

III. MÉTHODES D'ÉTUDE DES INSTABILITÉS DE FALAISE

III.1. MÉTHODOLOGIES D'ÉTUDE

III.1.1. Introduction

Les méthodes décrites dans le présent ouvrage, ont toutes pour objectif d'améliorer la prévention des instabilités de falaise. Elles ne traitent pas toutes forcément de tous les éléments qui mènent au calcul du risque. Elles s'attachent donc à l'étude d'une ou de plusieurs étapes qui mènent à l'évaluation des risques, telles que la délimitation des zones de départ des chutes de blocs, leurs probabilités de rupture, la définition des périmètres et des probabilités d'atteinte.

III.1.2. Problématiques

Les méthodes d'études dédiées à la *prévention des instabilités de falaise* sont dépendantes des moyens mis en œuvre qui, eux, varient en fonction des caractéristiques de la région étudiée et de la législation en vigueur. Par caractéristiques, on entend notamment la morphologie et le type d'aménagements existants et projetés de la région étudiée et de la législation en vigueur. Tous ces paramètres influent sur la façon de résoudre les problèmes posés. La complexité des objets étudiés favorise la variété des solutions apportées. De plus, chaque méthode s'attache à des objectifs légèrement différents selon l'origine de ses promoteurs. Il en résulte que chaque méthode recèle des simplifications gênantes pour leur comparaisons. Il s'agit donc, dans un premier temps, de savoir si toutes les méthodes répondent aux mêmes questions, puis de décomposer les démarches en rubriques suffisamment fines pour pouvoir les comparer entre elles.

Les méthodes de *prévention des instabilités de falaise* ont généralement été développées pour les besoins de l'aménagement du territoire. Par conséquent, elles répondent généralement à la question :

En un lieu donné, pour des bâtiments ou voies de communication fréquentées, le risque¹ est-il acceptable?

Une réponse positive à cette question signifierait que les dommages que pourraient subir des bâtiments ou des voies de communication sont acceptables pour une période donnée. L'acceptation

¹ Rappelons que le risque est défini comme la probabilité de perte en vies humaines, blessés, dommages aux biens et à l'activité économique causée par un phénomène naturel particulier au cours d'une période donnée (modifié d'après IDNDR, 1992).

III. METODI DI STUDIO DELLE INSTABILITÀ IN PARETE

III.1. METODOLOGIE DI STUDIO

III.1.1. Introduzione

I metodi descritti nel presente lavoro hanno tutti l'obiettivo di migliorare la prevenzione delle instabilità in parete. Tali metodi non si occupano obbligatoriamente di tutti gli elementi che portano al calcolo del rischio. Si riferiscono dunque allo studio di una o di più tappe che conducono alla valutazione dei rischi quali la delimitazione delle zone di distacco, le probabilità di rottura, la definizione dei perimetri e delle pericolosità.

III.1.2. Problematiche

I metodi di studio dedicati alla *prevenzione delle instabilità in parete* variano in funzione delle caratteristiche delle regioni in oggetto e della legislazione in vigore. Per caratteristiche si intendono la morfologia e il tipo di pianificazione territoriale esistente e prevista. Tutti questi parametri influiscono sul modo di risolvere i problemi posti. La complessità dei fenomeni studiati favorisce la varietà delle soluzioni adottate. Inoltre, ogni metodo mira a degli obiettivi leggermente differenti a seconda dell'origine dei suoi promotori. Ne consegue che ogni metodo contiene delle semplificazioni che ostacolano il loro confronto. Si tratta dunque, in un primo momento, di verificare se tutti i metodi rispondono alle stesse domande, poi di decomporre i procedimenti in voci sufficientemente dettagliate per poterle paragonare tra loro.

I metodi di *prevenzione delle instabilità in parete* sono stati generalmente sviluppati per le esigenze di pianificazione territoriale. Di conseguenza rispondono in genere alla seguente domanda:

In un certo luogo, per delle costruzioni o delle vie di comunicazione frequentate, il rischio¹ è accettabile?

Una risposta positiva a questa domanda significherebbe che i danni che potrebbero subire delle costruzioni o delle vie di comunicazione sono accettabili per un periodo definito. L'accettazione del rischio differisce da un Paese all'altro e da una

¹ Ricordiamo che il rischio è definito come probabilità di perdita di vite umane, feriti, danni ai beni ed all'attività economica causate da un fenomeno naturale particolare in un tempo determinato (modificato secondo IDNDR, 1992).

du risque diffère d'un pays à l'autre et d'une zone à l'autre. De plus, cette notion dépend de la fréquence et de l'intensité des événements hydrogéologiques déjà survenus. Il n'est donc pas simple de répondre à cette question. Bien sûr, aucune des méthodes ne pose le problème en ces termes précis, bien que ce soit le moteur principal de la démarche.

On a donc le plus souvent remplacé la notion de risque par des caractéristiques normées d'un danger ou d'un phénomène pour une probabilité d'atteinte "temporelle" (aléa) dont l'échelle reste le plus souvent semi-empirique (Besson, 1996 ; p. 299). Ces notions normatives sont donc tributaires du but poursuivi.

III.1.3. Démarche idéale

De façon idéale, la démarche d'évaluation des risques liés aux instabilités de falaises devrait s'attacher à fournir une information modulaire, homogène quant au niveau de détail.

Tout d'abord, les différentes étapes de l'évaluation doivent être clairement dissociées (Fig. III.1) :

- a) La cartographie et la caractérisation des phénomènes potentiellement dangereux (instabilités et périmètres de propagation) fournissent une **carte de danger**²
- b) La probabilité d'occurrence temporelle d'un danger de caractéristiques définies³ en chaque point du territoire, couplée à la probabilité de propagation de ce phénomène, donne la **carte de probabilité d'atteinte** (ou d'aléa).
- c) Les dommages que peut produire un danger en un lieu donné sur un objet ou une personne fournissent la **carte de risque** associée à un danger.

Il est important que les étapes a) et b) se fassent sans préjuger des éléments à risque : la démarche reste ainsi objective et homogène sur l'ensemble d'un territoire.

Ce même souci d'homogénéité doit idéalement s'appliquer au niveau du détail de l'information. Ce niveau devient forcément élevé puisqu'on s'attache alors à caractériser le danger lui-même et non le fait qu'il y ait ou non des habitations dessous.

Ainsi les cartes de danger et de probabilité

zona all'altra. Inoltre, questa nozione dipende dalla frequenza e dall'intensità degli eventi idrogeologici progressivi. Non è dunque facile rispondere a questa domanda. Naturalmente, nessuno dei metodi pone il problema in questi termini precisi, anche se si tratta del motore principale del procedimento.

La nozione di rischio è stata dunque spesso sostituita da norme dettate da un determinato pericolo o fenomeno per una data pericolosità "temporanea" (aléa) la cui scala resta quasi sempre semi-empirica (Besson, 1996; p. 299). Queste nozioni normative dipendono quindi dallo scopo prefissato.

III.1.3. Procedimento ideale

In modo ideale, il procedimento di valutazione dei rischi legati alle instabilità in parete dovrebbe provvedere a fornire un'informazione modulare, omogenea per quanto concerne il livello di dettaglio.

Innanzitutto, le diverse tappe di valutazione devono essere chiaramente dissociate (Fig. III.1) :

- a) La cartografia e la caratterizzazione dei fenomeni potenzialmente pericolosi (instabilità e perimetri di propagazione) forniscono una **carta di pericolo**².
- b) La probabilità di accadimento temporale di un pericolo dalle caratteristiche definite³ in ogni punto del territorio, accoppiato alla probabilità di propagazione di questo fenomeno, definisce la **carta di pericolosità** (o aléa).
- c) I danni che può produrre un pericolo in un luogo definito su un oggetto o una persona forniscono la **carta di rischio** associata ad un pericolo.

È importante che le tappe a) e b) si perseguano senza tener conto degli elementi a rischio: il procedimento resta così oggettivo e omogeneo sull'insieme del territorio.

Questa stessa preoccupazione di garantire l'omogeneità deve applicarsi idealmente al livello di dettaglio dell'informazione. Questo livello diventa obbligatoriamente elevato poiché ci si preoccupa di definire il pericolo in se stesso e non il fatto

² Se reporter au glossaire pour fixer le sens des termes utilisés.

³ Un danger peut posséder plusieurs cartes de probabilités d'atteinte. Par exemple une instabilité de falaise peut engendrer des chutes de bloc fréquentes, mais aussi présenter un danger élevé de mobilisation en plus grande masse, qui ne présenteront pas le même périmètre d'atteinte et pas les mêmes intensités.

² Riportarsi al glossario per fissare il significato dei termini usati

³ Un pericolo può avere più carte di pericolosità. Ad esempio, un'instabilità in parete può generare delle cadute di blocchi ricorrenti ma anche presentare un pericolo elevato di mobilitazione di volumi maggiori, che non avranno lo stesso perimetro di raggiungimento né le stesse intensità.

d'atteinte couvrent de façon identique les zones à forts enjeux et les zones inhabitées. Les cartes ainsi établies restent alors valables quelle que soit l'évolution de l'aménagement du territoire. L'information " brute " est utilisable pour divers types d'études ultérieures, d'autant que ce système modulaire de " couches d'information " permet d'accéder directement aux données nécessaires.

Les problèmes pratiques liés à l'aménagement du territoire étant variés et complexes, il n'est pas aisé d'appliquer ce schéma idéal. Pourtant, dans le but de structurer l'information, la méthode qui consiste à représenter les informations en couches paraît une bonne solution : elle favorise la transmission de l'information dans des formats clairs, ainsi qu'une réutilisation plus facile de certaines informations pour des études ultérieures.

che vi siano o meno delle abitazioni sottostanti.

Così, le carte di pericolo e di pericolosità coprono in uguale modo le zone ad alto valore esposto (a forte rischio) e le zone inabitate. Le carte così definite sono dunque valide qualunque sia l'evoluzione dell'assetto urbanistico del territorio. L'informazione di base è utilizzabile per diversi tipi di studi ulteriori, in quanto questo sistema modulare a "strati informativi" permette di accedere direttamente ai dati necessari.

Poiché i problemi pratici legati alla gestione del territorio sono vari e complessi, non è facile applicare questo schema ideale. Tuttavia, allo scopo di strutturare l'informazione, il metodo che consiste nel presentare le informazioni a strati sembrerebbe una buona soluzione: permette la trasmissione dell'informazione in termini chiari così come un riutilizzo più facile di alcune informazioni per studi ulteriori.

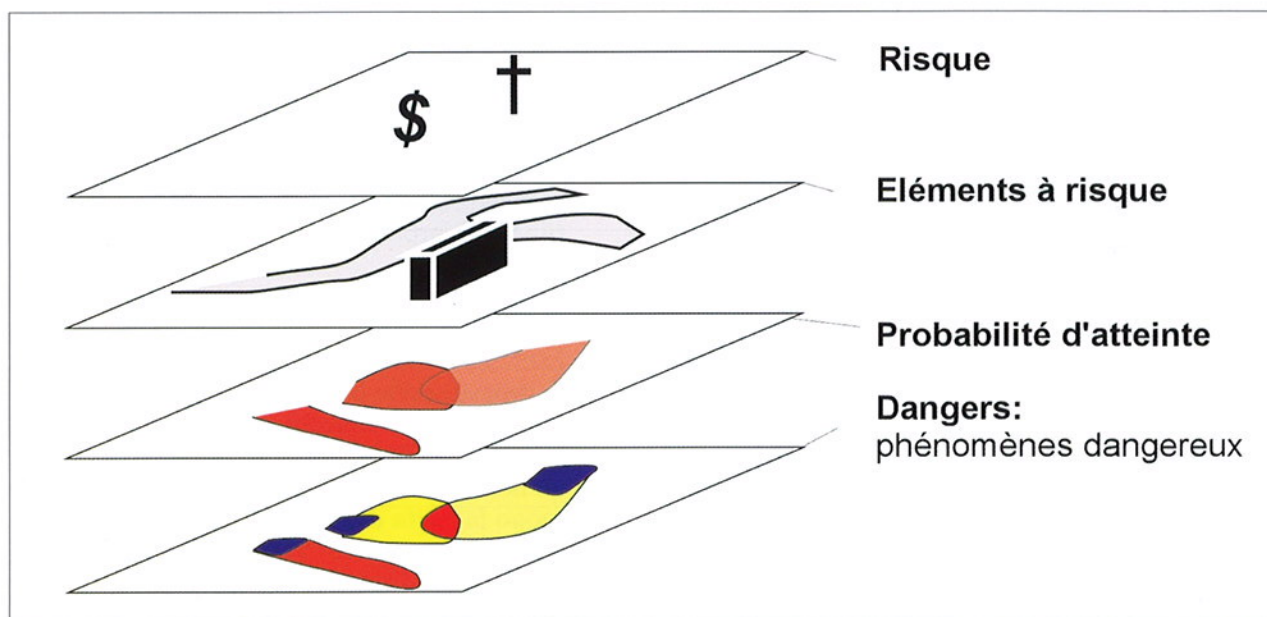


Fig. III.1. : Représentation schématique des trois niveaux d'informations principales.

Rappresentazione schematica dei tre livelli di informazioni principali.

III.1.4. Contingences pratiques

Dans la réalité, un certain nombre de contingences pratiques font obstacle à cet idéal d'homogénéité et de séquençage des études d'évaluation des risques.

En particulier l'aspect financier des études impose d'adapter le type de méthode aux objets à étudier et aux objectifs fixés (Fig. III.2).

Par exemple, le comptage des blocs tombés sur une chaussée permet facilement de calculer

III.1.4. Contingenze pratiche

Nella realtà un certo numero di contingenze pratiche ostacolano questo ideale di omogeneità e di sequenzialità degli studi di valutazione dei rischi.

In particolare, l'aspetto finanziario degli studi impone di adattare il tipo di metodo agli oggetti da studiare e agli obiettivi fissati (Fig. III.2.)

Ad esempio, il conto dei blocchi caduti su una strada permette facilmente di calcolare la probabi-

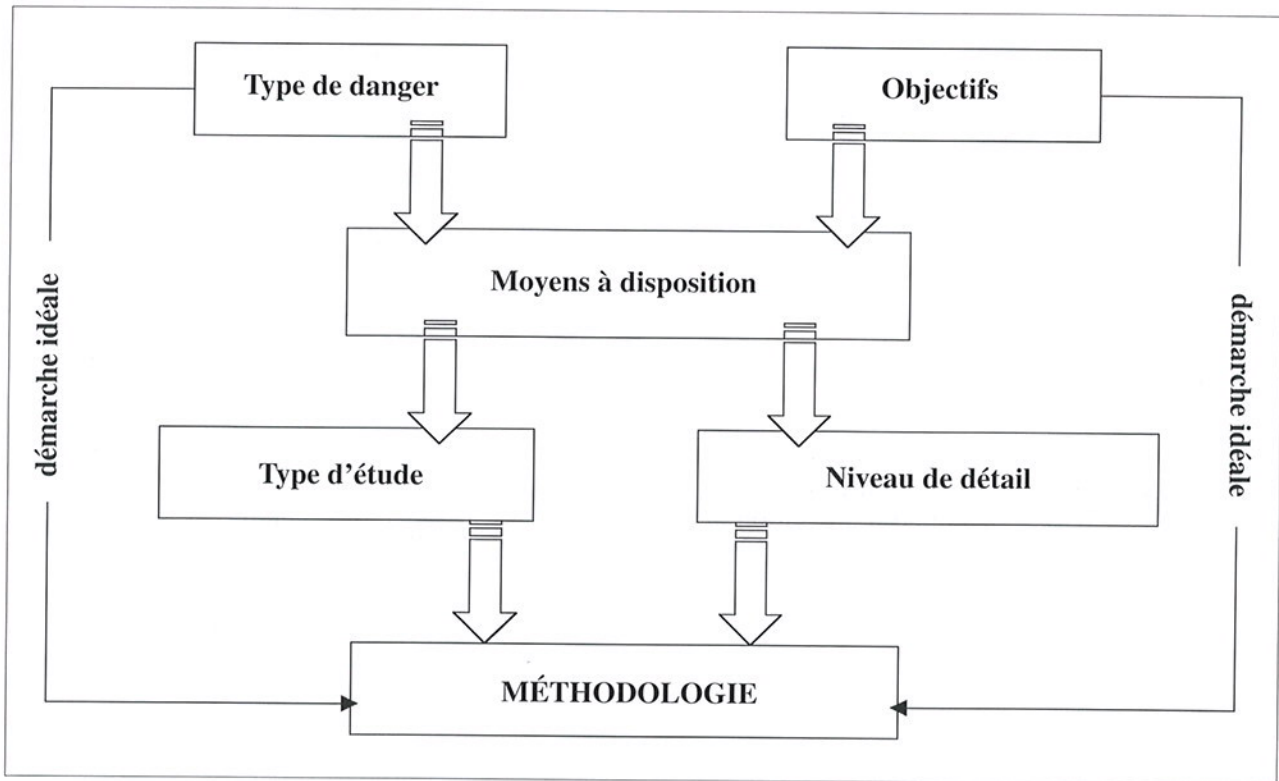


Fig. III.2. : Facteurs influençant les études d'évaluation des risques liés aux instabilités rocheuses.
Fattori che influenzano gli studi di valutazione dei rischi legati alle instabilità dei pendii in roccia.

des fréquences d'occurrence. En les couplant à des données sur le trafic des véhicules sur la portion de route considérée, on accède à une évaluation immédiate du risque, chiffrée (Hoek, 1999).

Par contre, une évaluation complète, dans une commune, des risques liés aux instabilités de falaise va déboucher rapidement, faute de temps et de moyens, sur un classement en "rouge" de la plupart des zones situées au pied de barres rocheuses. Les instabilités elles-mêmes sont rarement caractérisées, mais des normes sont appliquées pour qualifier le risque en fonction du bâti existant et à venir (ceci n'est qu'un constat, en aucun cas un jugement critique).

