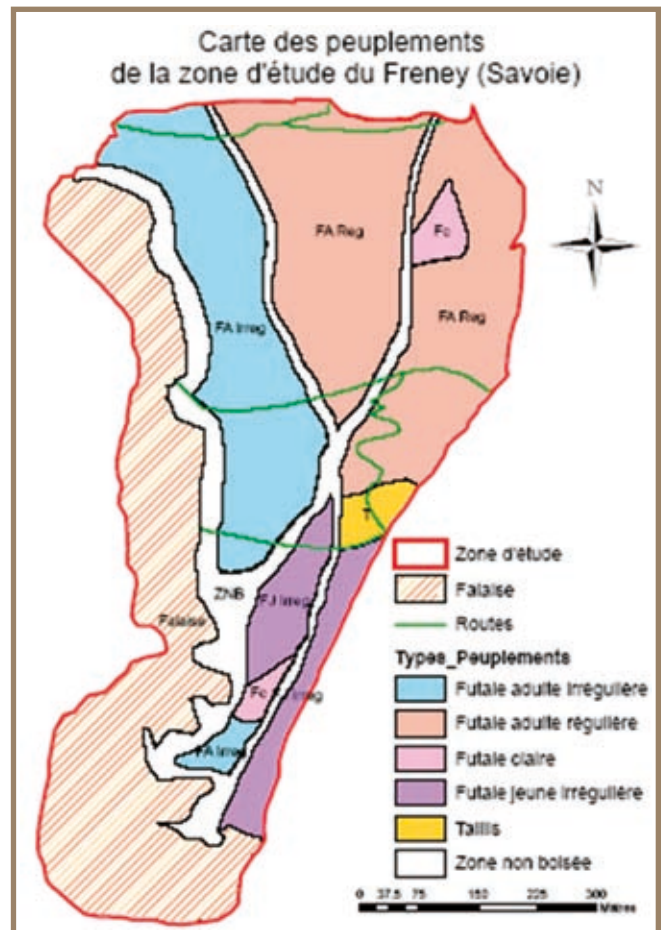
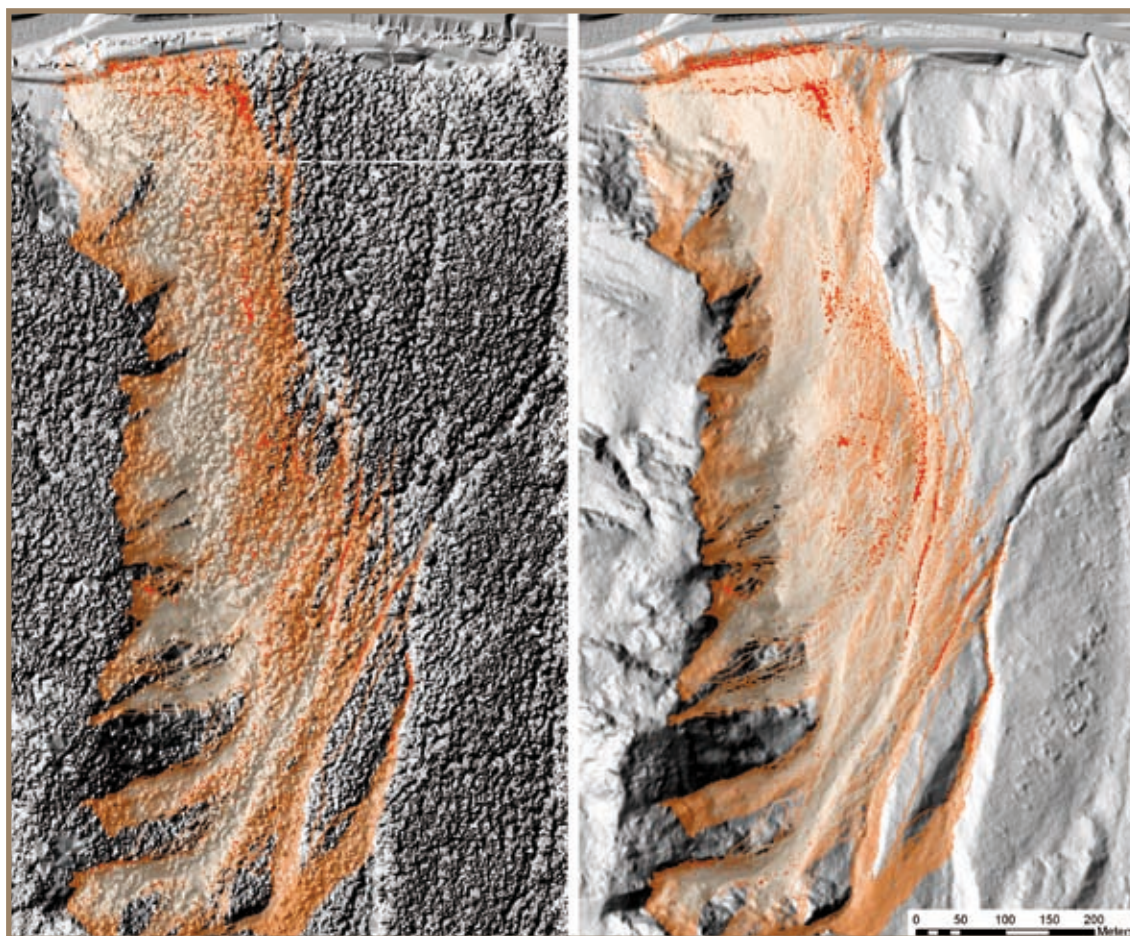


Figure 3.4.36 Cartographie des types de peuplements présents sur le site à partir des données LIDAR et des inventaires de terrain

Figure 3.4.37 Résultats des travaux de simulation avec le logiciel Rockyfor pour le scénario à terrain nu et le scénario à terrain actuel (prise en compte de la végétation). Les points rouges correspondent aux points d'arrêts des projectiles. L'échelle colorimétrique variant du jaune au rouge, représente l'énergie de passage maximale par cellule de calcul



L'énergie maximale simulée à 20 m avant d'arrivée sur la voie SNCF est de 3 000 kJ pour le scénario à terrain nu et de 150 kJ pour le scénario terrain actuel. La forêt est donc en mesure d'écrêter l'énergie cinétique de 2 850 kJ soit une réduction de 95%.

De l'analyse de la **figure 3.4.37**, il ressort que la forêt présente sur ce site est donc en mesure d'écrêter le phénomène de 60% $[(328-131)/328]$ en nombre de blocs arrivant sur la voie SNCF et sans tenir compte de l'action des échelles de perroquet présentes sur le site. Si on raisonne pour la zone actuellement non protégées par ces ouvrages on obtient un écrêtement de 95%.

Au regard de ces résultats, les 14 hectares de peuplements forestiers présents sur ce versant d'étude ont donc un fort rôle de protection et il est impératif de les entretenir.

De plus, la présence des peuplements forestiers augmente l'efficacité de ces ouvrages de protection en

Tableau 3.4.4 Valeurs des paramètres utilisés pour le calcul de l'ARP avec Rockyfor^{NET}

Localisation	Versant du Freney (F)	
Caractéristiques du site	Hauteur de chute (m)	50
	Pente (°)	35
	Distance d'entrée en forêt (m)	50
Paramètres forestiers	Longueur de la zone boisée (m)	1 000
	Densité (ha-1)	330
	G (m ² ha-1)	26.5
	DHP (cm)	32
	Composition	<i>Abies alba</i> 35% <i>Fagus syl.</i> 35% <i>Picea abies</i> 35%
Description des projectiles	Diam. Moyen (m)	1
	Nature et forme	Micaschiste, rectangulaire
ARP	ARP obs. (%)	Donnée non disponible
	ARP calc. Rockyfor ^{NET} (%)	1

limitant l'énergie des projectiles et leur nombre. En effet, on observe un fort dépôt des projectiles sur la moitié supérieure du versant. Ceci est confirmé par nos relevés de terrain.

En reprenant la méthode d'estimation de la valeur économique de la forêt en tant qu'ouvrage de protection pour les 300 m de secteur actuellement non protégés par des ouvrages, on obtient:

Pour le coût de remplacement, et en considérant qu'il faut implanter 300 m linéaires de filets pare pierre à 1 500 euros du mètre linéaire, et en tenant compte du fait qu'il n'y aucun revenu forestier, on obtient:

$$C_{\text{rempl}} = (\text{Coût}_{\text{implantation}} + \text{Coût}_{\text{entretien}})_{\text{Mesures de remplacement}} - (\text{Coût}_{\text{entretien}} - \text{Revenus})_{\text{Forêt en l'état actuel}}$$

$$C_{\text{rempl}} = [(1\ 500 \cdot 300) + 30\ 000] - [(1\ 000 \cdot 10 \cdot 14) - 0]$$

$$C_{\text{rempl}} = (480\ 000) - (140\ 000)$$

$$C_{\text{rempl}} = (340\ 000) \text{ Euros pour 14 hectares soit } 24\ 285 \text{ Euros/ha}$$

Pour le coût d'évitement, en considérant qu'un arrêt d'une heure pour un TGV coûte 90 000 Euros de frais d'indemnisation (sans dégâts corporels et matériels), ce scénario est plausible compte tenu du projet de ligne TGV Lyon-Turin, on obtient avec la fréquence actuellement observée est d'une coupure de la voie par 10 ans (à cause d'un projectile rocheux):

$$C_{\text{evi}} = (\text{Coût}_{\text{réparation potentiel}} - \text{Coût}_{\text{réparation actuel}}) - (\text{Coût}_{\text{entretien}} - \text{Revenus})_{\text{ouvrages de protection présents}}$$

$$C_{\text{evi}} = (90\ 000 \cdot 21) - ((1\ 000 \cdot 10 \cdot 14) - (0))$$

$$C_{\text{evi}} = (1\ 890\ 000) - (140\ 000)$$

$$C_{\text{evi}} = (1\ 750\ 000) \text{ Euros pour 14 hectares soit } 125\ 000 \text{ Euros/ha}$$