Il paraît donc clair que, sur ce thème, les méthodes d'études adoptées doivent être particulièrement souples en regard des diverses contingences de la figure III.2 (aspect financier, objectifs, caractéristiques de la zone d'étude, etc.). Ceci explique la diversité des méthodes développées, qui répondent chacune à des exigences particulières : les niveaux d'étude (danger, probabilité d'atteinte, risque) sont le plus souvent imbriqués, le niveau de détail de l'information peut varier à l'intérieur d'une même étude.

lité d'accadimento. Associandole a dati relativi al traffico dei veicoli sul tratto di strada considerata, si arriva ad una valutazione immediata e calcolata del rischio (Hoek, 1999).

Per contro, una valutazione completa, per quanto riguarda un comune, dei rischi legati alle instabilità in parete conduce rapidamente, per mancanza di tempo e di mezzi, ad una classificazione in "rosso" della maggior parte delle zone situate ai piedi delle pareti rocciose. Le instabilità in se stesse sono raramente studiate, ma esistono norme per qualificare il rischio in funzione delle costruzioni esistenti e future (ciò non è che una constatazione, in nessun caso un giudizio critico).

Sembra dunque chiaro che, su questo tema, i metodi di studio adottati debbano essere particolarmente flessibili in considerazione delle diverse contingenze della figura III.2 (aspetto finanziario, obiettivi, caratteristiche della zona oggetto di studio, etc.). Ciò spiega la diversità dei metodi sviluppati che rispondono ciascuno a esigenze particolari: i livelli di studio (pericolo, pericolosità, rischio) sono spesso connessi tra loro, il livello di dettaglio dell'informazione può variare all'interno di uno stesso studio.

III.1.5. *Caractéristiques générales des méthodes du paragraphe III. 2*

Chaque méthode présentée évalue un certain nombre de paramètres contrôlant la stabilité des pentes. Toutes font en général référence à la qualité de la roche, aux discontinuités, aux venues d'eau et à différents paramètres extérieurs qui influencent la stabilité (Tab. III.1).

Méthodes globales

Les deux méthodes italiennes RES et RHAP vont jusqu'à l'évaluation du risque et elles permettent de couvrir des surfaces de quelques km² à des coûts raisonnables. La première présente un avantage, elle autorise un choix de paramètres à prendre en considération, et par conséquent elle peut être adaptée en fonction des budgets.

La démarche suivie par le CETE va de la qualification des instabilités à l'évaluation implicite du risque. Il s'agit d'une démarche détaillée opérationnelle se basant sur une revue qualitative des paramètres déterminants pour la stabilité.

La méthode MATTEROCK va de la probabilité de rupture des instabilités, par une analyse structurale détaillée, à la définition des périmètres d'atteinte. L'accent est mis sur la détection et la caractérisation des instabilités. Elle nécessite un travail de terrain détaillé. Son degré de détail fait que cette méthode s'applique plutôt à des zones où les objets menacés représentent une valeur importante.

Méthodes spécifiques

Deux approches de détail sont dédiées à la caractérisation des instabilités.

- Celle du LIRIGM explicite la manière dont le croisement de données géomécaniques (grille de caractérisation) et de données historiques d'éboulements permet d'estimer des probabilités de rupture en un point donné en fonction du temps ;
- L'approche probabiliste développée au *Polytechnico de Turin* évalue théoriquement la probabilité de rupture de ponts rocheux. Cette méthode ne formalise pas la détection des instabilités.

La troisième approche de détail se concentre sur l'étude de la probabilité de propagation, par les méthodes dites de *trajectographies*. Ces approches sont fondamentales dans la définition des périmètres d'atteinte. Leur développement et amélioration est l'une des clés des méthodes futures d'évaluation des risques.

Quelques autres approches sont signalées pour comparaison.

III.1.5. *Caratteristiche generali dei metodi del paragrafo III.2*

Ogni metodo presentato valuta un certo numero di parametri che controllano la stabilità dei versanti. Tutti si riferiscono in generale alla qualità dell'ammasso roccioso, alle discontinuità, alle venute d'acqua ed a differenti parametri esterni che influenzano la stabilità (Tab. III.1).

Metodi globali

I due metodi italiani RES e RHAP permettono di arrivare fino alla valutazione del rischio e consentono di fornire una copertura su superfici di alcuni km² a dei costi ragionevoli. Il primo presenta un vantaggio poiché permette la scelta dei parametri da prendere in considerazione, e conseguentemente, può essere adattata in funzione dei budget.

Il metodo seguito dal CETE va dall'individuazione delle instabilità alla valutazione implicita del rischio. Si tratta di un metodo dettagliato di intervento che si basa su un riesame qualitativo dei parametri determinanti per la stabilità.

Il metodo MATTEROCK va dalla probabilità di rottura delle instabilità, attraverso un'analisi strutturale dettagliata, alla definizione delle aree di invasione. L'accento è messo sulla localizzazione e la tipicità delle instabilità. Implica un lavoro dettagliato sul territorio. Il suo grado di dettaglio fa sì che questo metodo si applichi soprattutto a delle zone in cui gli oggetti minacciati rappresentano un valore importante.

Metodi specifici

Due approcci di dettaglio sono dedicati alla caratterizzazione delle instabilità:

- quello del LIRIGM chiarisce il modo in cui l'incrocio dei dati geomeccanici (griglia di caratterizzazione) e dei dati storici delle frane permette di stimare le probabilità di rottura in un punto dato in funzione del tempo;
- l'approccio probabilistico sviluppato al *Polytecnico di Torino* valuta teoricamente la probabilità di rottura dei ponti in roccia. Questo metodo non formalizza la localizzazione delle instabilità.

Il terzo approccio di dettaglio si concentra sullo studio della probabilità di propagazione attraverso i metodi detti di *traiettoografie*. Questi approcci sono fondamentali nella definizione delle aree di invasione. Il loro sviluppo (e miglioramento) è una delle chiavi di interpretazione dei futuri metodi di valutazione dei rischi.

Alcuni altri approcci sono segnalati per confronto.

Méthode	Objectifs			Type d'étude			Niveau de détail maximal					
	Danger	Probabilité d'atteinte	Risque	Ponctuelle	Linéaire	Surfacique	Danger	Probabilité d'atteinte	Risque			
	Instabilité	Périmètre de propagation					Détection d'instabilité	Caractérisation Instabilité	Périmètre de propagation "Chute de bloc"	Périmètre de propagation "Éboulement"		
RES							var.	var.	**	*	***	**
RHAP							*	**	***	*	var.	**
CETE			(2)				*	***	** à ***	*	** (1)	var. (2)
MATTEROCK							***	***	var.		var.	
STONE										*g***		*g***
LIRIGM							*	***				
Stabilité de falaise probabiliste							***					
Trajectographie (3x)									***			
RHRS							*					
SHIVA												
SMR (romana)												
RMR							**	*				

Détail: * = faible ** = moyen *** = élevé var. = de * à ***

Tab. III.1 : Comparaison des champs d'application des différentes méthodes. (1) Courbe enveloppe des trajectoires limites les plus défavorables, (2) soit traitées dans l'étude générale (cas des études d'itinéraires), soit par le gestionnaire dans le cas de l'élaboration des documents et/ou zonages réglementaires.

Confronto dei campi di applicazione dei diversi metodi. (1) Curva di involuppo delle traiettorie massime più sfavorevoli, (2) trattate sia nello studio generale (casi di studi di traiettoria), sia dal gestore in caso di elaborazione di documenti e/o zonizzazione di ambiti inedificabili.

RES

L'approche "Rock Engineering System" (RES) est modulable (Hudson, 1992), car le nombre et le type de paramètres utilisés dans une étude peuvent être choisis en fonction des objectifs. Les principes de base consistent à (1) identifier les paramètres qui gouvernent les chutes de blocs (caractéristiques des blocs et de la pente), puis (2) à quantifier l'influence de chacun des paramètres sur les systèmes ainsi que l'influence de ce dernier sur les paramètres. (3) A chaque paramètre est attribuée une échelle propre des valeurs qu'il peut prendre. (4) La somme des valeurs des paramètres, pondérée par rapport à chacun des poids, est un indice de probabilité d'atteinte le "Rockfall Instability Index" (RII), qui est généralement normé à 100%.

La zonation de la probabilité d'atteinte est effectuée en subdivisant chaque trajectoire en fractions de distance maximale admissible (Cancelli & Crosta, 1993a, 1993b) généralement définie comme la distance entre la falaise et l'élément à risque considéré. Le Rock Instability Index (RII) est calculé pour chaque distance, avec une probabilité de propagation différente.

Cette méthode peut s'appliquer à la quantification de la stabilité des pentes (Mazzoccola et Hudson, 1996), à l'estimation de la probabilité d'atteinte et jusqu'à l'analyse du risque (Cancelli et Crosta, 1993a, 1993b). Il faut souligner que l'aspect modulaire de cette méthode permet d'y intégrer d'autres méthodes, comme par exemple les méthodes d'évaluation comme le RMR (Bieniawski, 1993) ou le SMR (Romana, 1993).

RES

L'approccio "Rock Engineering System" (RES) (Hudson, 1992) permette di variare il numero ed il tipo di parametri utilizzati in funzione degli obiettivi che lo studio si prefigge. I principi di base consistono in: 1) identificare i parametri che governano la caduta massi (caratteristiche dei blocchi e del pendio); 2) quantificare l'influenza reciproca e l'importanza relativa di ciascuno di questi parametri; 3) per ciascun parametro sono stabilite classi di valori che esso può assumere; 4) la somma dei valori dei parametri ponderata in funzione dell'importanza relativa degli stessi è un indice di pericolosità, il "Rockfall Instability Index" (RII), che generalmente viene espresso in percentuale.

La zonazione della pericolosità viene effettuata suddividendo ciascuna possibile traiettoria di caduta in frazioni di una distanza massima ammissibile (Cancelli & Crosta, 1993a, 1993b), generalmente definita come la distanza tra la parete e l'elemento a rischio considerato. Il RII viene calcolato per ciascuna di queste distanze, a cui corrisponde una probabilità di arrivo dei massi differente.

Questo metodo può applicarsi alla quantificazione della stabilità dei versanti (Mazzoccola e Hudson, 1996), alla stima della pericolosità fino all'analisi del rischio (Cancelli e Crosta, 1993a, 1993b). Bisogna sottolineare che l'aspetto modulare di questo metodo permette l'integrazione di altri metodi, come per esempio i metodi di valutazione RMR (Bieniawski, 1993) o SMR (Romana, 1993).

RHAP

La méthode “*Rockfall Hazard Assessment Procedure*” (RHAP) (Regione Lombardia, 2000) a été conçue pour permettre d'évaluer de manière expéditive, donc à des coûts raisonnables, la probabilité d'atteinte et le risque, et d'en donner une cartographie. La méthode s'applique à des éboulements de dimension modeste (<1000 m³) ; elle n'est pas utilisable pour couvrir de grandes portions du territoire ou des falaises possédant une grande superficie. Les valeurs de probabilité d'atteinte et de risque qu'on obtient à partir de cette méthode sont propres à chaque site étudié et ne sont pas comparables d'un site à l'autre.

La démarche est la suivante :

- Définition des sites instables ;
- Étude géomécanique des falaises et de la morphologie des pentes ;
- Délimitation, dans chaque site, de zones dont les caractéristiques géomécaniques (falaise) et géomorphologiques (pente) sont homogènes ;
- Délimitation des zones qui peuvent être affectées par des éboulis à l'aide de l'analyse des trajectoires de chutes de blocs (périmètres de danger) ;
- Zonation de la pente en trois zones : arrêt de 70%, 95% et 100% des blocs respectivement ;
- Évaluation de la probabilité de rupture des instabilités de la falaise ;
- Réévaluation de la probabilité d'atteinte préliminaire en fonction de la probabilité de rupture de falaise afin d'obtenir la probabilité d'atteinte finale ;
- Définition du risque.

L'utilisation de cette méthode est recommandée par la “Regione Lombardia”, pour les études des zones à risques majeurs liés aux chutes de blocs, dans le cadre des plans d'aménagement du territoire.

LPC

À l'aide de sa méthode “*Laboratoire des Ponts et Chaussées*” (LPC), le CETE de Lyon, effectue depuis une trentaine d'années des études complètes d'évaluation des dangers rocheux, locales ou à plus grande échelle : localisation et caractérisation des instabilités, calcul des périmètres d'atteinte et définition des travaux à mettre en œuvre pour la prévention / protection. La notion de probabilité de rupture est exprimée par un couple de probabilité / délai de rupture, défini de façon empirique à partir de critères. L'aléa de propagation fait l'objet d'études trajectographiques pour lesquelles un outil de simulation spécifique a été développé. Ces simulations renseignent sur les trajectoires limites, les vitesses et hauteurs de passage des blocs.

RHAP

Il metodo “*Rockfall Hazard Assessment Procedure*” (RHAP) (Regione Lombardia, 2000) è stato concepito per permettere di valutare e perimetrare in modo speditivo e con costi limitati la pericolosità ed il rischio da crollo. Il metodo è applicabile a crolli di modeste dimensioni (<1000 m³) ed è più adatto allo studio di dettaglio di aree non molto vaste. Le classi di pericolosità e di rischio ottenute sono relative e caratteristiche di ciascun sito.

L'applicazione del metodo viene effettuata attraverso un certo numero di passaggi, di seguito illustrati.

- Definizione dei siti instabili;
- Studio geomeccanico delle pareti instabili e morfologico dei pendii sottostanti;
- In ciascun sito, delimitazione di aree omogenee in base alle caratteristiche geomeccaniche e morfologiche;
- Delimitazione delle aree che possono essere raggiunte dai blocchi di crollo tramite programmi di simulazione di caduta massi;
- Zonazione del pendio in tre zone: arresto del 70%, del 95% e del 100% dei massi rispettivamente e attribuzione di una pericolosità preliminare a ciascuna di esse;
- Valutazione della probabilità di distacco per ciascuna delle aree omogenee in parete;
- Rivalutazione della pericolosità preliminare in funzione della probabilità di distacco in parete per ottenere la pericolosità finale;
- Valutazione del rischio in funzione delle categorie di elementi a rischio interessate dal crollo.

L'utilizzazione di questo metodo è consigliata dalla Regione Lombardia per lo studio delle zone a rischi maggiori legati alle cadute blocchi nel quadro dei piani di assetto del territorio.

LPC

Grazie al metodo “*Laboratoire des Ponts et Chaussées*” (LPC) il CETE di Lione effettua da una trentina d'anni degli studi completi di valutazione dei pericoli rocciosi locali o su più vasta scala: localizzazione e caratterizzazione delle instabilità, calcolo delle aree di invasione e definizione dei lavori da mettere in opera per la prevenzione/protezione. La nozione di probabilità di rottura è espressa dalla coppia probabilità/termine di rottura, definita in modo empirico a partire da criteri. La probabilità di propagazione è oggetto di studi traiettografici per i quali è stato messo a punto uno strumento specifico di simulazione. Queste simulazioni danno informazioni sulle traiettorie massime, le velocità e le altezze di volo dei blocchi.

MATTEROCK

La méthode MATTEROCK considère que les éboulements rocheux et chutes de blocs sont provoqués par la présence de discontinuités au sein des massifs rocheux (Rouiller et al., 1998). La détection d'instabilités s'effectue donc, dans un premier temps, par l'étude des familles de discontinuités, à savoir la définition de leurs orientations et caractéristiques géométriques et géomécaniques. Le territoire est subdivisé en aires structurales au sein desquelles les caractéristiques des familles de discontinuités sont homogènes (agencement structural). La confrontation de l'agencement structural avec la topographie, informatisée sur la base d'un MNT, permet de déceler les zones potentiellement instables. La visite des sites sensibles permet de définir des instabilités et de leur assigner un indice de dangerosité, qui est une estimation de la probabilité de rupture. L'analyse des trajectoires (théoriques ou observées) permet d'établir des périmètres de danger en fonction des probabilités d'atteinte et des énergies des blocs.

La méthode MATTEROCK qualifie la probabilité de rupture à l'aide d'un indice dont l'échelle est relative. Cette évaluation se base sur une analyse détaillée de la stabilité à l'aide de paramètres géomécaniques et en tenant compte des facteurs extérieurs qui influent sur la stabilité.

Sur le plan du zonage, la méthode MATTEROCK applique les recommandations fédérales helvétiques. Des périmètres de danger spécifique (chute de blocs ou pierres d'énergies définies) sont établis à partir de l'énergie des blocs et de la fréquence des chutes. Un événement important (> 300 kJ) pouvant se produire chaque 100 à 300 ans possède par exemple le même zonage, danger élevé, qu'un événement d'énergie moyenne (> 30 et < 300 kJ) dont la probabilité d'atteinte est inférieure à 30 ans. Les seuils d'énergie ont été définis sur la base des ouvrages de protection : 300 kJ (énergie que peut supporter un mur en béton armé) et 30 kJ (barrière en bois de chêne, ~30 cm d'épaisseur) (OFEE, 1997).

Ainsi les cartes de danger Matterock sont des cartes de périmètre d'atteinte d'énergie de chutes de blocs par unité de temps.

HGP

La méthode "Historique, Géomécanique et Probabiliste" (HGP), mise au point par le LIRIGM de Grenoble, tente d'associer deux grandes approches par le biais des probabilités ;

- L'analyse statistique des éboulements historiquement connus sur une région permet, sous certaines conditions, d'estimer la probabilité qu'un éboulement d'une classe de volume

MATTEROCK

Il metodo MATTEROCK considera che le frane di crollo e le cadute blocchi sono provocate dalla presenza di discontinuità nei massicci rocciosi (Rouiller et al., 1998) L'individuazione delle instabilità si effettua dunque, in un primo tempo, con lo studio di famiglie di discontinuità, cioè la definizione dei loro orientamenti e delle caratteristiche geometriche e geomeccaniche. Il territorio è suddiviso in aree strutturali nel cui ambito le caratteristiche delle famiglie di discontinuità sono omogenee (assetto strutturale). Il confronto tra l'assetto strutturale e la topografia, informatizzata sulla base di un DTM, permette di identificare le zone potenzialmente instabili. Il sopralluogo dei siti sensibili consente di definire delle instabilità e di attribuire loro un indice di "pericolosità" che è una stima della probabilità di rottura. L'analisi delle traiettorie (teoriche o osservate) permette di stabilire dei perimetri di pericolo in funzione delle pericolosità e delle energie dei blocchi.