3.4.7 Conclusions

Au regard des résultats des travaux que nous venons de présenter, il s'avère:

- qu'il confirme à la fois, la pertinence de nos concepts d'analyses des données LIDAR, et les gammes de précision des données LIDAR extraites citées dans la littérature scientifique à ce sujet;
- que notre méthode de traitement des données LIDAR permet de caractériser en moyenne 73% du matériel ligneux présent sur un site et ce en terme de densité et de surface terrière. En ce qui concerne la hauteur moyenne l'erreur est de seulement 6,07%. Si on fait abstraction des peuplements taillis ces chiffres deviennent: 79% pour la densité et la surface terrière et 0,60% pour la hauteur;
- que les MNT que nous avons générés à partir des données LIDAR sont plus robustes et fiables que ceux commercialisés par l'IGN (pas de 25 et de 50 m). Les MNT obtenus par traitement des données LIDAR permettent de rendre compte fidèlement du relief (emprise et décaissement des chemins, de la voirie, thalweg masqués par la canopée). Les premiers travaux de simulations trajectographiques sur le site test de Maurienne confirment cet état de fait;
- que notre méthodologie d'utilisation d'un outil de simulation trajectographique en 3D est actuellement le seul moyen valide et efficace pour caractériser et quantifier du rôle de protection des peuplements forestiers. En effet, elle permet à la fois de cartographier la zone d'emprise du risque de chutes de pierres et de quantifier le rôle de protection offert par la forêt en termes de part d'écrêtage des paramètres cinématiques et du nombre de blocs atteignant les enjeux;
- que les ARP calculés avec nos deux outils de simulations Rockyfor et Rockfor^{NET} sont en adéquation. Les deux approches développées pour chacun de ces outils, bien que différentes permettent d'obtenir les mêmes résultats. Rockfor^{NET} ayant été validé à partir de cas passés, nous pouvons donc en conclure que l'estimation de l'ARP pour ce secteur d'étude est réaliste. De plus, cela confirme la robustesse de notre outil de simulation en 3 dimensions;
- que l'estimation des coûts de remplacement et d'évitement est une démarche qu'il faut généraliser si on veut valoriser à sa juste valeur la protection offerte par la forêt. Le calcul du coût d'évitement semble le plus probant car il permet de tenir compte du risque résiduel et donc de caractériser en l'état actuel du niveau de risque l'apport de la forêt.

Remerciements

Cet ouvrage est issu de plusieurs études convergentes:

- Utilisation d'un modèle de capacité de dissipation d'énergie d'un arbre pour apprécier le rôle de protection d'un peuplement forestier. Initiée par le Ministère français de l'Agriculture et de la Pêche et réalisée par le Cemagref.
- Evaluation de l'efficacité des méthodes de gestion biologique (forêts et taillis) contre les chutes de bloc. Initié par le Ministère français de l'Environnement et du Développement Durable et réalisée par le Cemagref.
- Projet de développement Utilisation du Laser-scan aérien pour optimiser l'utilisation des modèles de trajectographies de chutes de blocs et intégrer la végétation forestière. Initié par le Ministère français de l'Environnement et du Développement Durable et réalisée par le Cemagref.

Les auteurs de cet ouvrage remercient tous les organismes qui ont participé au financement de ce projet.

CONCLUSIONI CONCLUSIONS

4



Conclusioni e sviluppi futuri
Conclusions et perspectives

4.1 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Carlo Troisi¹, Frédéric Berger²

¹Arpa Piemonte, ²Cemagref Grenoble

Il progetto PROVIALP ha affrontato la problematica delle valutazioni speditive da pericolosità (o suscettività) collegata ai fenomeni di caduta massi lungo le reti viarie in ambiente alpino affrontando tali problematiche sia sotto l'aspetto geologico e strutturale (aspetti sviluppati essenzialmente da Arpa Piemonte) che dal punto di vista della protezione offerta dalla foresta (aspetti sviluppati essenzialmente dal Cemagref).

I metodi proposti possono essere di grande utilità per i tecnici degli enti gestori che si trovino a dover valutare, in tempi brevi e senza forti investimenti economici, le condizioni generali di pericolosità o suscettibilità da caduta massi lungo estesi tratti di rete viaria, al fine di identificare i settori ove sia poi opportuna un'analisi di dettaglio.

Le problematiche oggetto del progetto sono diffuse e sentite lungo l'intero arco alpino, ove i fenomeni di caduta massi rappresentano il principale pericolo di natura geologica alle quali viene sottoposta una rete viaria sempre più fitta e densa di traffico. A riprova di quanto il problema sia risentito e condiviso notiamo come i comparti tecnici di varie amministrazioni pubbliche dell'arco alpino abbiano sviluppato sistemi di valutazione speditiva dei rischi geologici lungo le reti viarie. Ancorché diversi dal PROVIALP dal punto di vista dell'approccio tecnico-scientifico tali metodi rispondono comunque ad una comune e sentita esigenza. Si segnalano in particolare:

- il progetto ARGAL, sviluppato dall'università di Nizza (F; <http://curare.unice.fr>) ed applicato sulla valle della Tinée, (Alpi Occidentali);
- il metodo sviluppato dal BRGM francese ed applicato sulla valle della Roya (Alpi Occidentali; www.brgm.fr);
- Il metodo MATTEROCK LIGHT, sviluppato dal CREALP (CH) ed applicato in Svizzera (www.crealp.ch).

Nell'ambito della nuova programmazione Alcotra 2007-2013 e previsto un progetto avente come partner amministrazioni ed istituti francesi, italiani ed elvetici e denominato MASSA (*Medium And Small Size rock fall hazard Assessment*). Nell'ambito di tale progetto si prevede di effettuare un confronto critico tra il PROVIALP ed i metodi di cui sopra; di armonizzare i metodi e di effettuare una proposta di contenuti minimi per studi consimili; che serva da guida operativa per gli enti gestori delle reti stradali. Tale azione di armonizzazione e di sviluppo di metodi condivisi è obiettivo precipuo, oltretutto di tutti i programmi Interreg, della Convenzione alpina, firmata il 7 novembre del 1991 da tutti i paesi dell'arco alpino, ed avente come obiettivo la salvaguardia dell'ecosistema naturale delle Alpi e la promozione dello sviluppo sostenibile in quest'area, tutelando gli interessi economici e

4.1 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Carlo Troisi¹, Frédéric Berger²

¹Arpa Piemonte, ²Cemagref Grenoble

L'objectif principal du PROVIALP a été de proposer une méthodologie d'évaluation rapide du danger (ou vulnérabilité) occasionnés par les phénomènes de chutes de blocs rocheux le long des voies de communications alpines. Il a abordé ce problème autant du point de vue des aspects géologique et structural (points développés essentiellement par l'Agence Régionale de Prévention et d'Environnement du Piémont) que du point de vue du rôle de protection des forêts et de l'ingénierie écologique (aspects principalement développés par le Cemagref).

Les méthodes proposées et présentées dans cet ouvrage, seront d'une grande utilité pour les responsables techniques des services et organismes en charge de la prévention de ce risque naturel. Elles offrent l'avantage d'une mise en œuvre facile et d'une estimation rapide à moindre coût des conditions générales de dangerosité et de probabilité de chutes de blocs sur un réseau routier. Elles permettent aussi d'identifier les zones où des analyses complémentaires plus approfondies sont nécessaires.

L'augmentation de la fréquentation des réseaux routiers alpins et la densification du trafic qui en résulte font que les problématiques traitées par ce projet sont de plus en plus fréquentes et importantes à l'échelle de la totalité des territoires alpins concernés par ce risque géologique. Ainsi ce problème est très largement perçu et partagé par les différents services techniques italiens et français. Les services italiens ont développé des systèmes "expéditifs" d'évaluation des risques géologiques le long des réseaux routiers des Alpes italiennes. Bien que différentes, tant du point de vue technique que scientifique, de la méthodologie proposée par le consortium du projet PROVIALP d'autres méthodes d'évaluation existent et répondent aussi à ce besoin commun et ce avec les mêmes niveaux d'exigences. Il convient de citer en particulier:

- le projet ARGAL, développé par l'Université de Nice (F; <http://curare.unice.fr>) et appliquée à la vallée de la Tinée (Alpes Occidentales);
- la méthode élaborée par le BRGM français et mise en œuvre à l'échelle de la vallée de la Roya (Alpes Occidentales; www.brgm.fr);
- la méthode MATTEROCK LIGHT, développé par le CREALP (CH) et utilisée en Suisse (www.crealp.ch).

Cette coexistence de méthodes fait que dans le cadre du prochain appel d'offre de la nouvelle programmation Alcotra 2007-2013, un consortium franco-italien-helvétique va proposer le projet MASSA (*Medium And Small Size rock fall hazard*

culturali delle popolazioni residenti dei Paesi aderenti.

In tale contesto, i risultati del progetto PROVIALP fanno parte integrante di quel pacchetto di strumenti e metodi dei quali i paesi aderenti alla convenzione alpina hanno deciso di dotarsi per raggiungere gli obiettivi della stessa.

Questo progetto ha altresì permesso di costruire, tra Francia ed Italia, un partenariato efficace, operativo, integrato e stabile nel quadro della protezione duratura della qualità della vita nei confronti dei rischi geologici. A tal proposito Arpa Piemonte ed il Cemagref di Grenoble ringraziano tutti gli attori che a vario titolo, economico, tecnico e scientifico, hanno permesso la realizzazione e lo sviluppo del progetto stesso nonché la diffusione dei risultati.

Assessment = Evaluation des risques de chutes de rochers de Petite et Moyenne Taille). Les objectifs généraux de ce projet sont de réaliser une comparaison critique (opération de benchmarking) entre la méthode PROVIALP et les méthodes mentionnées ci-dessus; d'harmoniser les méthodes et de proposer un cahier des charges type pour la réalisation de ce type d'expertise. Ce dernier document servira de guide opérationnel pour les gestionnaires des réseaux routiers. Cette action d'harmonisation et de développement de méthodes communes sont les principaux objectifs partagés par tous les programmes Interreg, ainsi que par la Convention alpine. Cette Convention, signée le 7 novembre 1991 par tous les pays de l'arc alpin, a pour cadre d'action la sauvegarde des écosystèmes naturels, la promotion du développement durable des Alpes, la protection des intérêts économiques et culturels des populations qui y habitent et des pays adhérents.

Dans ce contexte, les résultats du projet PROVIALP font partis à part entière des outils et moyens dont les pays adhérents à la convention alpine ont décidé de se doter pour atteindre ses objectifs. Ce projet a aussi permis de construire entre la France et l'Italie un partenariat efficace, opérationnel, complémentaire et pérenne dans le cadre de la protection durable de la qualité de la vie contre les risques géologiques. Le consortium de ce projet tient à ce titre à remercier l'ensemble des partenaires financiers, techniques et scientifiques qui ont permis la réalisation de ce projet et la diffusion de ces résultats.

Bibliografia/Bibliographie

A

- AA.VV., 1996. *Rischi Generati da Grandi Movimenti Franosi. Studio comparato di 4 siti nelle Alpi franco-italiane. Testo di raccomandazioni.* Regione Piemonte & Université J. Fourier (eds.), Programma Interreg I, Italia-Francia, "L'Artistica Savigliano", 1998, pp. 207.
- ACOSTA E., AGLIARDI F., CROSTA G.B., RÌOS ARAGÜES S., 2003. *Regional rockfall hazard assessment in the Benasque Valley (Central Pyrenees) using a 3D numerical approach.* In: *Mediterranean Storms*, edited by: Jansà, A. and Romero, R., Proc. 4th EGS Plinius Conference, Mallorca, Spain.
- AGLIARDI F., CROSTA G.B., 2003. *High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, pp. 455-471.
- AGNOLETTI M., 2002. *Ecological balance and socio-economic development: the attempt to establish a productive forest ecosystem in Southern Europe.* Socio-economic and Forest Ecosystem change in Europe (19th – 20th Century). News of Forest History, Vienna, Austria.
- ALESTALO J., 1971. *Dendrochronological interpretation of geomorphic processes.* Fennia 105, pp. 1-139.
- ALEXANDER D., 2004. *Vulnerability to landslides*, in GLADE T., ANDERSON M., CROZIER M.J. [eds.], *Landslide Hazard and Risk.* John Wiley & Sons, Ltd., Ch. 5, pp. 175-198.
- ALLODI A., CASTELLI M., 2007. *Toppling Stones: analisi probabilistica all'equilibrio limite della stabilità per ribaltamento di un blocco prismatico, Manuale d'uso.* Politecnico di Torino – DISTR.
- AMATRUDA G., BONNARD C., CASTELLI M., FORLATI F., GIACOMELLI L., MORELLI M., PARO L., PIANA F., PIRULLI M., POLINO R., PRAT P., RAMASCO M., SCAVIA C., BELLARDONE G., CAMPUS S., DURVILLE J-L., POISEL R., ROTH W., TENTSCHERT E.H., 2004. *Chapter 3. A key approach: the IMIRILAND project method*, in BONNARD C., FORLATI F., SCAVIA C. (EDS.), *Identification and mitigation of large landslide in Europe. Advances in risk assessment, IMIRILAND PROJECT*, European Commission – Fifth Framework Programme Rotterdam, Balkema, ISBN 90 5809 598 3, pp. 13-43.
- AMOUDRY J.P., 2002. *Sénat - Rapport d'information n° 15 (2002-2003).* 9 octobre 2002.
- ARPA PIEMONTE, 2003. *Messa a punto di una metodologia per la determinazione della pericolosità dovuta ai crolli in roccia.* Rapporto interno.
- ARPA PIEMONTE, 2004. *Il Progetto IFFI in Piemonte: inventario dei fenomeni franosi in Italia.* Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche.
- ARPA PIEMONTE, 2005. *Dalla valutazione alla previsione dei rischi naturali.* Centro Regionale per le Ricerche Geologiche e Territoriali.
- AZIMI, C. DESVARREUX P., GIRAUD A., MARTIN-COCHER J., 1982. *Méthode de calcul de la dynamique des chutes de blocs - Application à l'étude du versant de La Pale (Vercors).* Bulletin de Liaison de Laboratoire des Ponts et Chaussées, n°122, pp. 93-102.
- AZZONI A., A BARBERA G., ZANINETTI A., 1995. *Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 32, pp. 709-724.

B

- BAGGIO P., FIORASO G., GIARDINO M., 1997. *La raccolta e l'organizzazione dei dati nel rilevamento geologico dei fenomeni gravitativi.* C.N.R. – Cs Geodinamica delle Catene Collisionali, Torino, Mem. Int. 97/1.
- BARLA G., SCAVIA C., VAI L., 1988. *Pendii naturali e fronti di scavo.* Proc. 2° ciclo di Conferenze di Meccanica ed Ingegneria delle Rocce, MIR88, Pendii naturali e fronti di scavo. G. Barla (ed.), cap. 12.
- BARLA M., CASTELLI M., 2006. *Metodi di analisi di stabilità dei versanti.* Proc. 11° ciclo di conferenze di Meccanica ed Ingegneria delle rocce, MIR 2006, Instabilità di versante: Interazioni con le infrastrutture, i centri abitati e l'ambiente. G. Barla, M. Barla (eds), cap. 3, pp. 63-84.
- BERGER F., 2004. *Réalisation d'un test d'étalonnage des modèles de trajectographie en utilisant des données provenant d'expérimentations grandeur nature.* Rapport de synthèse, Cemagref / Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 86 pp.
- Berger F., Lievois J., 1998. *Détermination de zones d'interventions forestières prioritaires et création des zones vertes dans les plans de prévention des risques: un exemple de transfert chercheur-praticien.* Ingénieries EAT, special issue "Risques naturels", pp. 97-104.
- BERGER F., DORREN L.K.A., 2007. *Principles of the tool Rockfor^{NET} for quantifying the rockfall hazard below a protection forest.* Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 158(6), pp. 157-165.
- BESSON L., 1996. *Les Risques Naturels en Montagne.* artès-publialp, 437 pp.
- BIGOT C., 2006. *Regard critique sur une forêt à fonction de protection contre les chutes de blocs - Retour d'expérience à St. Martin le Vinoux (Isère).* MSC thesis Cemagref / IGA-UJF, unpublished report, Grenoble, 78 pp.
- BISCHOFF N., 1987. *Sylviculture en montagne, guide pour la création et le traitement des forêts de montagne.* Office central fédéral des imprimés et du matériel 3000 Berne.
- BISHOP A.W., 1955. *The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes.* Geotechnique, vol. 5, pp. 7-17.
- BOND W.J., MIDGLEY J.J., 2001. *Ecology of sprouting in woody plants: the persistence niche.* Trends in Ecology & Evolution 16, pp. 45-51.
- BONNARD C., FORLATI F., SCAVIA C. (eds.), 2004. *Identification and mitigation of large landslide in Europe. Advances in risk assessment.* IMIRILAND PROJECT, European Commission – Fifth Framework Programme Rotterdam, Balkema, ISBN 90 5809 598 3, 317 pp.
- BORGHI A., CADOPPI P., PORRO A., SACCHI R., 1985. *Osservazioni geologiche nella Val Germanasca e nella media Val Chisone (Alpi Cozie).* Boll. Museo Regionale di Scienze Naturali, Torino Vol 3 (2), pp. 369-380.
- BORGHI A., SANDRONE S., 1990. *Structural and metamorphic constrains to the evolution of the NW sector of the Dora Maira Massif (Western Alps).* Mem. Scienze Geol., It., 45, pp. 135-141.
- BOZZOLO D., PAMINI R., 1986. *Simulation of Rockfalls down a Valley Side.* Acta Mechanica, vol. 63, pp. 113-130.
- BOZZOLO D., PAMINI R., HUTTER K., 1988. *Rockfall analysis - a mathematical model and its test with field data.* Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, 1, pp. 555-563.

Bibliografia/Bibliographie

BROILLI L., 1974. *Ein Felssturz in Großversuch*. Rock Mech., Suppl. 3, pp. 69-78.

BROWN P.M., SHEPPERD D., MATA S.A., MCCLAIN D.L., 1998. *Longevity of wind thrown logs in a subalpine forest of central Colorado*. Can. J. For. Res. 28, pp. 932-936.

BUNCE C.M., CRUDEN D.M., MORGENSTERN N.R., 1997. *Assessment of the hazard from rock fall on a highway*. Can. Geotech. J., V. 34, pp. 344-356.