Il metodo MATTEROCK qualifica la probabilità di rottura grazie a un indice la cui scala è relativa. Questa valutazione si basa su un'analisi dettagliata della stabilità in base all'utilizzo di parametri geomeccanici e tenendo conto dei fattori esterni che influiscono sulla stabilità.

Sul piano della zonizzazione, il metodo MATTEROCK applica le disposizioni federali elvetiche. I perimetri di pericolo specifico (caduta blocchi o massi di energia definita) sono stabiliti a partire dall'energia dei blocchi e dalla frequenza delle cadute. Un avvenimento importante (> 300 kJ) che possa prodursi ogni 100/300 anni possiede ad esempio la stessa zonizzazione, pericolo elevato, di un evento con un'energia media (> 30 e < 300 kJ) la cui probabilità di accadimento è inferiore a 30 anni. Le soglie di energia sono state definite in base alle opere di protezione: 300 kJ (energia che un muro di cemento armato può sostenere) e 30 kJ (barriera in rovere; ~30 cm di spessore) (OFEE, 1997).

Così, le carte di pericolo Matterock sono carte di perimetro di accadimento di energia di cadute blocchi per unità di tempo.

HGP

Il metodo "*Historique, Géomécanique et Probabiliste*" (HGP) messo a punto dal LIRIGM di Grenoble prova ad associare due grandi approcci tramite delle probabilità:

- L'analisi statistica delle frane storicamente conosciute in una regione consente, a certe condizioni, di stimare la probabilità che una frana di una categoria di volume dato si

donnée se produise dans une zone pour laquelle existe un inventaire d'éboulements rocheux (fréquence moyenne d'éboulement).

- La caractérisation géomécanique d'instabilités reconnues se fait grâce à une " fiche d'évaluation de la dangerosité de l'aléa éboulement rocheux ", développée au LIRIGM dans le cadre d'une étude opérationnelle sur l'évaluation des dangers d'instabilités de grande ampleur (Schéma Directeur de la Région Grenobloise, groupe Eboulements rocheux). Cette fiche s'utilise une fois qu'une instabilité potentielle importante ($>10:000 \text{ m}^3$) a été localisée. **Son but est de pouvoir hiérarchiser, de manière objective, différentes instabilités entre elles.** Elle ne se préoccupe que de la zone de départ des instabilités, aucunement des périmètres d'atteinte. Elle peut être appliquée à des instabilités de moindre volume, à condition qu'elles soient localisées et non diffuses. Développée spécifiquement dans la région de Grenoble, cette méthode de caractérisation est particulièrement adaptée aux zones de falaises calcaires subverticales.
- En associant l'estimation prospective de l'activité d'éboulement rocheux sur la zone d'étude (fréquence moyenne globale) à la hiérarchisation des masses rocheuses potentiellement instables, on peut approcher l'évaluation de la probabilité d'éboulement des instabilités détectées en fonction du temps (probabilité individuelle de rupture).

Étude mécanique/probabiliste de la stabilité des pentes rocheuses

La méthode permet d'évaluer la probabilité de rupture d'une pente rocheuse en accouplant un modèle mécanique à l'Équilibre Limite et à la *technique statistique de Monte Carlo*. L'analyse est effectuée dans des conditions bi-dimensionnelles et s'articule fondamentalement sur deux points :

1. Génération fortuite de surfaces de possible glissements en gradins (Call et Nicholas, 1978). La génération est effectuée sur la base des distributions statistiques de clivage, persistance, espacement et superposition de deux systèmes de discontinuité ;
2. Calcul de la probabilité de rupture. Sur la base des distributions statistiques des paramètres des surfaces de glissement, générées au point 1, et des paramètres mécaniques, la probabilité de rupture est calculée en tant que rapport entre le nombre de facteurs de sécurité mineurs de un et le nombre total de facteurs de sécurité calculés.

produca in una zona per la quale esiste un inventario di frane in roccia (frequenza media di frana).

- La tipicità geomeccanica delle instabilità riconosciute si fa grazie ad una "scheda di valutazione della probabilità di rottura dell'instabilità rocciosa" sviluppata al LIRIGM nel quadro di uno studio operativo sulla valutazione dei rischi un'instabilità di grande ampiezza (*Schéma directeur de la Région Grenobloise, groupe Éboulements rocheux*). Questa scheda si utilizza quando l'instabilità potenziale importante ($>10.000 \text{ m}^3$) è stata localizzata. **Il suo scopo è di poter ordinare gerarchicamente, in maniera oggettiva, le diverse instabilità tra di loro.** La scheda prende in considerazione solo la zona di origine delle instabilità e non le aree di invasione. Può essere applicata a delle instabilità di volume più ridotto a condizione che siano localizzate e non diffuse. Sviluppato specificatamente nella regione di Grenoble, questo metodo di individuazione è particolarmente adatto alle zone di pareti calcaree subverticali.
- Associando la stima della frequenza dell'attività di frana sulla zona oggetto di studio (frequenza media globale) alla gerarchizzazione delle masse rocciose potenzialmente instabili, ci si può avvicinare alla stima della probabilità di crollo delle instabilità individuate in funzione del tempo (probabilità individuale di rottura).

Studio meccanico probabilistico della stabilità dei pendii in roccia

Il metodo permette di valutare la probabilità di rottura di un pendio in roccia, abbinando un modello meccanico all'Equilibrio Limite e alla *tecnica statistica di Monte Carlo*. L'analisi viene effettuata in condizioni bidimensionali e si articola fondamentalmente in due punti:

1. generazione casuale di superfici di possibile scivolamento a gradini (Call e Nicholas, 1978). La generazione viene effettuata sulla base delle distribuzioni statistiche di giacitura, persistenza, spaziatura e sovrapposizione di due sistemi di discontinuità;
2. calcolo della probabilità di rottura. Sulla base delle distribuzioni statistiche dei parametri delle superfici di scivolamento, generate al punto 1, e dei parametri meccanici, viene calcolata la probabilità di rottura come rapporto tra il numero di fattori di sicurezza minori di uno e il numero totale di fattori di sicurezza calcolati.

Trajectographie

L'analyse trajectographique est un des outils de base utilisés pour la définition des probabilités de propagation (Descœudres, 1997). Plusieurs programmes informatiques permettent la simulation de la trajectoire de blocs en 2D ou en 3D. Les paramètres d'entrée tels que coefficients de restitution, forme des blocs, fragmentation, formulation des équations cinématiques, etc. diffèrent d'un logiciel à l'autre. On propose donc ici de comparer trois programmes sur la base d'exemples bien documentés :

- CETE (2D) : St.-Marcel, Barjac
- ADRGT (2D) : Champrond, Comboire
- EPFL (3D) : Les Crettaux, Bieudron.

STONE

Le programme STONE simule en trois dimensions la trajectoire de chute d'un bloc le long d'un versant. Le programme a été mis en œuvre pour utiliser des données d'entrée tirées d'informations thématiques aussi disponibles pour de vastes territoires, ou qui peuvent être acquises par des cartes géologiques, géomorphologiques et d'utilisation des sols ou bien à travers des analyses géologico-morphologiques rapides. L'objectif du programme est de fournir des informations largement distribuées (plans) utiles pour définir des conditions de probabilité d'atteinte et de risque de chute de blocs à l'échelle régionale et locale.

Les output de STONE sont :

- une matrice des compteurs des trajectoires. Pour chaque cellule du MNT est compté le nombre de trajectoires de chute qui y transitent. Plus la valeur est élevée, plus grande est la probabilité qu'un bloc transite et donc, à parité avec d'autres conditions, plus grande est la probabilité d'atteinte ;
- une matrice de la vitesse maximum. Pour chaque cellule du MNT est reportée la vitesse maximum parmi toutes celles calculées dans les diverses trajectoires de chute qui transitent par la cellule. Des vitesses élevées indiquent une grande énergie cinétique et potentielle et par conséquent une probabilité d'atteinte plus élevée ;
- une matrice de la hauteur de vol maximum. Pour chaque cellule du MNT est calculée la valeur maximum (en mètres) de la distance du sol de toutes les trajectoires de chute qui transitent par la cellule. La matrice fournit des informations utiles pour la planification d'ouvrages de protection ;
- un fichier contenant des informations vectorielles sur les trajectoires tridimensionnelles de chute. Le fichier contient notamment les coor-

Traiettografia

L'analisi traiettografica è uno degli strumenti di base utilizzati per la definizione delle probabilità di propagazione (Descœudres, 1997). Numerosi programmi informatici permettono la simulazione della traiettoria di blocchi in 2D o in 3D. I parametri d'ingresso, quali i coefficienti di restituzione, forma dei blocchi, frammentazione, formulazione delle equazioni cinematiche, etc. differiscono da un software all'altro. Proponiamo dunque in questa sede di comparare tre programmi sulla base di esempi ben documentati:

- CETE (2D): St.-Marcel, Barjac
- ADRGT (2D): Champrond, Comboire
- EPFL (3D): Les Crettaux, Bieudron

STONE

Il programma STONE simula in tre dimensioni la traiettoria di caduta di un masso lungo un pendio. Il programma è stato progettato per utilizzare dati di ingresso ricavati da informazioni tematiche disponibili anche per territori vasti, o che possono essere acquisiti da carte geologiche, geomorfologiche e di uso del suolo, od attraverso analisi geologico-morfologiche speditive. L'obiettivo del programma è quello di produrre informazioni spazialmente distribuite (mappe) utili per la definizione delle condizioni di pericolosità e di rischio di caduta massi a scala regionale e locale.

Gli output di STONE sono:

- una matrice dei contatori delle traiettorie. Per ogni cella del DTM viene contato il numero di traiettorie di caduta che vi transitano. Più è elevato il valore del contatore, maggiore è la probabilità che un masso transiti e quindi, a parità di altre condizioni, maggiore è la pericolosità.
- una matrice della velocità massima. Per ogni cella del DTM viene riportata la velocità massima fra tutte quelle calcolate nelle diverse traiettorie di caduta che transitano per la cella. Velocità elevate indicano grande energia cinetica e potenziale, e, di conseguenza, una più elevata pericolosità.
- una matrice della massima quota di volo. Per ogni cella del DTM viene calcolato il valore massimo (in metri) della distanza da terra di tutte le traiettorie di caduta che transitano per la cella. La matrice fornisce informazioni utili per la pianificazione di opere di difesa.
- un file contenente informazioni vettoriali sulle traiettorie tridimensionali di caduta. In particolare il file contiene le coordinate dei punti ed i

données des points et les valeurs de vitesse et de hauteur à partir du sol de chaque point le long de la trajectoire de chute.

III.1.6. Autres méthodes

RHRS

La méthode "Rock Hazard Rating System" (RHRS) a été développée pour évaluer les probabilités d'atteinte d'objets linéaires, c'est-à-dire les routes (Pierson et al., 1990 ; Hoek, 1999). Elle comporte 11 paramètres, qui sont tous évalués de façon simple et pragmatique. Ces paramètres peuvent être subdivisés en catégories qui ont trait à la morphologie, la fréquentation, les caractéristiques géométriques et à la mécanique des roches.

SHIVA

Cette méthode analyse la stabilité des versants par une analyse structurale des orientations des familles de discontinuités et de leurs caractéristiques géomécaniques (Wagner et al., 1988). Elle a principalement été développée pour l'équipement de nouvelles voies de communication en Himalaya.

RMR

Le "Rock Mass Rating" (RMR) est une méthode qui permet de classer les masses rocheuses d'un point de vue géomécanique (Bieniawski, 1993) par une valeur numérique allant de 0 à 100. Cette méthode, développée plus spécialement dans le cadre des travaux souterrains est citée ici, car elle est à la base de nombreuses évaluations de la qualité des amas rocheux. Cette méthode évalue 6 paramètres : (1) La résistance à la compression, (2) le RQD ("Rock Quality Designation", caractérisant la fragmentation de la roche), (3) l'espacement des discontinuités, (4) la description des deux faces des discontinuités, (5) les suintements d'eau et (6) l'orientation des discontinuités. À partir des valeurs affectées à ces paramètres est calculée une note qui caractérise le massif.

SMR

Le "Slope Mass Rating" (SMR) est une adaptation du RMR, afin qu'il puisse s'appliquer plus spécifiquement aux versants reprofilés (talus routiers en particulier). Romana (1988, 1993) a ajouté deux paramètres quantifiables à la valeur du RMR : la géométrie des joints (azimut et pendage des joints par rapport à la pente topographique) et la méthode de reprofilage (à la pelle, à l'explosif, etc.). Cette méthode semble pouvoir s'appliquer facilement à la caractérisation de la stabilité des pentes, (Ronzi et

valori di velocità e di altezza da terra di ciascun punto lungo le traiettorie di caduta.

III.1.6. Altri metodi

RHRS

Il metodo "Rock Hazard Rating System" (RHRS) è stato sviluppato per valutare le probabilità di colpire/raggiungere oggetti lineari, cioè le strade (Pierson et al., 1990; Hoek, 1999). Esso comporta undici parametri che sono tutti valutabili in modo semplice e pragmatico. Questi parametri possono essere suddivisi in categorie che riguardano la morfologia, la frequenza, le caratteristiche geometriche e la meccanica delle rocce.

SHIVA

Questo metodo analizza la stabilità dei versanti attraverso un'analisi strutturale degli orientamenti delle famiglie di discontinuità e delle loro caratteristiche geomeccaniche (Wagner e al. 1988). È stato sviluppato soprattutto per l'impianto di nuove vie di comunicazione in Himalaya.

RMR

Il "Rock Mass Rating" (RMR) è un metodo che permette di classificare l'ammasso roccioso da un punto di vista geomeccanico (Bieniawski, 1993) grazie ad un valore numerico che va da 0 a 100. Questo metodo, sviluppato soprattutto nell'ambito di lavori sotterranei, è citato qui poiché è alla base di numerose stime della qualità degli ammassi rocciosi. Questo metodo prende in considerazione 6 parametri: (1) la resistenza alla compressione, (2) il RQD (*Rock Quality Designation*, che caratterizza lo stato di fratturazione della roccia), (3) la spaziatura tra le discontinuità, (4) la descrizione della superficie di discontinuità, (5) le venute d'acqua e (6) l'orientazione delle discontinuità. A partire dai valori assegnati a questi parametri si calcola un valore che caratterizza il massiccio.

SMR

Il "Slope Mass Rating" (SMR) è un adattamento del RMR affinché possa essere applicato più specificatamente ai versanti rimodellati (scarpate stradali in particolare). Romana (1988, 1993) ha aggiunto due parametri quantificabili al valore del RMR: la geometria dei giunti di stratificazione (direzione e inclinazione dei giunti in rapporto alla pendenza topografica) e il metodo di rimodellamento (mediante escavatore, esplosivo, etc.). Questo metodo sembra potersi applicare facilmente alla ca-

al., 1999) mais n'a pas véritablement été appliquée sur des pentes naturelles (Tsiambaos et Telli, 1992).

ratterizzazione della stabilità dei versanti, (Ronzani e al. 1999), ma non è mai stato veramente applicato su dei pendii naturali (Tsiambaos e Telli, 1992).

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAFIA

- BESSON L., *Les risques naturels en Montagnes : traitement, prévention, surveillance*, pp. 438, Artès - Publialp, 1996.
- BIENIAWSKI Z. T., *Classification of rock masses for engineering ; the RMR system and future trends*, in J. A. Hudson, *Rock testing and site characterization*, pp. 553-573, Pergamon Press, Oxford, UK, 1993.
- CANCELLI A. AND CROSTA G., *Rockfall hazard and risk mapping*, Seventh International Conference and Field Workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics, Balkema., 1993b.
- CANCELLI A. AND CROSTA G., *Hazard risk assessment in rockfall prone areas*, in B. O. Skip, *Proceedings conference on risk and reliability in ground engineering*, pp. 177-190, Thomas Telfors, London, 1993a.
- CASTELI M., *Studio della rottura progressiva di strutture in roccia mediante approccio di Meccanica della Frattura*, Politecnico di Torino, 1998.
- DESCOEUDRES F., *Aspects mécaniques des instabilités de falaises rocheuses et de chutes de blocs*, Publication Soc. suisse Méc. Sols et Roches, 135, 3-11, 1997.
- HOEK E., *Rock engineering*, pp. 313, Rocsciences, London, UK, 1999.
- LEROI E., *Landslide risk mapping : Problems, limitations and developments*, in D. M. Cruden and R. F. Fell *Landslide assessment*, pp. 239-250, A.A. Balkema, Rotterdam, 1997.
- MAZZOCOLA D. AND SCIESA E., *Implementation and comparison of different methods for rockfall hazard assessment in the Italian Alps*, Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides Cardiff, 26-30 Giugno 2000, Balkema, 2, 1035-1040, 2000.
- MAZZOCOLA D. AND HUDSON J. A., *A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability*, The Quarterly Journal of Engineering Geology, 29, 37-56, 1996.
- OFEE, *Recommandations : Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*, in Dangers naturels, pp. 43, Office fédéral de l'aménagement du territoire, 1997.
- PIERSON L. A., DAVIS S. A. AND VAN VICKLE R., *Hazard Rating System Implementation Manual*, Federal Highway Administration (FHWA) Report FHWA-OR-EG-90-01, 1990.
- Regione Lombardia, *Struttura Rischi Idrogeologici (2000) – Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio da frana in Regione Lombardia – Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia n. 51, edizione speciale del 22 dicembre 2000*
- ROMANA M., *SMR Classification*, in C. Bonnard, *Landslides--Glissements de terrains*, pp. 955-960, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1988.
- ROMANA M. R., *A geomechanical classification for slopes : Slope mass rating*, in J. A. Hudson, *Rock testing and site characterization*, pp. 575-600, Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, 1993.
- RONZANI G., STRADA C. AND ZAMAI V., *Applicazione di tecniche GIS nell'elaborazione dell'indice SMR di Romana (1985) ai fini della valutazione di stabilità di pareti rocciose*, *Geologia Tecnica and Ambientale*, 1999(3), 13-18, 1999.
- ROUILLER J.-D., JABOYEDOFF M., MARRO C., PHILIPPOSIAN F. AND MAMIN M., *Pentes instables dans le Pennique valaisan*. Rapport final PNR-31, pp. 239, VDF, Zürich, 1998.
- SCAVIA C., *A Method for the Study of Crack Propagation in Rock Structures*. *Géotechnique*, vol. 45, N° 3, pp. 447-463, 1995
- TSIAMBAOS G. AND TELLI D., *Application of rock mass classification systems on stability of limestone slopes*, in D. H. Bell, *Landslides ; proceedings of the sixth international symposium*, vol. 6, pp. 1065-1069, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1992.
- WAGNER A., LEITE E. AND OLIVIER R., *Rock and debris-slides risk mapping in Nepal ; a user-friendly PC system for risk mapping*, in C. Bonnard, *Landslides-Glissements de terrains*, vol. 5, pp. 1251-1258, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1988.