C

CAMPY M., MACAIRE J.J., 1976. *Géologie des formations superficielles: géodynamique, faciès, utilisation*. Paris, Masson, 1976, 433 pp., ISBN 2-225-81426-0.

CAMPUS S., PARO L., 2005. *1.1 Previsione, pericolosità e rischio legati ai fenomeni naturali*, in Arpa Piemonte, 2005, *Dalla valutazione alla previsione dei rischi naturali*. ISBN 88-7479-082-1, pp. 10-12.

CAMPUS S., PARO L., 2007. *1.1 Forecasting, Hazard, and Risks Related to Natural Phenomena*, in Campus S., Barbero S., Bovo S., Forlati F. (eds.), *Evaluation and Prevention of Natural Risks*. Rotterdam, Balkema, Taylor & Francis Group, London, UK, ISBN 978-0-415-41386-2, pp. 3-8.

CANCELLI A., CROSTA G.B., 1993. *Rockfall hazard and risk mapping*. Proceedings 7th International Conference and Field Workshop on Landslides. In: Novosad, Wagner (eds.), Czech-Slovak Republics, Balkema, pp. 69-76.

CANCELLI A., CROSTA G.B., 1999. *Previsione e prevenzione per frane da crollo: descrizione del fenomeno e analisi del rischio*. Atti Convegno GEAM su previsione e prevenzione di movimenti franosi rapidi, Trento, 17-19 Giugno 1999.

CAPELLO C.F., 1963. *Le morfologie crionivali (perigiacciali) nelle Alpi Graie Meridionali italiane*. Pubblicazioni dell'Istituto di Geografia Alpina, Volume 30 - 1963, studi sulle morfologie crionivali (n. 1), UNIVERSITA DI TORINO, pp. 93 + 28 tavole f.t.

CARRARA A., GUZZETTI F., CARDINALI M., REICHENBACH P., 1999. *Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard*. Natural Hazards, vol. 20, pp. 117-135.

CARRARO F., 1992. *Serbatoio di Combanera, Relazione Geologica*. Allegato tecnico al progetto per l'impianto di Combanera per l'integrazione dell'approvvigionamento potabile di Torino e dell'area metropolitana, Azienda Acquedotto Municipale di Torino, 70 pp.

CARTA GEOLOGICA D'ITALIA ALLA SCALA 1:50.000 - Foglio n°153 "Bardonecchia" e relative note illustrative.

CARTA GEOLOGICA D'ITALIA ALLA SCALA 1:100.000 - Fogli n°41 "Gran paradiso", 42 "Ivrea", 55 "Susa", 56 "Torino" e 66 "Cesana" e relative note illustrative.

CASTI J.L., 1998. *Would-Be Worlds: How Simulation is Changing the Frontiers of Science*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 256 pp.

CHATAIN M., PAYANY M., 1994. *La végétalisation, la végétation, outil d'aménagement; guide technique*. Centre de la Sécurité et des Techniques Routières du SETRA et Direction Nature et Paysage du ministère de l'Environnement, 111 pp.

CHAU K. T., WONG R.H.C., WU J.J., 2002. *Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 39, pp. 69-77.

CHEN H., HARMON M.E., SEXTON J., FASTH B., 2002. *Fine root decomposition and N dynamics in coniferous forests of the Pacific Northwest*. U.S.A. Can. J. For. Res. 32, pp. 320-331.

CIAN P., GECHELE G., PATRUCCO M., 1984. *Studio teorico sperimentale sulla ventilazione nella miniera di talco di Fontane*. Boll. Ass. Min. Subalpina, v. 21, 498 pp., Milano.

CNR (CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE), 1990. *Structural model of Italy, scale 1:500,000, sheet 1*. Progetto Finalizzato Geodinamica, Firenze, Italy.

CNR IRPI, PROVINCIA DI TORINO, 1999a. *Valutazione del rischio di crollo dei massi incombenti sulla strada provinciale n.169 per Perrero in località bivio di Rodoretto, Progetto esecutivo impianto di monitoraggio automatico*. Relazione Tecnica.

CNR IRPI, PROVINCIA DI TORINO, 1999b. *Valutazione del rischio di crollo dei massi incombenti sulla strada provinciale n.169 per Perrero in località Pomeifré, Progetto esecutivo impianto di monitoraggio automatico*. Relazione Tecnica.

CNR IRPI, PROVINCIA DI TORINO, 2000. *Messa in sicurezza di tratti di viabilità a rischio di frana lungo la SP 169 della Val Germanasca e lungo la SP. 192 della Val Sangone. Convenzione per la realizzazione di un programma di monitoraggio per il controllo dei dissesti naturali del territorio provinciale*. Relazione Tecnica.

COMPAGNONI R., 1977. *La geologia del Gruppo del Gran Paradiso*. In Fini F., Mattana G., Il Gran Paradiso, Zanichelli, pp. 62-67.

COROMINAS J., MOYA J., 1999. *Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain*. Geomorphology, vol. 30, pp. 79-93

COURDIER J.M., PHILIP R., 1989. *Structure des peuplements et fonctions multiples des forêts de Chamonix*. ENITEF-Cemagref Grenoble, Mémoire de fin d'étude.

COUVREUR S., 1982. *Les forêts de protection contre les risques naturels*. Mémoire de fin d'étude, ENITEF-Cemagref, 89 pp.

CRENN R., 1999. *Influence exercée par la forêt exploitée en taillis sur la dynamique du phénomène de chutes de pierres - analyse rétrospective des traces d'un événement récent sur la commune du Fontanil-Cornillon (38)*. MSc thesis Cemagref / IGA-UJF, unpublished report, Grenoble, 54 pp.

CROSTA G., LOCATELLI C., 1999. *Approccio alla valutazione del rischio da frane per crollo*. In Ombelli [ed.], Studi in onore di Severino Belloni, Glauco Brigati, Genova, pp. 259-286.

CROSTA G., FRATTINI P., STRACCHINI S., 2001. *Valutazione e gestione del rischio da frana, principi e metodi*. A cura di Cazzaniga C. e Sciesa E., Regione Lombardia e Università di Milano Bicocca, Milano, Vol. 1, 82 pp.

CROSTA G.B., AGLIARDI F., 2003. *A methodology for physically-based rockfall hazard assessment*. Natural Hazards and Earth System Sciences, (2003) 3, pp. 407-422.

CROSTA G., AGLIARDI F., 2004. *Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories*. Natural Hazards and Earth System Sciences 4, pp. 583-598.

Bibliografia/Bibliographie

CROSTA G.B., AGLIARDI F., FRATTINI P., IMPOSIMATO S., 2004. *A three-dimensional hybrid numerical model for rockfall simulation*. Geophysical Research Abstracts 6 n. 04502.

CROSTA G.B., FRATTINI P., FUGAZZA F., CALUZZI L., CHEN J., 2005. *Cost-benefit analysis for debris avalanche risk management*. In: *Landslide Risk Management*. Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.), pp. 517-524.

CRUDEN D.M., VARNES D.J., 1996. "Chapter 3: *Landslide Types and Processes*". In: "Landslides: Investigation and Mitigation" (K. Turner & R.L. Schuster, eds.), Transportation Research Board, Washington, D.C.

CUNDALL P., 1971. *A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems*. Symposium on Rock Fracture of the International Society of Rock Mechanics, Nancy, vol. II-8.

D

DAL PIAZ G.V., HUNZIKER J.C., MARTINOTTI G., 1972. *La zona Sesia-Lanzo e l'evoluzione tettonico-metamorfica delle Alpi nordoccidentali interne*. Mem. Soc. Geol. It., 11, pp. 433-460.

DE ANTONIS L., MOLINARI V.M., 2003. *Regione Piemonte, Interventi di sistemazione del territorio con tecniche di Ingegneria Naturalistica*, Regione Piemonte, Torino.

DE BENEDITTIS F., 2007. *Suscettibilità alla caduta massi di vie di comunicazione: il caso della Valle Orco*. Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Edile, I Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Torino.

DE DONATIS M., BRUCIATELLI L., 2006. *MapIT: the GIS software for field mapping with tablet pc*. Computers & Geosciences, 32 (5), pp. 673-680.

DERRUAU M., 1974. *Précis de géomorphologie*. MASSON, 553 pp., ISBN 2-225-81374-4.

DESCOEUDRES F., ZIMMERMANN Th., 1987. *Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls*. 6th International Congress of Rock Mechanics, Montreal, Canada, pp. 337-342.

DICTIONNAIRE FORESTIER MULTILINGUE, 1975.

DICTIONNAIRE DE LA FORESTERIE, 2003. *Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec*.

DI PRISCO C., VECCHIOTTI M., 2006. *A rheological model for the description of boulder impacts on granular strata*. Geotechnique, Vol. n°56, Issue n°7.

DOCHE, O., 1997. *Etude expérimentale de chutes de blocs en forêt*. Cemagref / Institut des Sciences et Techniques de Grenoble (ISTG), Cemagref doc. 97/0898, unpublished report, 130 pp.

DOMAAS P. 1985. *Rekkeviden av steinsprang, Elaborat*. Norges Geotekniske Institutt. Oslo.

DORREN L.K.A., 2003. *A review of Rockfall mechanics and modelling approaches*. Progress in Physical Geography, vol. 27, pp. 69-87.

DORREN L., SEIJMONSBERGEN A., 2003. *Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale*. Geomorphology 56, (1-2), pp. 49-64.

DORREN L.K.A., MAIER B., PUTTERS U.S., SEIJMONSBERGEN A.C., 2004. *Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps*. Geomorphology, 57(3-4), pp. 151-167.

DORREN L.K.A., BERGER F., LE HIR C., MERMIN E., TARDIF P., 2005. *Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests*. For. Ecol. Manage. 215, 1-3, pp. 183-195.

DORREN L.K.A., BERGER F., 2006. *Stem breakage of trees and energy dissipation at rockfall impacts*. Tree Physiol. 26, pp. 63-71.

DORREN L.K.A., BERGER F., PUTTERS U.S., 2006. *Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forest slopes*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 6, pp. 145-153.

DUBOURDIEU J., 1982. *Les forêts de montagne et leurs fonctions multiples*. Revue Forestière Française, n°5-1982, pp. 32-39.

DUSSAUGE C., GRASSO J.R., HELMSTETTER A., 2003. *Statistical analysis of rockfall volume distributions: implications for rockfall dynamics*. Journal of Geophysical Research, 108, B6, 2286.

E

EINSTEIN H.H., 1988. *Special Lecture: Landslide risk assessment procedure*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslide, July 1988, Lausanne, in BONNARD C. [ed.], *Landslide*. Balkema, Rotterdam, v. 2, pp. 1075-1090.

ELTER F.M., PICCARDO G.B., POLINO R., ZANETTI A., SPAGNOLO G., POGGI E., BALBI P., 2005. *Structural and compositional features of the Mt. Musinè peridotites (Lanzo Massif, Western Alps, Italy)*. Ofioliti, 30 (2), pp. 161-173.

EVANS S.G., HUNGR O., 1993. *The assessment of rock fall hazard at the base of the talus slope*. Canadian Geotechnical J., Vol.30, pp 620-636.

F

FALCETTA J.L., 1985. *Un nouveau modèle de calcul de trajectoires de blocs rocheux*. Revue Française de Géotechnique, vol. 30, pp. 11-17.

FELL, R., HARTFORD, D., 1997. *Landslide risk management*. In: *Landslide risk assessment*, edited by: Cruden, D., and Fell, R., Balkema, Rotterdam, pp. 51-109.

FRANKLIN J.A., SENIOR S.A., 1997. *The Ontario Rockfall rating system*. In: *Engineering Geology and Environment*, Marinos Koukis, Tsiambaos & Stournaras (eds.) Edit. Balkema, Rotterdam, Holanda.

FRATTINI P., CROSTA G., CARRARA A., AGLIARDI F., 2007. *Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches*. Geomorphology. Doi: 10.1016/j.geomorph.2006.10.037.

FRONTIER S., PICHOD-VIALE D., 1990. *Ecosystèmes: structures-fonctionnement-évolution*. Ed. Masson.

G

GAUQUELIN X., 2000. *Sylvicultures, Sylviculteurs*. ONF, 109 pp.

GAUQUELIN X., COURBAUD, B., 2006. *Guide des sylvicultures de montagne*. Cemagref/CRPF Rhône-Alpes/ONF, France, 289 pp.

GDEL -Grand Dictionnaire Larousse, 1983.

Bibliografia/Bibliographie

- GEO & SOFT INTERNATIONAL, 2003. *ISOMAP & ROTOMAP for Windows (3D surface modelling & rockfall analysis), User's guide*. Torino, Italy.
- GERBER W., 1994. *Beurteilung des Prozesses Steinschlag*. Ganzheitliche Gefahrenbeurteilung Unveröffentlichte Kursunterlagen des Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Forstliche Arbeitsgruppe für Naturgefahren (FAN), 20-22.10.1994 Poschiavo.
- GERBER W., 1995. *Auswertung von Feldversuchen*. Unterlagen zum FAN-Kurs der Forstlichen Gruppe Naturgefahren zum Thema Steinchlag, Vitznau, Kap.9.
- GERBER, W., 1998. *Waldwirkung und Steinschlag*. In: Schwitter, R. (Ed.): Dokumentation der 14. Arbeitstagung der Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe mit der FAN 1998, unpublished report, Grafenort / Engelberg, pp. 1-15.
- GIGON A., 1981. *Ökologische Stabilität: typologie und realisierung*. Programme Suisse., Ed. MAB, MAB Inform. n°7, 1981.
- GOMEZ-FERNANDEZ F., 2000. *Application of a GIS algorithm to delimit the areas protected against basic lava flow invasion on Tenerife Island*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 103, pp. 409-423.
- GOODMAN R.E., BRAY J.W., 1976. *Toppling of rock slopes*. Proc. Speciality Conference on Rock Engineering for foundations and slopes, Geotech. Eng. Div. of ASCE, vol. 2, pp. 201-234.
- GRIME J.P., 2001. *Plant Strategies, Vegetation Processes and Ecosystem Properties*. John Wiley & Sons.
- GROTE R., 2002. *Foliage and branch biomass estimation of coniferous and deciduous tree species*. Silva Fennica 36(4), pp.779-788.
- GRUNDER M., 1984. *Ein Beitrag zur Beurteilung von Naturgefahren im Hinblick auf der Erstellung von, mittelmassstaebigen Gefahrenhinweiskarten - mit Beispielen aus dem Berner Oberland und der Landschaft Davos*. Geographica Bernensia 23. Bern.
- GSTEIGER P., 1993. *Steinschlagschutzwald. Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung*. Schweiz. Z. Forstwes. 144, pp. 115-132.
- GUPTA R.P., JOSHI B.C., 1990. *Landslide hazard zoning using the GIS approach - a case study from the Ramganga Catchment, Himalayas*. Eng. Geol. 28, pp. 119-131.
- GUZZETTI F., CARRARA A., CARDINALI M., REICHENBACH P., 1999. *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. Geomorphology, vol. 31, pp. 181-216.
- GUZZETTI F., 2002. *STONE. A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls*. Computers & Geosciences, vol. 28, pp. 1079-1093.
- GUZZETTI F., CROSTA G.B., DETTI R., AGLIARDI F., 2002. *STONE. A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls*. Computers and Geosciences, 28 (9), pp. 1081-1095.
- HANTZ D., VENGEON J.M., DUSSAUGE C., LIRIGM/ISTG U.G., 2001. *Approche historique, géomécanique et probabiliste de l'aléa éboulement rocheux*. XVème Congrès Français de Mécanique, Nancy, 6 pp.
- HARMON M.E., 1982. *Decomposition of standing dead tree in the southern Appalachian mountains*. Oecologia (berl) 52, pp. 214-215.
- HARMON M.E., 1992. *Long term experiments on log decomposition et the H.J. Andrews experimental forest*. Gen.tech.rep. PNW-GTR-280, 28 pp.
- HARMON M.E., KRANKINA O.N., SEXTON J., 2000. *Decomposition vectors: a new approach to estimating woody detritus decomposition dynamics*. Dep. Of for. Sc., Oregon State University, Corvallis, Oregon 97331-7501.
- HARR M.E., 1987. *Reliability-based design in civil engineering*. New York, McGraw-Hill Book Company.
- HEIDENREICH B., 2004. *Small- and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Génie Civil, 231 pp.
- HEIM A., 1932. *Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt Vierteljahrschrift Naturforsch. Gesell. Zürich, 77, 218 pp.*
- HILL D.R.C., 1993. *Analyse orientée objet et modélisation par simulation*. Addison-Wesley, Paris.
- HOEK E., BRAY J.W., 1981. *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, Londra, 3° edizione.
- HOEK P., 1986. *Rockfall: a computer program for predicsting rockfall trajectories*. Unpublished internal notes, Golden Associates, Vancouver.
- HOEK P., 1999. *Putting Numbers to Geology - an Engineer's Viewpoint*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 32, No. 1, pp. 1-19.
- HSÛ K., 1975. *Catastrophic debris stream generated by rockfalls*. Geological Society of America, Bulletin 86. Boulder.
- HUDSON J.A., 1992. *Rock engineering System: Theory & Practise*. Ellis Horwood.
- HUNGR O., EVANS S.G., 1988. *Engineering evaluation of fragmental rock fall hazard in landslide*. Proc. of the 5th Int. Symp. on Landslides, Balkema, Rotterdam, pp. 658-690.
- HUNGR O., EVANS S.G., HAZZARD J., 1999. *Magnitude and frequency of rockfalls and rock slides along the main transportation corridors of south-western British Columbia*. Canadian Geotechnical Journal, 36, pp. 224-238.
- HUNZIKER J.C., 1974. *Rb-Sr and K-Ar age determinations and the Alpine tectonic history of the Western Alps*. Mem. Ist. Geol. Min. Univ. Padova, 31 pp. 1-55.
- HYYPÄ, J. PYYSALO U., HYYPPÄ H., HAGGRÉN H., RUPPERT G., 2000. *Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes*. Forest Ecology and Management, 128(1-2), pp. 109-120.
- HYYPPÄ H., YU X., HYYPPÄ J., KAARTINEN H., KAASALAINEN S., HONKAVAARA E., RÖNNHOLM P. 2005. *Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas*. In: V.G.a.B. C. (Editor), ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005". International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Enschede, the Netherlands, pp. 85-90.
- H**
- INTERREG IIC, 2001. *«Falaises» - Méditerranée Occidentale et Alpes Latines. Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises. Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin*. Tipografia Valdostana - Aosta.
- ISAAKS E.H., SRIVASTAVA, R.M., 1989. *An introduction to applied*

Bibliografia/Bibliographie

Geostatistics. Oxford University Press, New York, 561 pp.

ISRM, 1978. *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 15, pp. 319-368.