III.2. PRÉSENTATION DES MÉTHODES D'ÉTUDES

III.2.1. Matterock

III.2.1.1. Introduction

Développée par le Centre de Recherche sur l'Environnement ALPin de Sion (CREALP) dans le cadre du Projet National de Recherche helvétique PNR 31 "changements climatiques et catastrophes naturelles", la méthodologie d'auscultation des falaises Matterock postule qu'il n'y a pas d'instabilités rocheuses sans discontinuités. Elle consiste dans un premier temps à caractériser les discontinuités affectant le massif rocheux, et à visualiser par l'intermédiaire d'un agencement structural les relations géométriques tridimensionnelles qu'elles ont entre elles. La confrontation (visuelle ou informatique) de cet agencement structural et de la topographie locale permet la détection des secteurs instables ou potentiellement instables. Les compartiments ainsi mis en évidence sont ensuite décrits in situ, et un indice qualifiant la probabilité de rupture, dépendant des facteurs intrinsèques à l'instabilité, de sa sensibilité aux processus d'évolution et aux situations déclenchantes, leur est attribué. Finalement une carte de danger, tenant compte de la probabilité de rupture de l'instabilité, de la probabilité d'atteinte et de l'intensité du phénomène en un point donné du territoire est élaborée.

III.2.1.2. La méthodologie Matterock

Les zones affectées par des instabilités de terrain occupent 6 à 8% du territoire helvétique (OFEFP, 1997). Le canton du Valais est l'une des régions les plus affectées. Pour une superficie de 5.225 kilomètres carrés et une population d'environ 275.000 habitants, plus de 200 sites instables affectant les zones d'activité humaine et les voies de communication ont été recensés en 1989, dont environ 50% de cas d'éboulements et de chutes de pierres. Des événements, comme l'éboulement de Randa en 1991, rappellent que la réduction des dommages potentiels engendrés par des instabilités de falaise doit s'effectuer en priorité par des mesures d'aménagement du territoire (Sartori et al., 1991 ; Rouiller, 1992 ; Schindler et al., 1993). En Suisse, la loi fédérale sur les forêts (Lfo, RS 921.0. Art. 1 alinéa 1, 1991) impute aux cantons la protection des po-

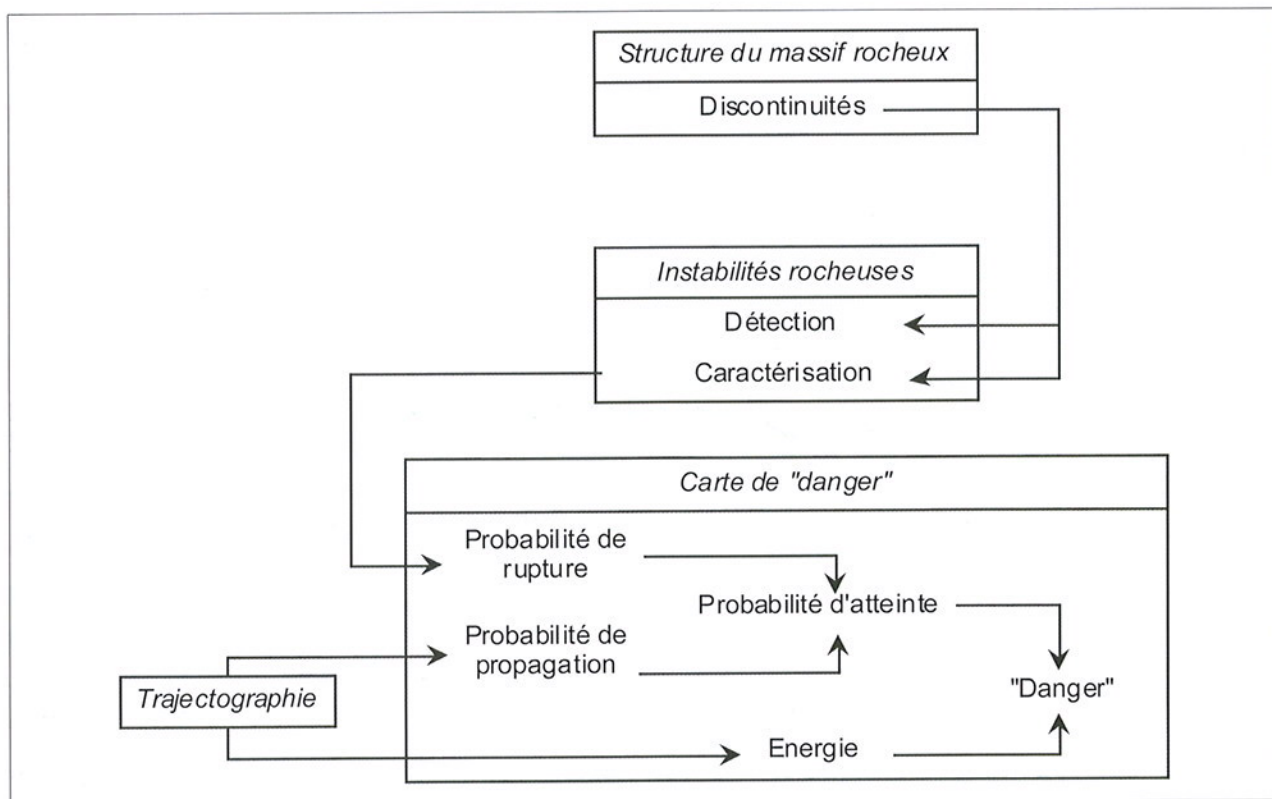


Fig. III.3 : Schéma de principe de la méthodologie Matterock.

pulations et des biens (Lfo, RS 921.0. Art. 19, 1991). La Confédération subventionne les cartes de danger et les ouvrages de protection jusqu'à 70%, mais les travaux doivent être effectués selon les recommandations fédérales (Ofo, RS 921.01, Art. 15, alinéa 2 et Art. 58, 1992). Le Centre de Recherche sur l'Environnement ALPin de Sion (CREALP) a développé dans le cadre du Projet National de Recherche helvétique PNR 31 "changements climatiques et catastrophes naturelles" une approche d'auscultation des falaises et de détection des éboulements et de chutes de blocs potentiels nommée Matterock (Wagner et al., 1990 ; Rouiller et Marro, 1997 ; Rouiller et al., 1997, 1998 ; Jaboyedoff et al. 1999) [Fig. III.3]. Cette méthodologie a été appliquée à plus de cinquante sites en Valais, notamment dans les vallées du Matternal, du Saastal, du Simplon et dans le Val de Bagnes, ainsi qu'en Italie sur la route de Cogne (Val d'Aoste), dont l'exemple, tiré du rapport CREALP/00.02, est développé ci-dessous.

III.2.1.3. L'exemple de Cogne

L'étude des versants surplombant la route très fréquentée de la Vallée de Cogne (Italie, rive droite de la Doire Baltée, entre Courmayeur et Aoste), a été réalisée à la demande de l'Assessorat des Travaux Publics de la Région Autonome de la Vallée d'Aoste (CREALP/00.02). Son but est d'individualiser les secteurs de la route régionale n°47 situés entre les kilomètres 8+600 et 16+700 qui sont menacés par des instabilités rocheuses, et de proposer les mesures de protection adéquates. A cause de l'extension du périmètre d'étude, celui-ci a été divisé en 9 zones [Fig III.4]. La zone 1, correspondant aux km 8+600 à 9+600 de la route, est traitée ci-dessous à titre d'exemple.

Dans cette zone, la route longe le fond de la vallée en rive gauche à environ 1.000 mètres d'altitude. Elle est immédiatement surmontée par des éboulis colonisés par des arbres, dont la déclivité est d'environ 35 à 40°. Le pied de la falaise étudiée se situe à une altitude de 1.200 mètres dans la partie Nord, puis s'éloigne progressivement de la route vers le Sud, pour atteindre une altitude de 1.700 mètres. Son orientation est Nord-Sud dans la partie Nord et NE-SW dans la partie Sud de la zone. L'éperon le plus avancé, surplombant la route à la hauteur du km 8+900, est disloqué et séparé de la falaise principale par des failles Nord-Sud délimitant des tassements importants. Les falaises sont taillées dans des micaschistes à niveaux prasinitiques appartenant à la nappe du Mont Fort (complexe des "gneiss minuti").

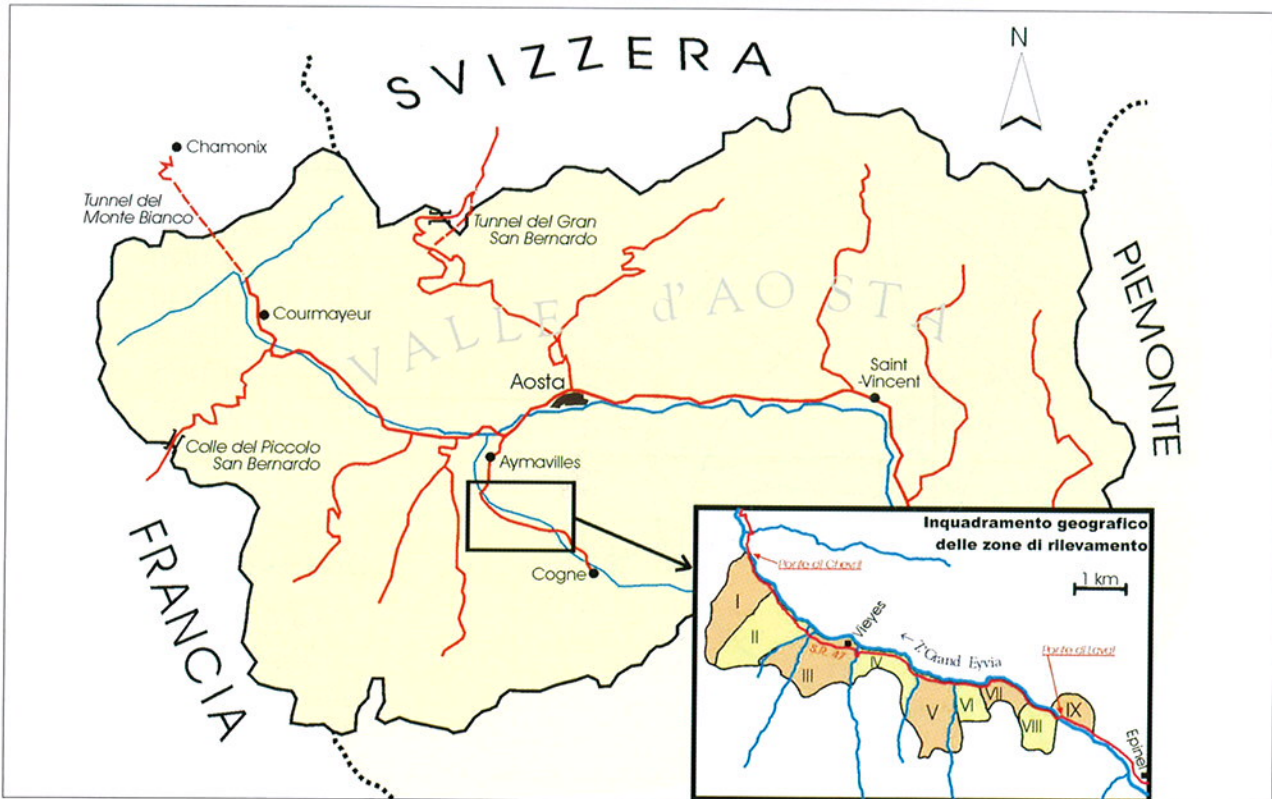


Fig. III.4 : Situation géographique de la route de Cogne.

La zone 1 est soumise à deux types différents d'activité :

les **chutes de blocs**, qui témoignent du démantèlement progressif de la falaise et dont l'activité est signalée par de nombreuses traces d'impact. Trois événements récents ont été relevés : l'un au printemps 1997, et les deux autres en été et en automne 1984, ce dernier ayant blessé un automobiliste. L'activité de chutes de blocs au niveau de la route est élevée sur la majeure partie de la zone (km 8+870 à 9+020 et 9+200 à 9+400), et moyenne ailleurs ;

les **éboulements** : l'observation des photos aériennes montre la présence, après 1991, de la niche d'arrachement d'un événement ayant mobilisé quelques centaines de mètres cubes de roche à la hauteur du km 8+500, mais n'ayant pas atteint la route ;

les **glissements dans les éboulis**, aussi appelés "remobilisation de blocs". Par leur nature, ils peuvent être assimilés à des chutes de blocs.

III.2.1.4. Caractérisation du massif rocheux

Paramètres observés

La méthode Matterock s'appuie sur l'hypothèse que les instabilités rocheuses n'existent que si le massif rocheux est fracturé. L'étude débute donc par la caractérisation de portions homogènes du massif rocheux. Les caractéristiques structurales (orientation, persistance, espacement, etc.) et géomécaniques (ondulation, ouverture, remplissage, etc.) des discontinuités sont mesurées selon deux modes d'acquisition complémentaires (Hoeck and Bray, 1981 ; Giani, 1992 ; Priest, 1993) choisis en fonction de l'objectif et du cadre financier de l'étude :

- le relevé d'une **station à l'affleurement** consiste à décrire systématiquement les caractéristiques des discontinuités sur une portion de falaise ;
- les **observations à distance** permettent d'appréhender ces caractéristiques à l'échelle de la falaise entière ou de la vallée.

Ces caractéristiques peuvent également être appréhendées à l'aide d'observations tirées de deux photos (Crosta, 1997).

Les discontinuités mesurées sont ensuite regroupées en familles, sur la base de différents critères : comparaison avec d'autres études, évidences morphologiques ou génétiques, caractéristiques structurales ou géomécaniques, etc. Les relations spatiales entre les familles de discontinuités (appelées agencement structural) sont représentées par un stéréogramme des plans moyens des familles des discontinuités [Fig III.5].

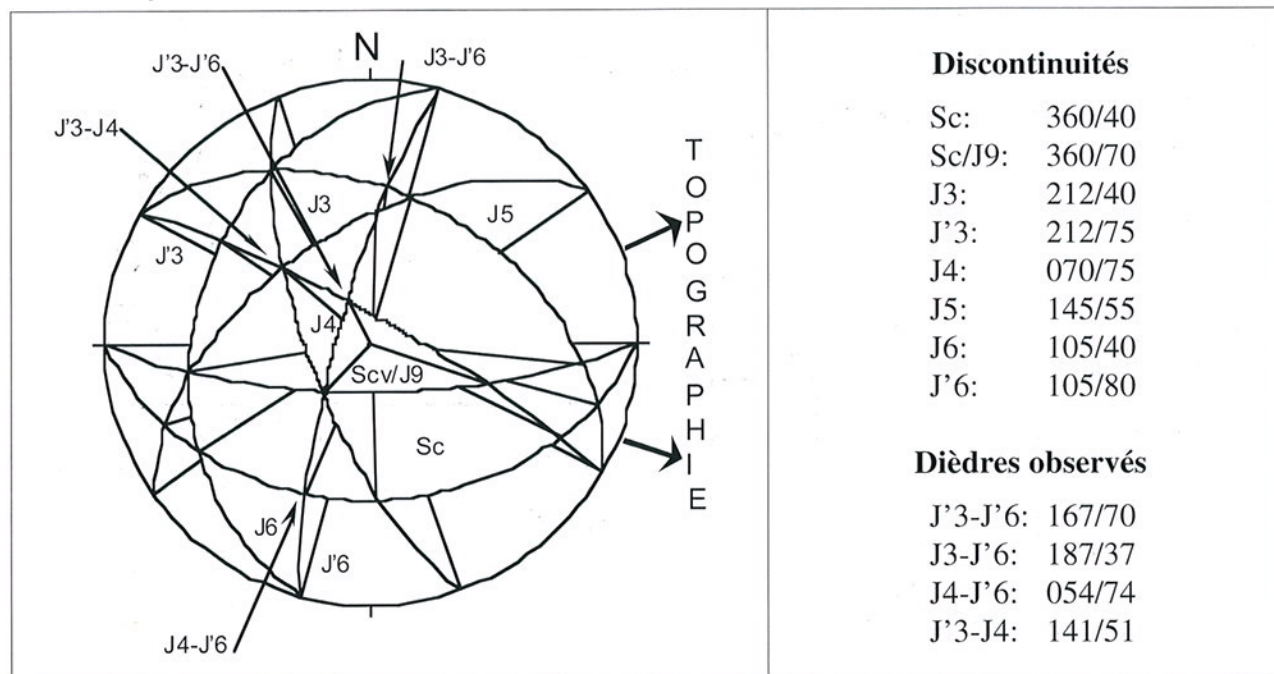


Fig. III.5 : Stéréogramme synthétique des discontinuités de la route de Cogne (Schmidt-Lambert, hémisphère supérieur).