ISTITUTO GEOGRAFICO CENTRALE (IGC). *Carta Escursionistica 1:50 000 - Foglio 10 Monte Rosa, Alagna e Macugnaga*. Torino.

IUGS/WGL/CRA [International Union of Geological Sciences, Working Group on Landslide, Committee on Risk Assessment], 1997. *Quantitative risk assessment for slopes and landslides - the state of the art*. In CRUDEN & FELL (eds), *Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment*. Honolulu/Hawaii/USA/19-21 February 1997, Rotterdam, Balkema, pp. 3-12.

J

JABOYEDOFF M., 2003. *The rockslide of Arvel caused by human activity (Villeneuve, Switzerland): Summary, partial reinterpretation and comments of the work of Choffat. Ph. (1929): l'écroulement d'Arvel (Villeneuve) de 1922*. Bull. SVSN 57, 5-28. Quanterra OPEN FILE REPORT - NH-03, 10 pp.

JABOYEDOFF M., LABIOUSE V., 2003. *Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data*. Proc. of the 10th ISRM Congress, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp 575-578.

JABOYEDOFF M., DUDT J.P., LABIOUSE V., 2005. *An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, pp. 621-632.

JAHN J., 1988. *Entwaldung und Steinschlag*. International Congress Interpraevent, Graz. Conf. Proc. Vol. 1, pp. 185-198.

JANBU N., 1954. *Application of composite slide circles for stability analysis*. Proc. European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm, vol. 3, pp. 43-49.

JIAO Y., HUDSON J. A., 1995. *The Fully-Coupled Model for Rock Engineering Systems*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 32.

JONES C.L., HIGGINS J.D., ANDREW R.D., 2000. *Colorado Rockfall Simulation Program Version 4.0*. Colorado Geological Survey, 127 pp.

JORGENSEN S.E., 1990. *Ecosystem Theory, Ecological Buffer Capacity, Uncertainty and Complexity*. Ecological Modelling, vol. 52, pp. 125-133.

JORGENSEN S.E., 1999. *State-of-the-art of ecological modelling with emphasis on development of structural dynamic models*. Ecological Modelling, vol. 120, pp. 75-96.

K

KIENAST J.R., POGNANTE U., 1988. *Chloritoid-bearing assemblages in eclogitized metagabbros of the Lanzo peridotite body (Western Italian Alps)*. Lithos, 21 (1), pp. 1-11.

KIRKBY M.J., STAHAM I., 1975. *Surface stone movement and scree formation*. Journal of Geology, 83, pp. 349-362.

KIRCHSTEIGER C., 1999. *On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 12, pp. 399-419.

KOBAYASHI Y., HARP E.L., KAGAWA T., 1990. *Simulation of Rockfalls triggered*

by earthquakes. Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 23, pp. 1-20.
KODRIK J., KODRIC M., 2002. *Root biomass of beech as a factor influencing the wind tree stability*. Journal of forest science, 48, (12), pp. 549-564.

KRANKINA O.N., HARMON M.E., GRIAZKIN A.V., 1999. *Nutrient stores and dynamics of woody detritus in a boreal forest: modelling potential implications at the stand level*. Can. J. For.Res. 29, pp. 20-32.

L

LABIOUSE V., DESCOEUDRES F., 1999. *Possibilities and Difficulties in predicting Rockfall Trajectories*. Joint Japan-Swiss seminar on Impact Load by Rockfall and Design of Protection Structures, Kanazawa, Japan, pp. 29-36.

LAIHO R., PRESSCOTT C.E., 2004. *Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in northern coniferous forests: a synthesis*. Can. J. For. Res. 34, pp. 763-777.

LAMBE W.T., WHITMAN R.V., 1969. *Soil Mechanics*. John Wiley, New York.

LANIER L., 1986. *Précis de sylviculture*. ENGREF, Nancy, ISBN 2-85710-019-1, 468 pp.

LAROUSSE AGRICOLE, 1981. Paris, Librairie Larousse.

LEFSKY M. A., COHEN W.B., HARDING D.J., PARKER G.G., ACKER S.A., GOWER S.T., 2002. *Lidar remote sensing of aboveground biomass in three biomes*. Global Ecol.Biogeogr., 11, pp. 393-400.

LE GOFF N., OTTORINI J.M., 2001. *Root biomass and biomass increment in a beech stand in north-east France*. Ann.for.Sci.58, pp. 1-13.

LE HIR C. 2005. *Forêt et chutes de blocs: méthodologie de modélisation spatialisée du rôle de protection*. PhD Thesis, Cemagref / Université de Marne-La-Vallée, 195 pp.

LEIBUNDGUT H., 1982. *Europäische Urwälder des Regstufe*. Ed. Haupt, 1982.

NOUVEAU PETIT ROBERT, 1993. *Le nouveau petit Robert - Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*. Paris, Le Robert.

LEPORATI P., MORTARA G., GIARDINO M., 2002. *L'assetto idrogeologico*. In: "Studi propedeutici per il Parco Nazionale del Gran Paradiso", pp. 78-93.

LEROI E., PONTAROLLO F., GASCUEL J-D., GASCUEL M-P, BOUR M., 1996. *Development of a 3-D model for block trajectories, base on synthetic imagery and stress vs. deformation laws*. Landslides, pp. 271-277.

LEUENBERGER F., 1992. *Guida alla realizzazione delle opere temporanee di stabilizzazione e di protezione contro lo scivolamento del manto nevoso*. Davos.

LIED K., 1976. *Rockfall problems in Norway, in Rockfall dynamics and protective works effectiveness*. Pubbl. ISMES, 90.

LIM K., TREITZ P., BALDWIN K., MORRISON I., GREEN J., 2003. *Lidar remote sensing of biophysical properties of tolerant northern hardwood forests*. Canadian Journal of Remote Sensing 29, pp. 648-678.

LOLLINO G., GIARDINO M., ALLASIA P., BALDO M., GIORDAN D., 2004. *Instrumented experimental sites for the control of landslide hazards in mountain environments: the Germanasca and Susa valleys. (northwestern Italy)*. Field Trip Guidebook, 32° IGC Florence 20-28 August 2004, Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 69 (5) from P37 to P54, APAT, Roma.

Bibliografia/Bibliographie

LUDOVICI K.H., ZARNOCH S.J., RICHTER D.D., 2002. *Modeling in situ pine root decomposition using data from a 60 year chronosequence*. Can.J.For. Res. 32, pp. 1675–1684.

LUDOVICI K.H., 2006. *Decomposition and nutrient release from fresh and dried pine roots under two fertilizer regimes*. Can. J. For. Res. 36, pp. 105-111.

M

MAGNUSSEN S., BOUDEWYN P., 1998. *Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators*. Canadian Journal of Forest Research, 28, pp. 1016–1031.

MAJOR J., MARDER F., KIM H.S., 1974. *WINTAM (Wedge along line of intersection analysis including Monte Carlo simulation)*. Mining Research Laboratories, CANMET, Department of Energy, Mines and Resources.

MANTELLI D., 2007. *Suscettibilità alla caduta massi di vie di comunicazione: il caso della Val d'Ala*. Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Torino – DISTR.

MATSON P.A., VITOUSEK P.M., EWEL J.J., MAZZARINO M.J., ROBERTSON G.P., 1987. *Nitrogen transformations following tropical forest felling and burning on a volcanic soil*. Ecology 68, pp. 491–502.

MAYER H., 1980. *Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage*. Gustav Fischer Verlag.

MAYER H., OTT E., 1990. *Gebirgswaldbau-Schutzwaldfelege*. Ed. Gustav Fischer Verlag- Stuttgartart.

MAZZOCCOLA D., HUDSON J.A., 1996. *A comprehensive method of Rock Mass Characterization for Indicating Natural Slope Instability*. Quart. J. Eng. Geol., 29, pp. 37-56.

MAZZOCCOLA D., SCIESA E., 2000. *Implementation and comparison of different methods for rockfall hazard assessment in the Italian Alps*. Proc. 8th Int. Symp. on Landslides, Cardiff, Balkema, Rotterdam, 2, pp. 1035-1040.

MEANS J.E., ACKER S.A., FITT J., RENSLOW M., EMERSON L., HENDRIX C., 2000. *Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66(11), pp. 1367-1371.

MEISSL G., 1998. *Modellierung der Reichweite von Felsstürtszen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum*. Innsbrucker Geographische Studien 28, Innsbruck, 249 pp.

MIZUYAMA T., NARITA H., 1988. *Debris flow control by woods and their impact energy absorptivity*. Proceeding Vol.2 International Congress Interpraevent Graz, Austria, pp. 173-181.

MORELLI M., PARO L., 2005. *2.2 Le grandi frane alpine*, in Arpa Piemonte, 2005, *Dalla valutazione alla previsione dei rischi naturali*. ISBN 88-7479-082-1, pp. 65-77.

MORELLI M., PIANA F., 2006. *Comparison between remote-sensed lineaments and geological structures in intensively cultivated hills (Monferrato and Langhe domains, NW Italy)*. International Journal of Remote Sensing Vol. 27, No. 20, pp. 4471–4493.

MORELLI M., PARO L., 2007. *2.2 The Large Alpine Landslides*, in Campus S., Barbero S., Bovo S., Forlati F. (eds.), *Evaluation and Prevention of Natural Risks*. Rotterdam, Balkema, Taylor & Francis Group, London, UK, ISBN 978-0-415-41386-2, pp. 109-132.

MORGENSTERN N.R., PRICE V.E., 1965. *The analysis of the stability of general slide surfaces*. Geotechnique, vol. 15, pp. 79-93.