La fenêtre d'observation

Les caractéristiques géométriques des discontinuités peuvent être évaluées à l'aide d'une fenêtre d'observation (Priest, 1993 ; Jaboyedoff et al., 1996). Celle-ci permet de quantifier le nombre, la persistance et l'espacement d'une famille de discontinuités. Soit S_{obs} la surface de la fenêtre, n le nombre de discontinuités contenues dans S_{obs} , L leur espacement moyen et \bar{T} leur persistance moyenne. Par souci de simplification, la surface d'observation est considérée comme étant perpendiculaire aux discontinuités. Si tel n'est pas le cas, l'espacement apparent L^{app} des discontinuités doit être multiplié par le sinus de l'angle que forment le pôle moyen des discontinuités et le pôle moyen de la surface d'observation.

• Nombre de discontinuités

Comme les extrémités des discontinuités ne sont pas toutes contenues dans la fenêtre d'observation, le nombre total de discontinuités contenues dans la fenêtre d'observation n'est pas égal au nombre de traces des discontinuités n qui appartenant à la surface S_{obs} . Soit n_0 le nombre de traces entièrement contenues dans la fenêtre, n_1 le nombre de discontinuités pour lesquelles une seule extrémité est visible. Le nombre total de discontinuités peut être défini comme :

$$n \approx n_0 + \frac{n_1}{2} \quad (III-1)$$

L'estimation de n est peu précise si les dimensions de la fenêtre sont inférieures ou égales à \bar{T} .

• Persistance moyenne

Soit T_i la persistance de chaque discontinuité i contenue dans la fenêtre et T_{tot} la persistance totale des discontinuités contenues dans la fenêtre. La persistance moyenne \bar{T} est donnée par :

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i}{n} = \frac{T_{tot}}{n} \quad (III-2)$$

• Espacement moyen

La surface ou section moyenne \bar{S} délimitée par deux discontinuités successives observées perpendiculairement est donnée par le produit de l'espacement moyen L et la persistance moyenne \bar{T} , soit :

$$\bar{S} = L\bar{T} \quad (III-3)$$

de plus

$$n\bar{S} = S_{obs} = nL\bar{T} \quad (III-4)$$

L est donc donné par

$$L = \frac{n\bar{S}}{n\bar{T}} = \frac{S_{obs}}{\sum_{window} T_i} = \frac{S_{obs}}{T_{tot}} \quad (III-5)$$

Distributions des discontinuités dans une falaise

La connaissance des caractéristiques des discontinuités permet de déterminer la probabilité de trouver au moins une discontinuité selon une direction, dans une surface ou à l'intérieur d'un volume donné. En considérant que la distribution des espacements des discontinuités dans un massif rocheux est aléatoire, la probabilité de trouver au moins une discontinuité à une distance x d'un point donné, perpendiculairement à une famille de discontinuité donnée, vaut (Priest, 1993 ; Jaboyedoff et al., 1996) :

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (III-6)$$

Connaissant la section moyenne (III.3), la probabilité de trouver au moins une discontinuité perpendiculairement à une surface A donnée peut être calculée de la même manière :

$$F_s(x) = 1 - e^{-A/L\bar{T}} = 1 - e^{-N_s} \quad (III-7)$$

Où N_s est le nombre moyen de discontinuités contenues dans une surface A . Si la surface topographique

et les discontinuités ne sont pas perpendiculaires, $L\bar{T}$ doit être corrigé. Ce type de calcul peut être également appliqué à des volumes.

III.2.1.5. Détection des secteurs potentiellement instables

La confrontation entre l'agencement structural et la topographie permet de détecter les secteurs potentiellement instables. Plusieurs approches sont possibles, dépendant des moyens mis à disposition et de la précision requise pour l'étude. L'utilisation d'un modèle numérique de terrain (MNT) permet par exemple de privilégier une approche informatisée (carte des pentes ou confrontation informatique entre un plan ou un dièdre potentiellement dangereux et la topographie). Une étude détaillée nécessite un travail de terrain important. Elle consiste soit à investiguer toute la zone d'étude, soit à affiner les périmètres mis en évidence lors d'une confrontation informatique.

Dans le cas de la route de Cogne, l'importance de l'objet à protéger a contraint à un travail de terrain détaillé au cours duquel l'essentiel des instabilités susceptibles d'atteindre la route ont été inventoriées. Une analyse informatique des pentes et de la probabilité d'intersection des discontinuités dangereuses et de la topographie a ensuite été effectuée, afin de prouver la validité de la démarche.

Détection automatique

Partant du postulat que les instabilités ont lieu préférentiellement dans les pentes raides, l'approche la plus simple consiste à dresser la carte des pentes à partir d'un MNT. En utilisant les caractéristiques des discontinuités (orientation, persistance, espacement), le MNT permet également de déterminer les secteurs dans lesquels elles génèrent préférentiellement des instabilités de type glissement plan ou glissement dièdre. Une probabilité d'occurrence de structures dangereuses peut ensuite être affectée à chaque secteur.

• Carte des pentes

Selon la lithologie, une limite de pente, au-dessus de laquelle les instabilités rocheuses sont susceptibles d'avoir lieu, peut être déterminée. Cette limite est proche de 50° dans les micaschistes dominant la zone 1 de la route de Cogne, où la plus grande partie des instabilités se situent [Fig. III.6].

• Comptage des intersections discontinuités - topographie

À chaque maille du réseau correspond une facette de la topographie de surface S_i . Vue en section, chaque discontinuité occupe une surface (S) égale au produit de sa persistance (T) et de son espacement moyens (L). Cette surface est projetée contre la topographie, ce qui permet de calculer la surface moyenne occupée par une discontinuité sur la topographie considérée ($S/\sin\theta$, où θ est l'angle entre la discontinuité et le pôle de la surface topographique), puis le nombre moyen de discontinuités d'une famille recoupant une facette topographique ($S_i \sin\theta/S$). Chaque facette ou maille de la topographie digitalisée est donc affectée d'un coefficient de densité de recoupement par une famille de discontinuités. Les sites potentiellement les plus dangereux doivent ensuite être reconnus in situ.

Cette démarche permet d'élaborer une carte des isoprobabilités de recoupement de la topographie par une famille de discontinuités jugées dangereuses (plan de glissement). Cette confrontation a été effectuée pour la zone 1 des paroi surplombant la route de Cogne [Fig. III.7] pour le plan de glissement J6 (105/80, persistance 10 mètres, espacement 1 mètre). Les zones

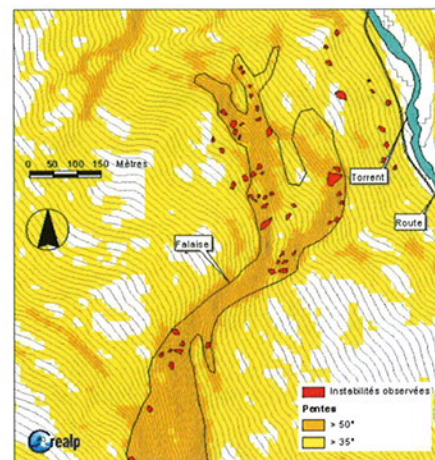


Fig. III.6 : Carte des pentes et comparaison avec les instabilités observées.

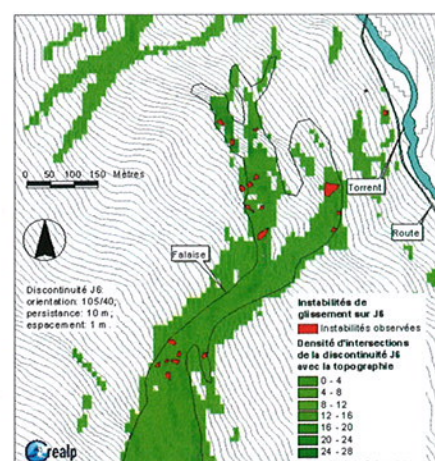


Fig. III.7 : Carte de densité d'intersection des discontinuités J6 et de la topographie et comparaison avec les instabilités observées.

ou la famille J6 recoupe la topographie avec une densité maximale correspondent aux zones où la famille de discontinuités considérée peut générer des instabilités.

Détection in situ

Dans le cas de la zone 1 de la route de Cogne, 112 instabilités ont été répertoriées, reportées sur carte et décrites. Leur probabilité de rupture a été qualifiée à l'aide des indices élevé, moyen, faible [Fig. III.8].



Fig. III.8 : Photo d'une instabilité de glissement superficiel sur une discontinuité J6.

III.2.1.6. Caractérisation des instabilités

Idéalement, une instabilité est définie par un périmètre, un type de mécanisme, un volume, un intervalle de la taille des blocs et une probabilité de rupture. La probabilité de rupture peut être qualifiée à l'aide d'une valeur numérique reflétant l'état d'instabilité d'un massif. Elle est sensible à plusieurs facteurs [Tab. III.2] :

- les **facteurs intrinsèques**, qui décrivent la structure, la lithologie et le comportement géomécanique du massif rocheux ;
- les **processus d'évolution**, qui influent par le biais de processus physiques et chimiques sur la stabilité des massifs (eau, température, sismicité de base, etc.) ;
- les **facteurs déclenchants**, qui sont des processus physiques intervenant soit à la surface du sol (climat) soit en profondeur (sismicité, pression hydraulique dans les fissures, etc.) et qui du fait de leur intensité suffisante provoquent la rupture.

<i>Critère</i>	<i>Facteurs et processus</i>	<i>Echelle de pondération</i>
<i>Continuité</i>	<ul style="list-style-type: none"> • agencement structural • probabilité de recoupement • activité (reflète la continuité) 	0 à 5 (5 = plan continu)
<i>Degré d'activité</i>	<ul style="list-style-type: none"> • chutes de blocs • état de fragmentation, dislocation • déplacement • autres 	0 à 5: latente 5 à 50: modérée ≥ 50: forte
<i>Eau</i>	Présence ou absence	0 à 5
<i>Degré de sensibilité aux facteurs dégradants</i>	<ul style="list-style-type: none"> • altération • météo et climat • sismicité de base • facteurs géologiques: dissolution, tassement, glissement... • facteurs anthropogènes 	0 à 10
<i>Degré de sensibilité aux situations déclenchantes</i>	Facteurs dégradants fortement amplifiés	0 à ≥ 50
<i>Degré de sensibilité aux facteurs stabilisants</i>	<ul style="list-style-type: none"> • effet de butée • perte de masse • permafrost • facteurs anthropogènes 	0 à ≥ - 50 (attention: signe négatif)
<i>Facteur de sécurité ou appréciation subjective</i>	<ul style="list-style-type: none"> • structural • géomécanique • facteurs déclenchants/stabilisants • autres 	- 20 à 20

Tab. III.2 : Exemple d'essai de pondération des divers facteurs pris en compte pour qualifier la probabilité de rupture.

L'échelle de pondération proposée pour les travaux effectués dans le pennique valaisan est la suivante :

- **0 à 3** : le site étudié n'est pas une instabilité ;
- **4 à 8** : instabilité de probabilité de rupture faible ;
- **9 à 49** : instabilité de probabilité de rupture moyenne ;
- **≥ 49** : instabilité de probabilité de rupture élevée.

III.2.1.7. Élaboration de la carte de "danger"

Chaque point de l'espace menacé par une instabilité se voit attribuer un degré de danger (élevé, moyen ou faible), qui est fonction de la probabilité d'atteinte de l'événement et de son intensité (OFEFP, 1997) [Fig. III.9]. La carte de "danger" correspond en fait à une zonation de l'énergie des blocs susceptibles d'atteindre un périmètre donné par unité de temps.

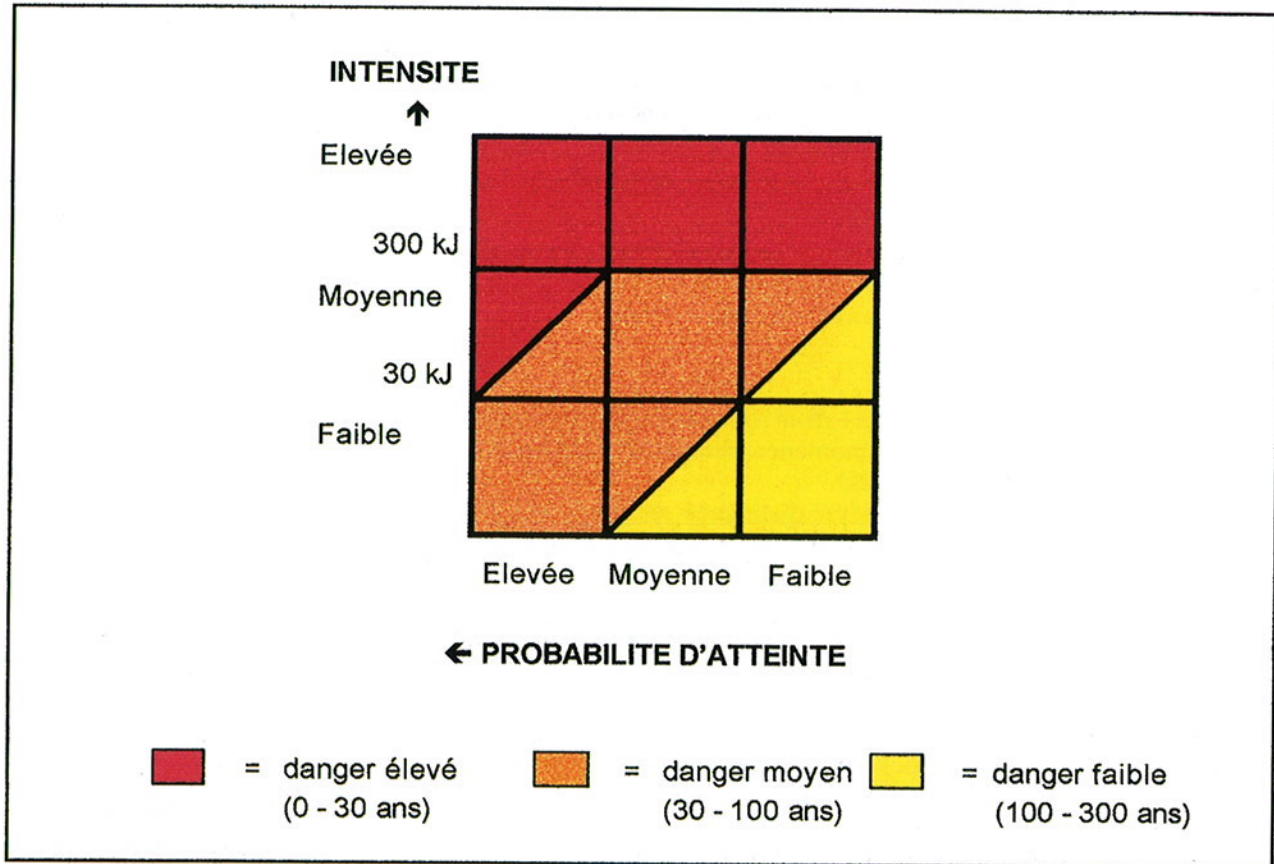


Fig. III.9 : Diagramme d'estimation du degré de "danger" en un point donné de l'espace à étudier.

Probabilité d'atteinte

Suivant les directives fédérales helvétiques en la matière (OFEFP, 1997), la probabilité d'atteinte est définie par des classes temporelles au cours desquelles un évènement a une probabilité élevée de se produire. La probabilité d'atteinte est élevée lorsque qu'elle se situe entre 0 et 30 ans, elle est moyenne de 30 à 100 ans et faible de 100 à 300 ans. La probabilité d'atteinte d'un bloc est évaluée en associant (tab. III.3) :

- sa **probabilité de rupture** ;
- sa **probabilité de propagation**, soit la probabilité qu'un bloc qui s'est détaché atteigne le site considéré.

Tant la modélisation trajectographique que l'observation des blocs déjà éboulés montrent une répartition des arrêts des blocs dans les pentes et permettent d'estimer la probabilité d'atteinte (Descoedres & Zimmermann, 1987).

Tab. III.3 : Estimation de la probabilité d'atteinte à l'aide de la probabilité de rupture et la probabilité de propagation.

		Probabilité de rupture		
		élevée	moyenne	faible
Probabilité de propagation	élevée	élevée	moyenne	faible
	moyenne	moyenne	faible	–
	faible	faible	–	–

Énergie

L'intensité des chutes de blocs en un endroit donné est définie par l'énergie cinétique des blocs en ce point. Suivant les directives fédérales helvétiques (OFEFP, 1997), trois classes d'intensité sont distinguées :

BIBLIOGRAPHIE

- CROSTA G., *Evaluating rock mass geometry from photographic images*, in "Rock Mechanics and Rock Engineering", 30(1), 35-58, 1997
- DESCOEUDRES F. & ZIMMERMANN TH., *Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls*, 6th Int. Conf. on Rock Mechanics, 1987
- GIANI G.P., *Rock Slope Stability Analysis*, Balkema, Rotterdam, 1992
- HOECK E. & BRAY J., *Rock slope engineering (3rd ed)*, IMM, London, 1981
- JABOYEDOFF M., PHILIPPOSIAN F., MAMIN M., MARRO CH. & ROUILLER J.-D., *Distribution spatiale des discontinuités dans une falaise. Approche statistique et probabiliste*, PNR 31, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1996
- JABOYEDOFF M., BAILLIFARD F., MARRO CH., PHILIPPOSIAN F. & ROUILLER J.-D. *Detection of rock instabilities : Matterock methodology*, in "Proceedings of the Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures", Kanazawa, 1999
- LFO, RS 921.0, *Loi fédérale sur les forêts du 4 octobre 1991*, Confédération helvétique, 1991
- OFEFP, OFEE & OFAT, *Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*, Recommandations, 1997
- OFO, RS 921.01, *Ordonnance sur les forêts du 30 novembre 1992*, Confédération helvétique, 1992
- PRIEST S.D., *Discontinuity analysis for rock engineering*, Chapman & Hall, London, 1993
- RAPPORT CREALP/00.02 : *Pareti della strada di Cogne (Valle d'Aosta), Studio geologico-strutturale dei versanti che sovrastano la strada regionale "di Cogne" tra i km 8+600 e 16+700* (par Tosoni, D., Bellini, A., Philipposian F. & Baillifard, F.), rapport non-publ. CREALP, Sion, 2000
- ROUILLER J.-D., *L'éboulement de Randa*, "Route et trafic", 5/92 : 373-376, 1992
- ROUILLER J.-D., JABOYEDOFF M., MARRO CH. & PHILIPPOSIAN F., *Matterock : méthode d'étude d'instabilités de falaise et d'appréciation du danger*, Actes de la journée d'automne de la société suisse de mécanique des sols et des roches, 1997
- ROUILLER J.-D. & MARRO CH., *Application de la méthode Matterock à l'évaluation du danger lié aux falaises*, in "Eclogae geol. Helv." 90, 1997
- ROUILLER J.-D., JABOYEDOFF M., MARRO CH. & PHILIPPOSIAN F., *Pentes instables dans le Pennique valaisan : une méthode d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs*. Rapp. final PNR 31, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich, 1998
- SARTORI M., SCHAFFER M. & ESCHER A., *Rapport inédit concernant un premier stade d'évaluation des causes géologiques de l'éboulement de Randa*, in CRSFA/91.35, rapport non-publ. CRSFA, Sion, 1991
- SCHINDLER C., CUENOD Y., EISENLOHR T. AND JORIS CH.-L., *Die Ereignisse vom 18. April und 9. Mai bei Randa (VS). Ein atypischer Bergsturz in Raten*, in "Eclogae geol. Helv." 86/3, 643-665, 1993.
- WAGNER A., LEITE E. & OLIVIER R., *SHIVA : A landslide hazard mapping software*. Version 1.0. Inst. Géophys. Uni Lausanne & ITECO (Affoltern a.A.), 1990

ANNEXE : L'APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA MATTEROCK ALLA PARETE SUD DEL MONTE SAN MARTINO (LECCO)

L'applicazione della metodologia Matterock (Cantone, Ratti, Tosoni; 2000) sulla imponente parete che sovrasta la città di Lecco¹ è stata articolata nelle seguenti 3 fasi:

1. Analisi strutturale

L'analisi strutturale ha come obiettivo:

- a) riconoscimento delle principali famiglie di discontinuità e delle loro caratteristiche geomeccaniche principali (Fig. A1; Tab. A1).

¹ L'inquadramento geografico e geologico è riportato nella "fiche d'identité" descritta alla fine del paragrafo III.2.2.

b) ricostruzione dell'assetto strutturale della falesia (agencement structural) e relativi domini strutturali presenti, con lo scopo di definire i meccanismi di mobilizzazione possibili (Fig. A2).

La falesia è caratterizzata dalla presenza della stratificazione (ST) e di altre 3 famiglie di discontinuità principali (J1, J2 e J3).

La falesia è stata suddivisa in due domini strutturali diversi (aires structurales) che corrispondono a settori con caratteristiche litologiche e morfologiche differenti: il dominio SM1 è costituito dai massivi "Calcari di Esino" che formano quasi completamente la grande parete rocciosa del M. San Martino; il secondo dominio SM2 corrisponde invece al settore orientale della zona di studio dove affiora in maniera discontinua la formazione dei "Calcari di Angolo", caratterizzata da maggiore erodibilità e da una stratificazione più fitta.

L'assetto strutturale è il medesimo per entrambi i domini per cui viene rappresentato con un solo stereogramma di Schmidt. Le differenze litologiche riscontrate nei due domini condizionano sensibilmente i valori di spaziatura e persistenza delle discontinuità soprattutto a carico della stratificazione (ST).

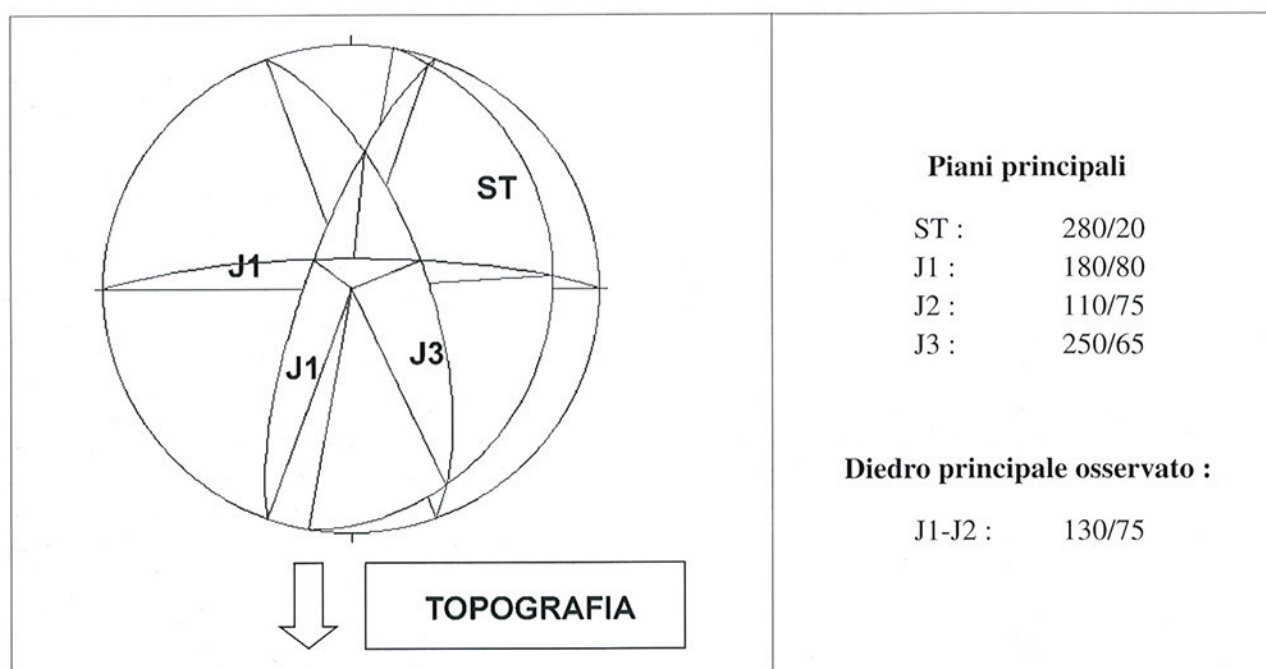


Fig. A1 : Proiezione stereografica di Schmidt-Lambert (emisfero superiore).

Fam.	Azimut	Dip	Persistenza [m]	Spaziatura [m]		Ondulazione	Evidenza morfologica
				media	max.		
ST	270° - 290°	10° - 30°	> 100	1 - 5	10 - 20	media	rari tetti o strapiombi
J1	170° - 190°	75° - 90°	100 - 200	2 - 4	5 - 6	debole	fronte falesia (trench nel settore W della falesia)
J2	100° - 120°	70° - 80°	60	2 - 4	10 - 30	debole	cengie

Tab. A1 : Caratteristiche strutturali e geomeccaniche delle discontinuità (osservazioni a distanza).

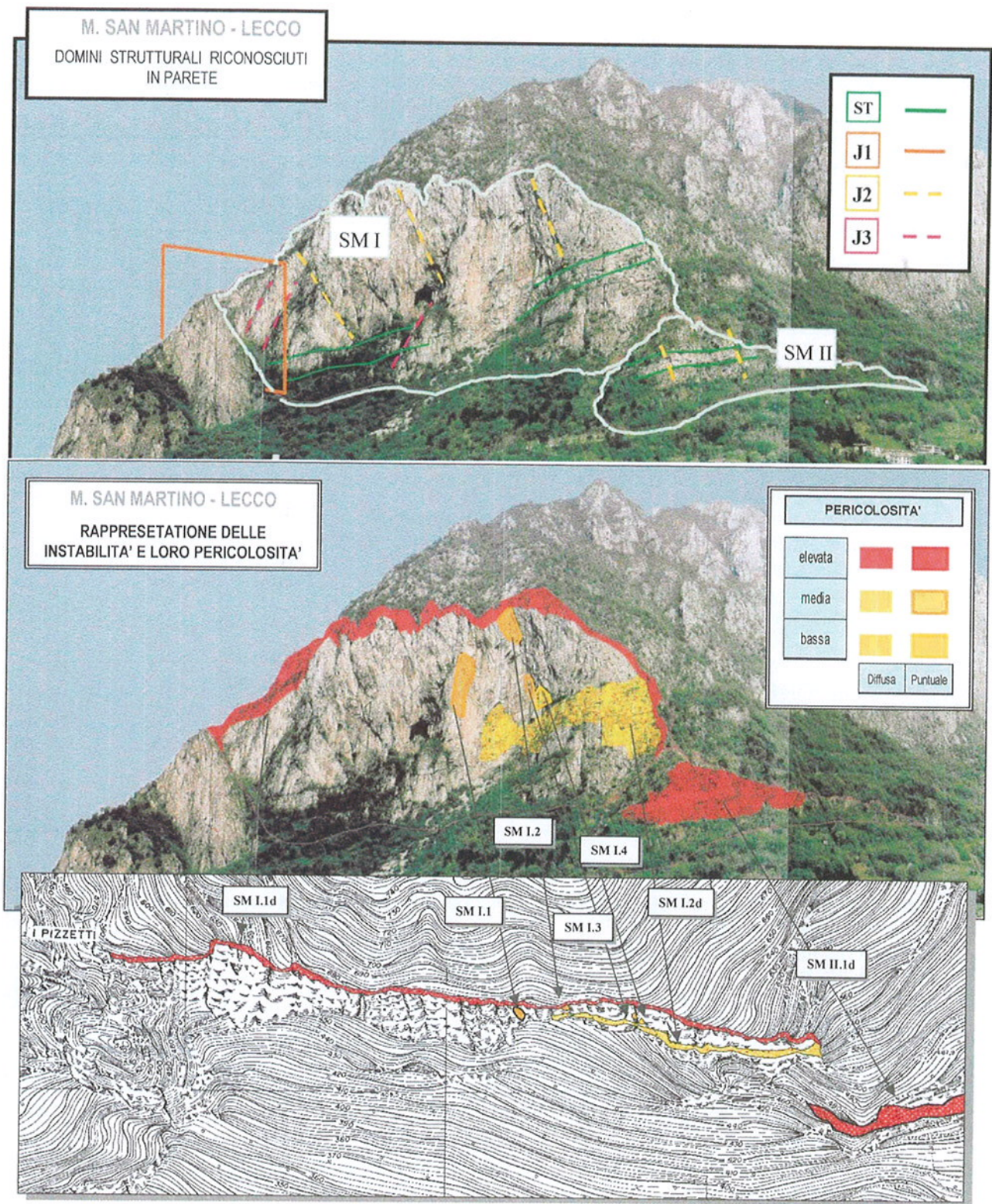


Fig. A2 : In alto sono indicate le tracce delle famiglie di discontinuità riconosciute e i domini strutturali definiti (SM1 e SM2); in basso la carta delle instabilità riconosciute con relativa posizione in parete.

2. Riconoscimento instabilità

Questa fase ha portato all'individuazione delle instabilità in parete. Con il termine **instabilità** si intende un compartimento roccioso instabile caratterizzato da uno o più meccanismi di mobilizzazione, un perimetro, un volume mobilizzabile ed un grado di pericolosità (probabilità di mobilizzazione).

Esistono **instabilità puntuali** rappresentate da compartimenti arealmente limitati ed **instabilità diffuse** che corrispondono a settori di falesia che includono diversi piccoli compartimenti instabili isolati caratterizzati da meccanismi di mobilizzazione, volumi e grado di pericolosità confrontabili.

Nel dominio strutturale più importante (SM1) sono state riconosciute 4 instabilità puntuali (SM I.1, I.2, I.3, I.4 e 2 diffuse (SM I.1d, I.2d); nel dominio strutturale SM2 una sola instabilità di tipo diffuso (SM II.1d).

Schede identificative delle instabilità

SM I.1

vedi esempio riportato in Fig. A3

SM I.2

Descrizione: Sperone alla sommità della falesia

Roccia: Calcere di Esino

Meccanismo: Scivolamento superficiale su J2 con taglio su J1

Pericolosità: Media

Volume mobilizzabile: 900 mc

Taglia blocchi: 5 – 10 mc

Forma blocchi: Prismi

SM I.3

Descrizione: Pilastro a E della nicchia di distacco della frana del febbraio 1969

Roccia: Calcere di Esino

Meccanismo: Scivolamento sul diedro J1-J2

Pericolosità: Media

Volume mobilizzabile: 100 mc

Taglia blocchi: 1 – 2 mc

Forma blocchi: Prismi

SM I.4

Descrizione: Compartimento al di sopra di un piccolo tetto a destra dell'instabilità SM I.3

Roccia: Calcere di Esino

Meccanismo: Scivolamento profondo su ST con taglio su J1 e trazione su J2

Pericolosità: Bassa

Volume mobilizzabile: 150 mc

Taglia blocchi: 1 – 2 mc

Forma blocchi: Prismi

SM I.1d

Descrizione: Ciglio della parete

Roccia: Calcere di Esino

Meccanismo: Scivolamento sul diedro J1-J2, scivolamento superficiale su J2 con taglio su J1

Pericolosità: Elevata

Volume mobilizzabile: 2 – 5 mc

Taglia blocchi: 0,5 – 2 mc

Forma blocchi: Prismi corti

SM I.2d

Descrizione: Settore orientale della falesia

Roccia: Calcere di Esino

Meccanismo: Trazione di tetti secondo la ST, scivolamento sul diedro J1-J2
 Pericolosità: Bassa
 Volume mobilizzabile: 1 – 3 mc
 Taglia blocchi: 0,5 – 1 mc
 Forma blocchi: Prismi corti, lastre

SM II.1d

Descrizione: Piccola parete nel settore orientale della zona studiata
 Roccia: Calcare di Angolo
 Meccanismo: Scivolamento sul diedro J1-J2, ribaltamento su J2, trazione di tetti formati da ST
 Pericolosità: Elevata
 Volume mobilizzabile: 4 mc
 Taglia blocchi: 0,3 – 1 mc
 Forma blocchi: Prismi

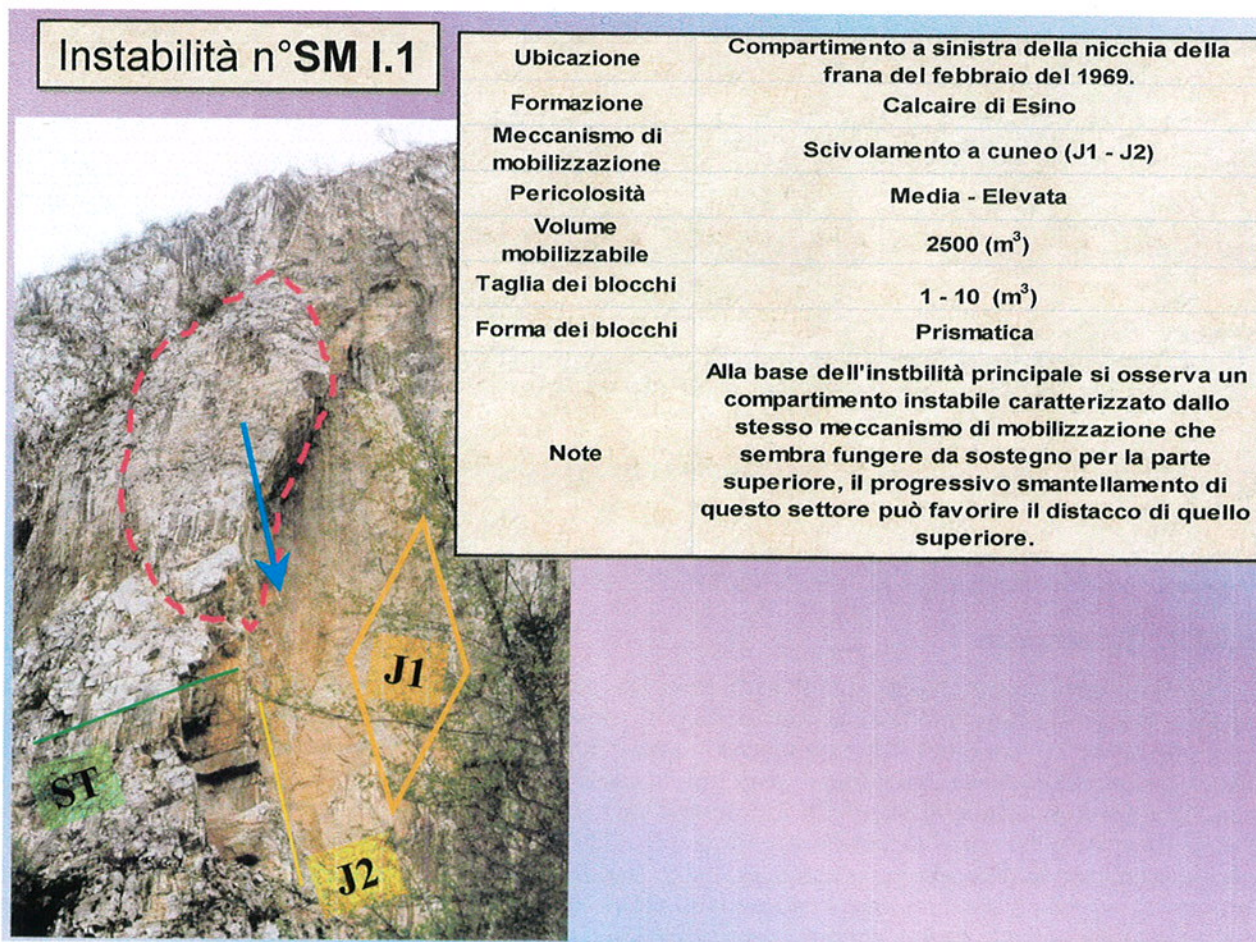


Fig. A3: Esempio di scheda identificativa di una instabilità.