MORTIER F., 1990. *Unification of european pattern research*. Compte rendu de l'atelier international de travail, Poznan.

MOSER M., 1986. *Unveröffentlichtes Skriptum zur Ingenieurgeologie II. Böschungen*. Handbewungen Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Univerlangen-Nürnberg.

MOTTA R., BERRETTI R., LINGUA E., PIUSSI P., 2006. *Coarse woody debris, forest structure and regeneration in the Valbona Forest Reserve, Paneveggio, Italian Alps*. Forest Ecology and Management 235, pp. 155-163.

MOURER M., 1999. *Forêts et phénomènes naturels : les peuplements de bas versants face aux chutes de blocs en vallée de la Pique (31)*. Mémoire de fin d'étude, FIF-ENGREF- ONF-RTM, 65 pp.

N

NÆSSET E., 1999. *Decomposition rate constants of Picea abies logs in southeastern Norway*.

NÆSSET E., 2002. *Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data*. Remote Sensing of Environment 80, pp. 88-99.

NÆSSET E., 2004. *Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first Nordic full-scale operational project*. Journal Scandinavian Journal of Forest Research, Volume 19, Number 6/ December 2004, pp. 554-557.

NILSSON M., BRANDTBERG T., HAGNER O., HOLMGREN J., PERSSON A., STEINVAL O., STERNER H., SÖDERMAN U., OLSSON H., 2003. *Laser scanning of forest resources. The Swedish experience*, in *Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*. Umea, Sweden, pp. 43-51.

NICOLAS A., 1966. *Le complexe ophiolites-schistes lustrés entre Dora Maira et Grand Paradis (Alpes Piemontaises)*. Tectonique et métamorphisme, II, 211 pp..

NONODA T., HAYASHI S., KAWABE H., YONEI Y., 2004. *The occurring factors of standing stem breakage*. Proceedings Vol.1 (III) International Congress Interpraevent Trento, Italy, pp. 207-216

O

OBONI F., 2003. *Analisi di rischio e presa di decisioni*. Atti delle conferenze di geotecnica di Torino, XIX ciclo, 4-6 Novembre 2003.

OCCHIENA C., 2007. *Analisi della suscettibilità per caduta massi con riferimento a diverse tipologie di rilievo geomeccanico. Il caso della Valle di Viù (Provincia di Torino)*. Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Torino – DISTR.

OGGERI C., TOSCO P., 2005. *Identificazione del rischio per eventi di caduta massi*. GEAM, Marzo 2005, n°1, pp. 23-32.

Bibliografia/Bibliographie

OLDEMANN R.A.A., 1990. *Element of sylvology*. Ed. Springer-Verlag.

OLSSON H., 2004. *Summary of the scandlaser 2003 workshops and recent developments in Sweden*. International conference "Laserscanners for Forest and Landscape Assessment". International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, Freiburg, Germany, pp. 133-138.

ONOFRI R., CANDIAN C., 1979. *Indagine sui limiti di massiva invasione dei blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976. Considerazioni sulle opere di difesa*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Cluet. Trieste.

P

PANDISCIA G., PIRREDDA P., 1997. *A slope stability map by remote sensing*. Proc. 12th Inter. Conf. and Workshop on Applied Geologic Remote Sensing, Denver, Colorado, II, 1-3.

PARMINTER J.V., 2002. *Coarse Woody Debris decomposition-principles, rates and models*. Prince Georges B.C., pp. 22-24.

PARONUZZI P., SERAFINI W., 2003. *Analisi di stabilità per la valutazione del fattore di sicurezza di blocchi interessati da processi di crollo*. Geologia Tecnica & Ambientale, 4/03.

PELTOLA H., KELLOMÄKI S., VÄISÄNEN H., IKONEN V.P. 1999. *A mechanistic model for assessing risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scot pine*. Norway spruce and birch. Can. J. For. res. 29, pp. 647-661.

PELTOLA H., KELLOMÄKI S., HASSINEN A., GRANANDER M., 2000. *Mechanic stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland*. For. Ecol. Manage. 135, pp. 143-153.

PERELLO P., DELLE PIANE L., PIANA F., MORELLI M., DAMIANO A., VENTURINI G., 2004. *New constrains on late to post-Oligocene deformation history of the Western Alps: data from middle Susa valley and high Maurienne valley*. 32nd International Geological Congress, Firenze 20-28 Agosto 2004.

PERRET S., DOLF F., KIENHOLZ H., 2004. *Rockfalls into forests: Analysis and simulation of rockfall trajectories — considerations with respect to mountainous forests in Switzerland*. Landslides 1, 2, pp. 123-130.

PERRONE G.L., inedito. *Evoluzione tettonica post-metamorfica e recente del Distretto sismico del Pinerolese (Alpi Occidentali)*. Dottorato di ricerca in Scienze della Terra XVII ciclo. Università di Torino.

PERSSON A., SÖDERMAN U., TÖPEL J., AHLBERG S., 2005. *Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data*. in: V.G.a.B. C. (Editor), ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Laser scanning 2005. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Enschede, the Netherlands, pp. 103-108.

PFEIFFER T. J., BOWEN T.D., 1989. *Computer simulation of rockfall*. Bulletin of the Association of Engineering Geologists. vol. XXVI, pp. 135-146

PIERSON L.A., DAVIS S.A., VAN VICKLE, 1990. *The Rockfall Hazard Rating System: Implementation manual*. Technical Report FHWA-OR-EG-90-01, FHWA, U.S. Department of Transportation.

PEROTTO A., SALINO C., POGNANTE U., GENOVESE G., GOSSO G., 1983. *Assetto geologico-strutturale della falda piemontese nel settore dell'alta Valle di Viù (Alpi Occidentali)*. Mem. Soc. Geol. It., 26, pp. 479-483.

PINCIAROLI M.B., 1989. *Ricostruzione dell'evoluzione quaternaria delle*

basse valli di Lanzo. Tesi di Laurea inedita in Scienze Geologiche, Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra, Relatori Prof F. Carraro e Dott.ssa M.G. Forno, A.A. 1988-1989.

PISANI G., 2005. *Un metodo di tipo probabilistico per lo studio degli scivolamenti planari in roccia*. Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Torino – DISTR.

PITEAU D.R., CLAYTON R., 1976. *Computer Rockfall model; proceedings of the meeting on rockfall dynamics and protective works effectiveness*. ISMES publication, pp. 123-125.

POGNANTE U., 1980. *Preliminary data on the Piemonte ophiolite nappe in lower Val Susa - Val Chisone area, Italian Western Alps*. Ofioliti, 5, pp. 221-240.

POPESCU S.C., WYNNE R.H., SCRIVANI J.A., 2004. *Fusion of small-footprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia*. U.S.A., Forest Science 50(4) 2004, pp. 551-565.

POULIOT J., 1999. *Définition d'un cadre géosémantique pour le couplage des modèles prévisionnels de comportement et des SIG-Application pour les écosystèmes forestiers*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, département de génie rural, 167 pp.

PRINA E., BONNARD C., VUILLET L., 2004. *Vulnerability and risk assessment of a mountain road crossing landslides*. Rivista Italiana di Geotecnica, n°2, pp. 67-79.

PROVINCIA DI TORINO, CNR IRPI, 2001. *Studio della pianificazione per la messa in sicurezza della viabilità provinciale a difesa dalle catastrofi idrogeologiche*.

PROVINCIA DI TORINO, CNR, UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TORINO, 2004. *I geositi nel paesaggio della Provincia di Torino*. Litografia Geda per la Provincia di Torino.

R

RAETZO H., LATELTIN O., BOLLINGER D., TRIPET J.P., 2002. *Hazard assessment in Switzerland – Code of practice for mass movements*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 61, pp. 263-268.

RANGER J., GELHAYE D., 2001. *Belowground biomass and nutrient content in the 47 year old Douglas fir plantation*. Ann. For. Sci. 58, pp. 423-430.

REGIONE AUTONOMA VALLE D'AOSTA - REGIONE PIEMONTE, 2006. *Selvicoltura nelle foreste di protezione esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e valle d'Aosta*. Compagnia delle Foreste, Arezzo, pp. 224.

REGIONE LOMBARDIA, 2000. *Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio da frana in Regione Lombardia*. Bollettino Ufficiale Regione Lombardia n° 51, Ed. Speciale Dicembre 2000.

REGIONE PIEMONTE, 2001. *Prevenzione dei fenomeni di instabilità delle pareti rocciose. Confronto dei metodi di studio dei crolli nell'arco alpino*. Programma INTERREG IIC – Faleaises.

RENAUD J.P., RUPÉ C., CHAUVIN C., MERMIN E., LECLERC D., FAY J., 1994. *Les forêts résineuses à fonction de protection dans les Alpes du nord françaises*. Cemagref Grenoble - 1994, 157 pp.

Bibliografia/Bibliographie

REUTEBUCH S.E., MCGAUGHEY R.J., CARSON W.W., ANDERSEN H.E., 2003. *Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy*. Canadian Journal of Remote Sensing, 29(5), pp. 527-535.

RICHARDSON A.D., ZU DOHNA H., 2003. *Predicting root biomass from branching patterns of Douglas fir root systems*. OIKOS 100, pp. 96-104.

RIG - Rivista Italiana di Geotecnica, 1995. *Glossario Internazionale per le frane*. n. 2/95.

ROCHET L., 1987. *Application des modeles numeriques de propagation a l'etude des eboulements rocheux*. Bull. Liason LPC, 150/151, pp. 84-95.