3. Carta del pericolo

La redazione della carta del pericolo (Fig. A4) è stata compiuta valutando il volume e la pericolosità delle instabilità in parete e stimando i limiti di arresto dei blocchi in caduta mediante lo studio delle caratteristiche geomorfologiche e di uso del suolo del pendio, della distribuzione dei blocchi presenti ed infine con l'esecuzione di analisi traiettografiche.

Queste ultime sono state realizzate con il programma CRSP 3.0 del Colorado Technical Institute 1993 secondo le medesime modalità utilizzate nell'applicazione delle altre metodologie.

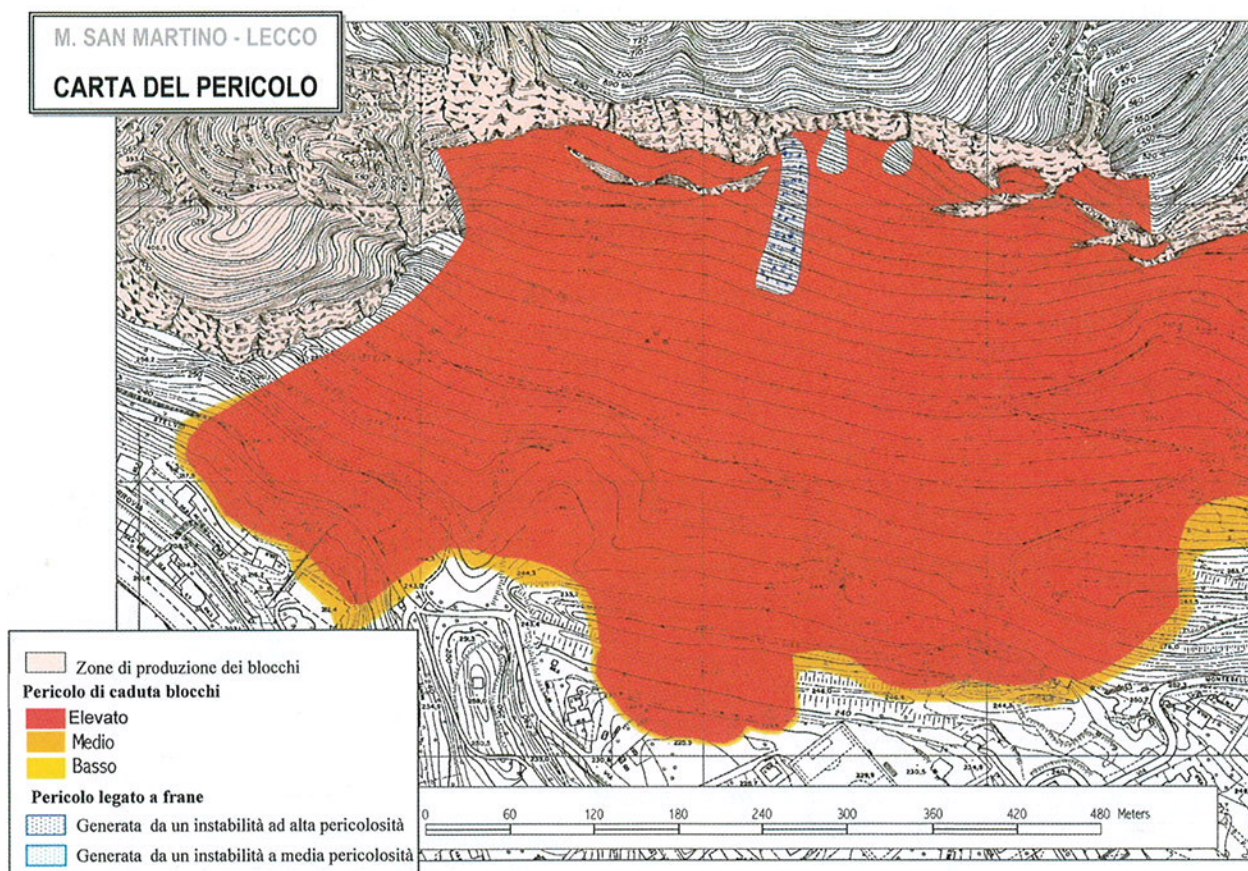


Fig. A4 : Carta del pericolo.

III.2.2. La metodologia RHAP (Rockfall Hazard Assessment Procedure)

III.2.2.1. Introduzione

La Struttura "Rischi Idrogeologici" della Regione Lombardia ha approntato una serie di metodologie speditive per la valutazione e la zonazione della pericolosità da frana (Regione Lombardia, 2000). Le metodologie hanno lo scopo di fornire un metodo rapido, ma il più possibile rigoroso, per zonare aree in cui siano già state riconosciute situazioni di pericolo, in modo da poter trattare le zone a diversa pericolosità in modo differente in termini di interventi di mitigazione e di pianificazione del territorio. Ciascuna metodologia si riferisce ad una singola tipologia di frana. I risultati dell'applicazione delle diverse metodologie vengono sovrapposti per ottenere la pericolosità finale. Non fanno parte di queste procedure le grandi frane, di volumetria superiore alle centinaia di migliaia di metri cubi, che sono trattate singolarmente in quanto la loro evoluzione dipende da una combinazione di fattori non generalizzabili.

Per gli scopi del progetto InterregiIC - Falaises verrà di seguito descritta la metodologia denominata RHAP che è relativa alla valutazione della pericolosità da crollo ed è valida per crolli di singoli blocchi o per crolli di massi fino ad una volumetria massima complessiva di 1000 m³. Sebbene le procedure di seguito descritte siano state concepite per risolvere i problemi specifici del territorio lombardo, esse hanno cercato di contemplare le situazioni di caduta massi più frequenti e possono quindi essere applicate a qualunque parete rocciosa origine di crolli in quanto non sono indirizzate a particolari condizioni litologiche, strutturali o morfologiche.

La metodologia RHAP è rivolta ad aree limitate e circoscritte ed è applicabile ad una scala di dettaglio. La zonazione della pericolosità da crollo risultante dall'applicazione della metodologia è relativa al sito indagato e non è confrontabile con altri siti studiati separatamente, in quanto ciascun sito risulterà sempre suddiviso in aree a pericolosità da bassa a elevata, indipendentemente dal valore assoluto della pericolosità. Nei

casi in cui la probabilità di accadimento sia molto bassa, la metodologia prevede un valore soglia al di sotto del quale la zonazione della pericolosità non è più significativa.

In generale la metodologia valuta la pericolosità in due fasi. Nella prima sono valutate le traiettorie e le aree di possibile espansione delle frane ed è effettuata una zonazione della pericolosità preliminare. Rigorosamente in questa fase si dovrebbe tener conto dell'intensità del fenomeno che dipende da volume e velocità. Spesso questo non è possibile in un processo speditivo in quanto i tempi ristretti non consentono un'adeguata raccolta dati; per questo motivo è stato scelto di utilizzare parametri semi-quantitativi.

Nella seconda fase è valutata la probabilità d'accadimento dei fenomeni risultante in una zonazione della pericolosità delle aree di distacco. In termini rigorosamente probabilistici, la probabilità d'accadimento andrebbe valutata in base a serie storiche da cui ricavare periodi di ritorno. Anche in questo caso, data la difficoltà di reperire dati storici completi, si è scelto di ricorrere ad una valutazione dei sintomi d'attività.

Le due zonazioni di pericolosità vengono messe in relazione per ottenere la pericolosità totale.

III.2.2.2. Fasi di applicazione della metodologia

Il primo passo per l'applicazione della metodologia è l'individuazione dei settori di parete rocciosa origine di crolli, a cui segue la delimitazione d'aree omogenee in funzione di: (1) caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso ricavate da rilievi in sito (Tab. III.4) e (2) morfologia del versante lungo le traiettorie di discesa (zone di transito e d'arresto) dei blocchi, come ad esempio altezza della parete e pendenza del versante sottostante (Tab. III.5); questi parametri vengono poi utilizzati nella modellazione numerica.

SCHEDA PER LA DESCRIZIONE DI AMMASSI ROCCIOSI IN ROCCE RESISTENTI									
STAZIONE N°	Data:	Operatore:	Rullino/Foto:						
LOCALITÀ:	Comune:								
CTR:	Coordinate:		Campioni n°:						
Esposizione:	Naturale: affioramento	alcchia di frana	erosione accelerata						
	Artificiale: scavo sup.	scavo sotterr.	vincaia						
			metodo di scavo:						
LITOLOGIA:									
Formazione:									
Fattori Geologici:	Giunti d'astolazione	Discordanze	Contatti litologici						
Strutt. Monoclinale	Faglie (dirette/inversa)	Varie	Terrano residuo						
Pieghe	Rocce di faglia	Filoni	Carismatico						
Carniere/Fianchi poggio	Fratture beanti	Laminazioni	Suolo						
		parelli./nodi./fond./convi	spessore (m)						
INSTABILITÀ*	Schivamenti: Pionanti a Cuneo	Rotazioni	Ribaltamenti: di blocchi per flessione						
AMMASSO*	MASSIVO	BLOCCI	TABULARE CCLONARE IRREGOLARE FRANTUMATO						
STRUTTURA	Massiccio	Straffacata (spessore strati in cm) min	moda max						
ALTERAZIONE*	INALTERATA	DECOLORATA	<50% DECOMP. >50% DECOMP. GOMPL. DECOM.						
	Chimica (Pigioclasti, Mche, etc.)		Fisica (microfratture, grandi, etc.)						
RESISTENZA*	Esir. Deb. Sfrido a mano	Molto Deb. Strucco con martello	Debole. Difficile da stracciare con martello						
		Med. Res. Frattura con colpo martello	Resistente. Frattura con pochi colpi martello						
			Molto Res. Frattura con molti colpi martello						
			Esir. Res. Scheggiato un martello						
BLOCCHI DIMENSIONE MEDIA: FORMA: Cubo/Rombocoro/Tetraedro/Prisma (equilibrato/plastra)									
Piano affioramento	Giacitura	Altezza (m)	Larghezza (m)						
Linea di scansione	Gisocitura (verticale/orizzontale)	Lunghezza (m)							
SPAZIATURA MODALE (cm) (TOTALE DELL'AFFIORAMENTO)									
PERSISTENZA MODALE (m) (TOTALE DELL'AFFIORAMENTO)									
NUMERO DI SISTEMI DI DISCONTINUITÀ									
PARAMETRI (VALORI MODALI PER CIASCUN SISTEMA)									
SIST.	TIPO	GIAC.	SPAZ.²	PERS.³	APERT.⁴	RIEMPIM.⁵	RUGOS.⁶	ALTER.⁷	ACQUA⁸
1									
2									
3									
4									
5									
ZONE DI TAGLIO		Orientazione (inclin.)							
		Uniforme	matricale %		a più strati	matricale %			
			breccia %			breccia %			
			vena			vena			

* ISRM 1976

¹: 0-zona di faglia; 1-faglia; 2-piatta; 3-olivoglio; 4-sidostoria; 5-taglio; 6-vena; 7-zonazione; 8-foliazione; 9-stratificazione; 10-sabbio.
 ²: in centimetri
 ³: in metri
 ⁴: in centimetri
 ⁵: in centimetri
 ⁶: in centimetri
 ⁷: in centimetri
 ⁸: in centimetri
 ⁹: in centimetri
 ¹⁰: in centimetri

Tab. III.4: Scheda per la descrizione degli ammassi rocciosi resistenti utilizzata per la raccolta dei dati geomeccanici.

SCHEDA CROLLI			
Lunghezza massima piste di discesa (m)			
ZONA DI DISTACCO	Pendenza (°)		
	Altezza della parete (m)		
	Forma della parete		
	Piuvone	Convessa	
	Aggettante	Concava	
	Fattore di merito della parete*	si	no
	Presenza di contatti litologici	si	no
	Presenza di interstizi argillosi	si	no
	Presenza di vene d'acqua	si	no
	Volume potenziale instabile (totale in m³)		
	Sistemi di attività	Fratture aperte	si no
		Blocchi rotati	si no
		Zone lateralmente fratturate	si no
		Superfici non attive	si no
Esecuzione di rilievo geomorfologico (m²)			
ZONA DI TRANSITO	Pendenza media versante (°)		
	Natura della superficie	Rocce resistenti	
		Rocce deboli	
		Dietro grossolano	
		Dietro fine	
		Tenero	
	Tipo di impatto	Impatto sligot*	si no
		Impatto evigot*	si no
	Frattura di blocchi per impatto	si	no
	Tipo di vegetazione		
	Assente	Erbosca	
	Arbustiva	Di alto fusto	
	Altezza vegetazione abbattuta (m)		
ZONA DI ACCUMULO	Pendenza media (°)		
	Natura della superficie	Rocce resistenti	
		Rocce deboli	
		Dietro grossolano	
		Dietro fine	
		Tenero	
	Materiali sciami	Litologia	
		Selezione	
		Forma	
		Volume minimo dei blocchi (m³)	
		Volume medio dei blocchi (m³)	
		Volume massimo dei blocchi (m³)	
		Distanza minima raggiunta dai blocchi (m)	
		Distanza media raggiunta dai blocchi (m)	
		Distanza massima raggiunta dai blocchi (m)	
	Tipo di vegetazione		
	Assente	Erbosca	
	Arbustiva	Di alto fusto	

Tab. III.5: Scheda crolli utilizzata per la descrizione delle traiettorie di caduta dei blocchi.

In ciascuna delle aree omogenee così definite, vengono scelte una o più traiettorie di discesa dei blocchi su cui effettuare analisi di rotolamento tramite simulazioni di caduta con modelli numerici di tipo stocastico supportate da rilievi geomeccanici e da osservazione degli accumuli di detrito.

Le simulazioni di caduta con modelli numerici vanno effettuate prendendo in considerazione i seguenti parametri.

- Zona di partenza dei blocchi: la sommità della parete;
- Volumetria dei massi: le dimensioni modali, valutate tramite analisi statistica (istogramma di frequenza) del detrito alla base della parete in esame e/o in base alla fratturazione in parete, ricavata da rilievi geomeccanici. Possono essere considerati più valori modali nel caso in cui la distribuzione sia bi- o poli-modale. Oltre ai volumi modali si prenda in considerazione anche il volume maggiore o quello del blocco che ha raggiunto la distanza massima ed eventualmente il blocco potenzialmente instabile di maggiori dimensioni riscontrato in parete.
- Forma: dovrà essere utilizzata nella simulazione la forma più simile alla forma modale osservata nel detrito o in parete.
- Coefficienti di restituzione e rugosità: vanno valutati attraverso un rilievo puntuale delle traiettorie di caduta, sia preesistenti che ipotizzate, prestando particolare attenzione al tipo di superficie, tipo di vegetazione presente, profondità e distanza tra solchi di impatti precedenti, eventuali danni a strutture e piante, ecc.
- Numero di simulazioni: essendo questa analisi di tipo probabilistico, è necessario effettuare numerose simulazioni di caduta (si consigliano almeno 400 cadute per ogni traiettoria).

In base ai risultati delle analisi illustrate al punto precedente si esegue una zonazione preliminare, longitudinale, delle traiettorie di caduta suddividendole in 3 zone: a) di transito e di arresto del 70% dei blocchi, b) di arresto del 95% dei blocchi, c) di arresto del 100% dei blocchi. Queste percentuali sono valutate sulla totalità delle simulazioni effettuate, per ogni traiettoria, sui blocchi modali di qualsiasi forma considerata. A queste zone vengono assegnate le classi di pericolosità relativa: 4 (a), 3 (b), 2 (c). In aggiunta si delimita un'area di pericolosità residua (zona 1) utilizzando la distanza massima raggiunta dal blocco di maggiori dimensioni oppure la distanza massima raggiunta da massi di crolli precedenti.

Successivamente si valuta la probabilità di accadimento del fenomeno in ciascuna delle aree omogenee, definendo la propensione al distacco dei blocchi. A tale scopo si suddivide la parete in maglie con lato da 5 m fino a 20 m, secondo la complessità geomeccanica dell'area omogenea o in base alle dimensioni della parete. Per ciascuna maglia si verifica la presenza dei seguenti elementi di instabilità:

- fratture aperte con evidenze di attività associate a cinematismi possibili;
- blocchi ruotati;
- zone intensamente fratturate;
- superfici non alterate che testimoniano recenti distacchi;
- emergenze di acqua alla base dei blocchi.

Per ogni maglia viene quindi indicato il numero degli elementi di instabilità presenti. Poi, per ogni area omogenea viene calcolata la somma di tutti gli elementi di instabilità presenti ed è ricavata la percentuale di instabilità in relazione al numero massimo ottenibile nell'area omogenea, dando a ciascuna maglia il valore massimo 5 (Fig. III.11).

In base alle percentuali così ricavate, le aree omogenee vengono raggruppate in 3 gruppi a differente attività relativa per il sito indagato: alta, media, bassa. Non vengono indicati valori di percentuali assolute per evitare che gran parte delle aree omogenee risultino avere lo stesso valore di pericolosità, impedendo una zonazione. Tuttavia, nel caso in cui tutte le aree omogenee presentino percentuali inferiori al 10% non si ritiene necessario effettuare la zonazione della pericolosità.

La zonazione finale della pericolosità viene definita utilizzando i valori delle classi di pericolosità relativa della zona di transito e accumulo dei blocchi, che vengono aumentati di 1, mantenuti costanti o diminuiti di 1 a seconda che le pareti sovrastanti appartengano ai gruppi di attività alta, media o bassa rispettivamente. Si possono così avere in totale 5 classi di pericolosità, da H1 a H5.