RITCHIE A.M., 1963. *Evaluation of rockfall and its control*. Highway research, vol. 17, pp. 13-25.

ROCCA M., 2007. *Analisi di suscettibilità per caduta massi lungo la viabilità alpina finalizzata alla studio di pericolosità e rischio: il caso dell'Alta Valle Tanaro*. Tesi di Laurea Specialistica. Politecnico di Torino – DISTR.

ROCHET L., 1987. *Application des modèles numériques de propagation à l'étude des éboulements rocheux*. Bulletin de Liaison de Laboratoire des Ponts et Chaussées, vol. 150/151, pp. 84-95.

ROMANA M., 1993. *A geomechanics classification for slope: Slope Mass Rating*, in *Comprehensive Rock Engineering*, Ed. J. Hudson. Pergamon Vol. 3, pp. 575-600.

S

SANDRONE R., BORGHINI A., CAROSSO G., MORSETTI C., TAGLIANO C., ZUCCHETTI S., 1990. *Geometry of the talc deposit of Fontane and structural evolution of the area (Dora-Maira Massif)*. Boll. Ass. Min. Subalpina, 27, n. 1-2, pp. 45-62.

SANDRONE R., CADOPPI P., SACCHI R., VIALON P., 1993. *The Dora Maira Massif*, in Von Raumenr J.F. & Neubauer F. (EDS), *Pre-Mesozoic Geology in the Alps*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, pp. 317-325.

SCAVIA C., CASTELLI M., 2003. *Messa a punto di una metodologia per la determinazione della pericolosità dovuta a crolli in roccia*. Relazione finale delle attività previste nell'ambito della Convenzione con Arpa Piemonte - Rep. N. 7768. Rapporto interno, ARPA Piemonte.

SCESI L., SENO S., GIOIA U., MAZZUCHELLI A., 2002. *Analisi critica del metodo RHRS utilizzato per la valutazione della pericolosità dei versanti in roccia ubicati lungo le vie di comunicazione*. Geologia Tecnica & Ambientale 3/2002.

SCHWITTER R., 1998. *Zusammenfassung und Schlussfolgerungen*, in Schwitter, R. (Ed.), *Dokumentation der 14. Arbeitstagung der Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe mit der FAN 1998*, unpublished report, Grafenort / Engelberg, pp. 1-5.

SHIKADA M., MURAMATU N., KUSAKA T., GOTO S., 1995. *Extraction of landslide areas using satellite remote sensing and GIS technology*. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS apos, 95, Quantitative Remote Sensing for Science and Application International Volume 1, Issue, 10-14 Jul1995, vol.1, pp. 377-379.

SHRODER J-F., 1980. *Dendrogeomorphology: review and new techniques of tree-ring dating*. Progress in Physical Geography 2, pp. 161-188.

SOCIETÀ GEOLOGICA ITALIANA (a cura della), 1991. *Guide geologiche regionali - Alpi Liguri*. BE-MA editrice, 296 pp.

SPANG R.M., SÖNSER T., 1995. *Optimized rockfall protection by "ROCKFALL"*, in Fuji, T. (Ed.), *Proceedings of the 8th International Conference on Rock Mechanics*, 25-30 September 1995, Tokyo, Japan, pp. 1233-1242.

STALPERS J.A., 1978. *Identification of wood-inhabiting Aphyllophorales in pure culture*. Centraalbureau Voor Schimmelcultures, Baarn.

STEVENS W., 1998. *RockFall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls*. M.A.Sc. Thesis. Department of Civil Engineering, University of Toronto. Ontario, Canada, 105 pp.

STOFFEL M., 2006. *A review of studies dealing with tree rings and rockfall activity: The role of dendrogeomorphology in natural hazard research*. Natural Hazards 39, pp. 51-70.

STOFFEL M., WEHRLI A., KÜHNE R., DORREN L.K.A., PERRET S., KIENHOLZ H., 2006. *Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model*. For. Ecol. Manage. 225, pp. 113-222.

STOKES A., SALIN F., KOKUTSE A.D., BERTHIER S., JEANNIN H., MOCHAN S., DORREN L.K.A., KOKUTSE N., GHANI M.A., FOURCAUD T., 2005. *Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps*. Plant and Soil, 278 (1-2), pp. 107-117.

STONE J.N., MACKINNON A., PARMINTER J.V., LERTZMAN K.P., 1998. *Coarse woody debris decomposition over 65 years on southern Vancouver Island*. Can. J. For.Res. 28, pp. 788-793.

STORAUNET K.O., ROLSTAD J., 2002. *Time since death and fall of Norway spruce logs in old-growth and selectively cut boreal forest*. Can. J. For. Res. 32, pp. 1801-1812.

T

TAYLOR D.W., 1937. *Stability of Earth Slopes*. J. Boston Soc. Civil Engineers, vol. 24.

TERZAGHI K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley, New York.

TERZIANO A., 2006. *Il metodo dello "shadow angle" per lo studio della suscettibilità da crolli in roccia: un esempio di applicazione in termini probabilistici*. Tesi di Laurea in Ingegneria della Protezione del Territorio, I Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Torino.

THERIAULT M., CLARAMUNT C. 1999. *La représentation du temps et des processus dans les SIG : une nécessité pour la recherche interdisciplinaire*. Revue Internationale de Géomatique 9(1), pp. 67-99.

TOPPE R., 1987. *Terrain models - A tool for natural hazard mapping*, in Salm, B. and Gubler, H., (Eds.), *Avalanche formation, movement and effects*, IAHS Publication nr. 162, pp. 629-638.

TRENTO DISGAGGI, AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI TORINO, 1988. *Strada Provinciale N. 169 della Val Germanasca tratto dal Km 10.00 al Km 17.00*. Relazione Tecnica.

U

UNESCO-WP/WLI - Working Party on World Landslide Inventory, 1993. *Multilingual Glossary for Landslides*. Canadian Geot. Society.

Bibliografia/Bibliographie

V

VANOSI M., 1965. *Le unità stratigrafico-strutturali fra il Pizzo d'Ormea e il Monte Galero (Alpi Marittime)*. Atti Ist. Geol. Univ. Pavia, 16, pp. 114-184.

VANOSI M., 1972. *Rilevamento geologico e analisi strutturale delle dorsali del M. Mongioie e del M. Cimone (Brianzonese ligure)*. Atti Ist. Geol. Univ. Pavia, 23, pp. 29-71.

VANOSI M., 1974. *Analisi stratigrafico-strutturale della zona tra le alte valli del Casotto e dell'Ellero (Alpi Marittime)*. Atti Ist. Geol. Univ. Pavia, 24, pp. 38-73.

VAN WESTERN C.J., 1993. *Remote sensing and geographic information system for geologic hazard mitigation*. ITC Journal, 4, pp. 34-38.

VARNES D.J., IAEG COMMISSION ON LANDSLIDES AND OTHER MASS MOVEMENTS, 1984. *The principles and practice of landslide hazard zonation*. UNESCO Press, Paris.

VENALAINEN M., HARJU A.M., KAINULAINEN P., VIITANEN H., NIKULAINEN H., 2002. *Variation in the decay resistance and its relationship with other wood characteristics in old Scots pines*. Ann.For.Sci.60, pp. 409-417.

VENTURINI G., 1995. *Geology, geochemistry and geochronology of the inner central Sesia zone (Western Alps - Italy)*. Mémoire du Géologie, Lausanne, n 25, pp. 148.

W

WAGNER M.J., 1994. *ERS-1 lends a hand to European flood clean-up*. Earth Observation Magazine, 4, pp. 34-38.

WALLISER B., 1977. *Systèmes et modèles: Introduction critique à l'analyse de systèmes*. Edition du seuil, Paris.

WASSER B., FREHNER M., 1996. *Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion*. Wegleitung. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.

WIECZOREK G.F., 1984. *Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction*. Bull. Assoc. Eng. Geol. 21 (3), pp. 337-342.

WIECZOREK G.F., MORRISSEY M.M., IOVINE G., GODT J., 1998. *Rock-fall hazards in the Yosemite Valley*. U.S. Geological Survey Open-file Report 98-467.

WULDER M.A., 2003. *The current status of laser scanning of forests in Canada and Australia*, in E.N. J. Hyypä, H. Olsson, T. granqvist Pahlén and H. Reese (Editor), *ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser scanning of Forests*, Umea, Sweden, pp. 21-33

Y

YATSKOV M., HARMON M.E., KRANKINA O.N., 2003. *A chronosequence of wood decomposition in the boreal forests of Russia*. Can. J. For.Res. 33, pp. 1211-1226.

Z

ZACCAGNA D., 1937. *I fogli 91 (Boves) e 92 (Albenga) della Carta geologica d'Italia al 1/100.000*. Mem. Acc. Lunig. Sc. "G.Capellini" di La Spezia, 18, 3-25.

ZELLER E., 1982. *Stabilitätspfelge im Gebirgswald*, Zeitschrift Bündnerwald. n°35-6-1982, pp. 197-202.

ZELLER E., 1994. *Le traitement stabilisateur dans la forêt de montagne, projet "Sylviculture en montagne II"*. Rapport n°4A-1994, Ed. Sarganserländer Druck A.G.

ZIELONKA T., 2006. *Quantity and decay stages of coarse woody debris in old-growth subalpine spruce forests of the western Carpathians, Poland*. Can. J. For. Res. 36, pp. 2014-2622.

ZINGGELER A., 1990. *Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern: Modellierung der relevanten Teilprozesse*. MSc. Thesis, University of Bern, unpublished report, Bern, 116 pp.