III.2.2.3. L'applicazione della metodologia alla parete Sud del Monte San Martino

Nell'ambito del progetto *Falaises* la metodologia sopra descritta è stata applicata alla parete Sud del Monte San Martino, in provincia di Lecco, in Lombardia.

- i volumi dei blocchi utilizzati sono quelli modali ($0.2 - 0.5 - 2 \text{ m}^3$) e quello del blocco più grande (diametro = 7 m);
- sono state utilizzate forme dei blocchi sferiche e cilindriche;
- sono state effettuate 400 simulazioni di caduta per ciascuna traiettoria.

In base ai risultati di questa analisi è stata effettuata una zonazione della pericolosità preliminare (Fig. III.13).

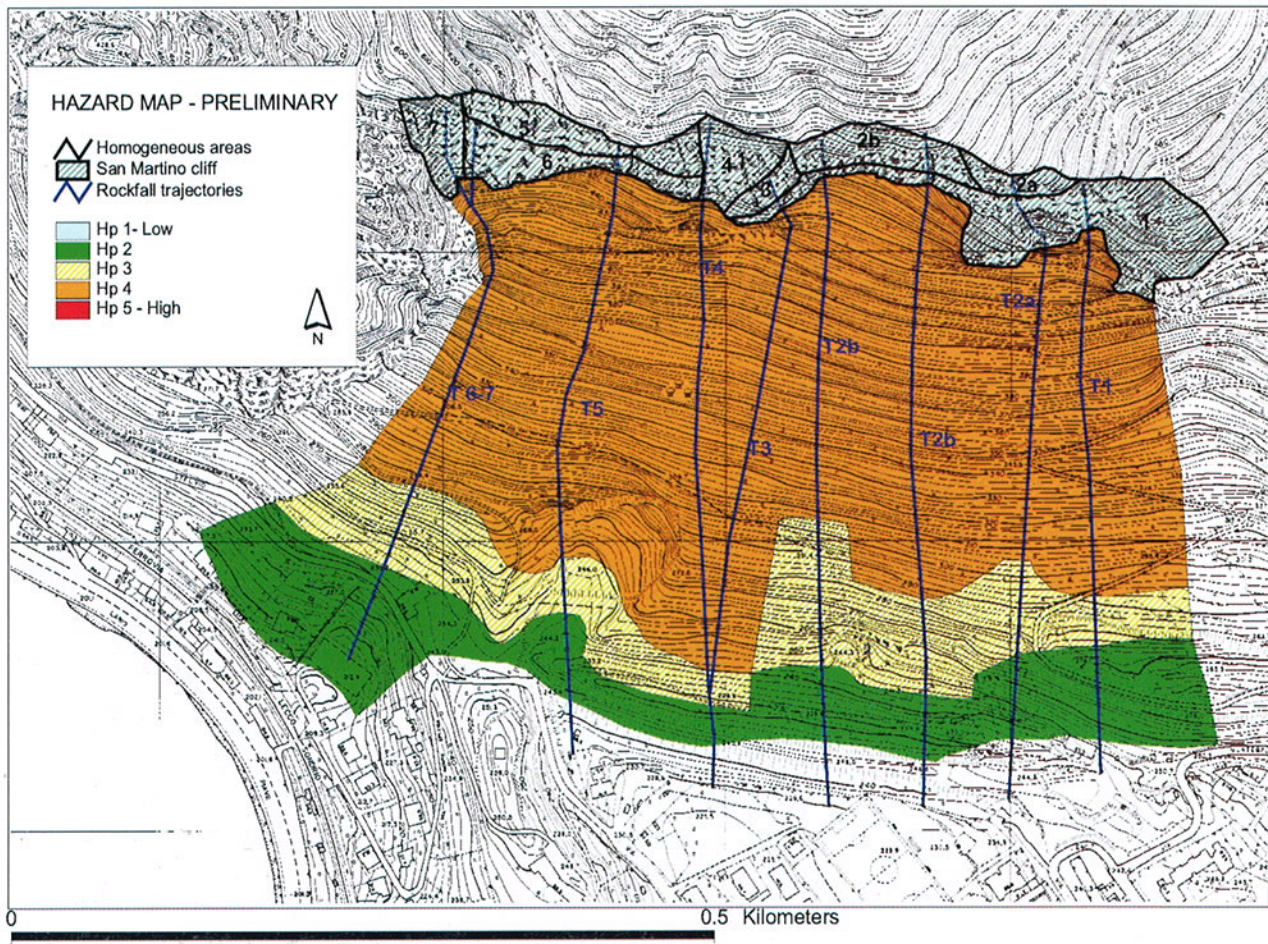


Fig. III.13: Zonazione della pericolosità preliminare.

Per l'applicazione della seconda parte della metodologia le aree omogenee sono state suddivise in maglie di 20 m di lato, per ciascuna delle quali è stato determinato il numero di elementi di instabilità presenti (Fig. III.14).

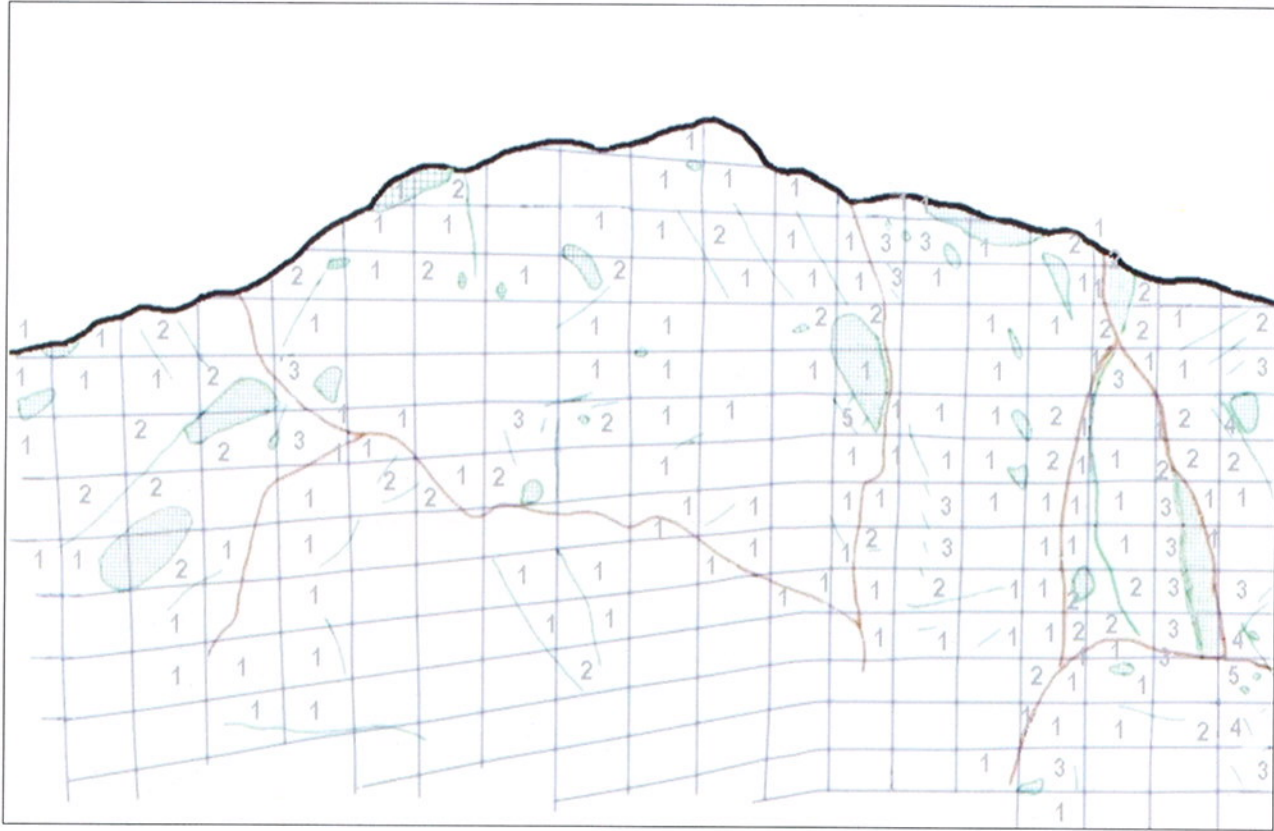


Fig. III.14: *Suddivisione in maglie delle aree omogenee. I numeri indicano gli elementi di instabilità presenti in ogni maglia, le linee e le aree in verde indicano gli elementi di instabilità, le linee rosse sono i limiti delle aree omogenee.*

Le aree omogenee sono state classificate secondo diversi gradi di attività relativa secondo la Tab. III.6.

Area omogenea	N° di maglie x 5	N° di elementi di instabilità	%	Classe
1	730	180	24,6	Media
2a	235	64	27,2	Alta
2b	230	70	30,4	Alta
3	95	33	34,7	Alta
4	280	61	21,8	Media
5	275	26	9,5	Bassa
6	360	68	18,9	Media
7	140	30	21,4	Media

Tab. III.6: *Classi di instabilità relativa per ciascuna area omogenea.*

La riclassificazione della pericolosità preliminare tramite le classi di attività relativa ha portato alla zonazione della pericolosità definitiva (Fig. III.15).

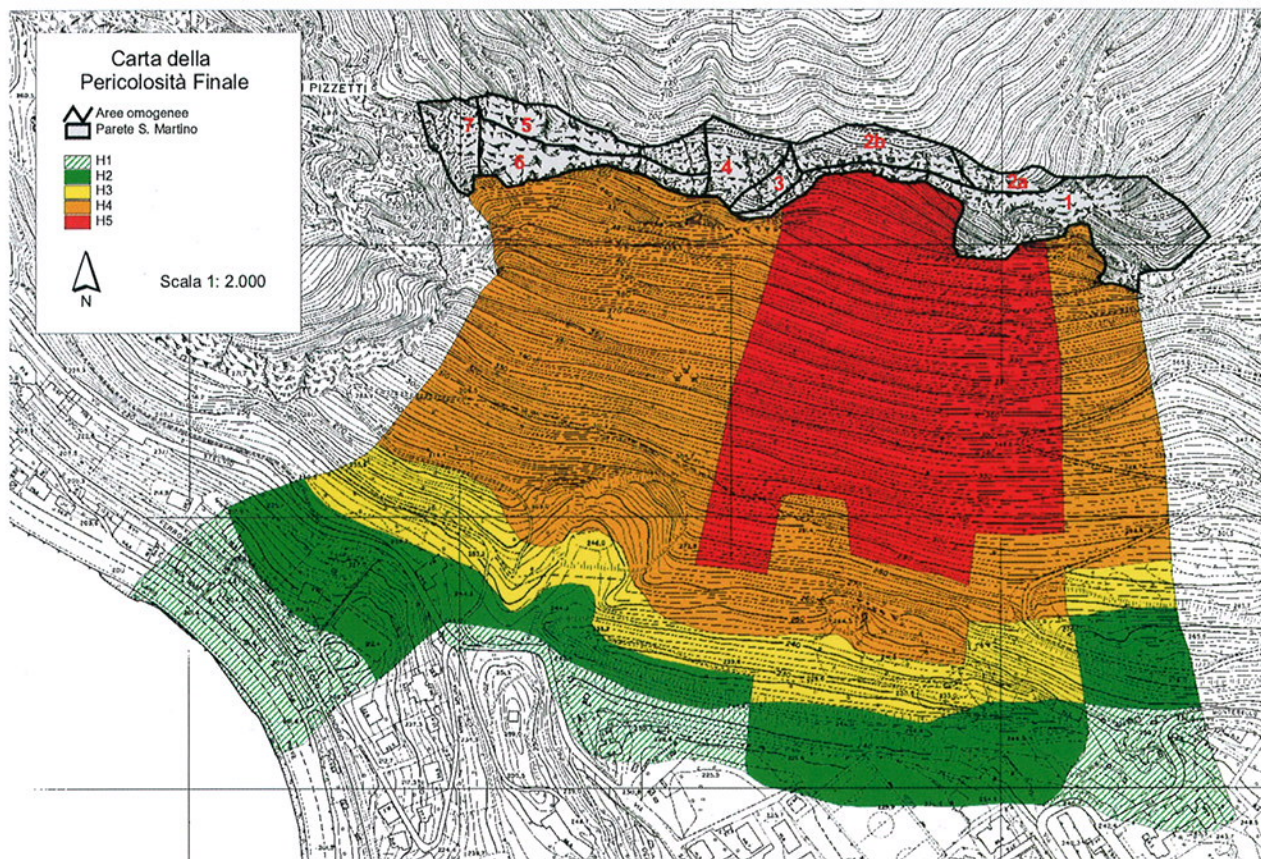


Fig. III.15: Zonazione della pericolosità definitiva dell'area del S. Martino.

BIBLIOGRAFIA

Regione Lombardia, Struttura Rischi Idrogeologici (2000) – Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio da frana in Regione Lombardia – Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia n. 51, edizione speciale del 22 dicembre 2000.

FICHE D'IDENTITÉ : SITO DEL MONTE SAN MARTINO (LECCO)

Ubicazione geografica e introduzione

Il Monte San Martino si trova a Nord di Milano, in regione Lombardia, all'estremità meridionale del lago di Como e sovrasta l'abitato di Lecco sul suo lato Nord (Fig. III.16 e III.17). In

Fig. III.16: Ubicazione geografica del Monte San Martino.

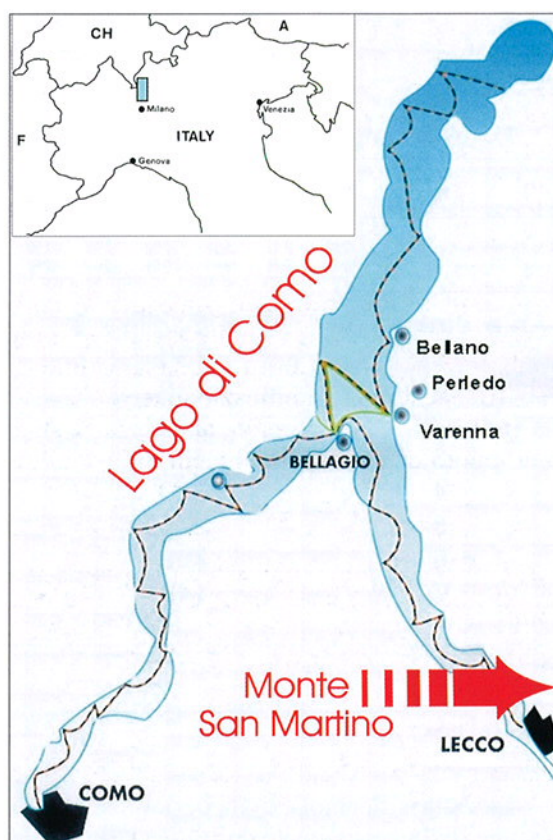




Fig. III.17: Le pareti sovrastanti l'abitato di Lecco dal Corno Medale (a destra) al Monte San Martino (al centro).

questa zona si trovano i primi rilievi montuosi a nord della Pianura Padana. Esso fa parte del massiccio del Coltignone (Coltignoncino, Corno Medale, Dente del Coltignone, Monte S. Martino) che è storicamente interessato da frane, anche d'entità notevole, legate essenzialmente all'accentuata acclività dei versanti e all'intensa tettonizzazione dei litotipi. Sono diffusi i crolli di singoli massi o, talvolta, di ingenti masse rocciose. La presenza di fratture beanti, di contropendenze e di materiale detritico presente lungo le incisioni (potenzialmente rimobilizzabile da eventi meteorici intensi) testimoniano l'attività del fenomeno.

Questo sito è stato scelto come area di applicazione delle metodologie a confronto nel progetto *Falaises* in quanto rappresenta una delle località più critiche per quanto riguarda il fenomeno dei crolli in regione Lombardia, sia per la loro frequenza ed intensità, sia per la loro interazione con le infrastrutture esistenti (Tab. III.7) e con la pianificazione territoriale.

Inoltre, per questi motivi, questo sito è stato ampiamente studiato sia da un punto di vista geologico che da un punto di vista dei fenomeni di instabilità dei versanti, e quindi si dispone di numerosi dati (Grasso,

Elementi a rischio coinvolti	Numero o tipologia
Abitanti	3000
Edifici ad uso residenziale	550
Edifici ad uso pubblico	40
Edifici ad uso produttivo	30
Vie di comunicazione	SS 36 – linea FF.SS; “Lecco–Sondrio” – strade comunali

Tab. III.7: Popolazione, fabbricati ed infrastrutture coinvolti.

1991; Bateman, 1997; Archivio Servizio Geologico, 1994-1995; Regione Lombardia, 1999; Regione Lombardia, 2000).

Inquadramento geologico, geomorfologico e strutturale

Le pareti rocciose del Monte S. Martino, costituite dai calcari dolomitici del Calcere di Esino (Triassico medio), rappresentano il fronte della scaglia tettonica del Coltignone, la più meridionale del gruppo delle Grigne. La roccia ha una stratificazione quasi indistinta, a grosse bancate con giacitura monoclinale a reggipoggio debolmente inclinata. Potenti accumuli detritici sciolti e cementati, dello spessore massimo di alcune decine di metri, contornano i fianchi meridionale, occidentale ed orientale dell'ammasso roccioso, celando parzialmente il contatto con il sottostante Calcere di Angolo. Strutturalmente l'ammasso roccioso è interessato da due fino a quattro sistemi di discontinuità ad elevata estensione bidimensionale ed ad alto indice di continuità, con valori d'immersione generalmente molto elevati. In particolare si evidenziano le principali famiglie: $S=270^{\circ}-290^{\circ}/10^{\circ}-30^{\circ}$, $K1=240^{\circ}-270^{\circ}/40^{\circ}-50^{\circ}$, $K2=235^{\circ}-270^{\circ}/75^{\circ}-90^{\circ}$, $K3=170^{\circ}-180^{\circ}/75^{\circ}-90^{\circ}$; si tratta di tipici sistemi di disgiunzione e distacco che favoriscono i naturali processi di decompressione a distribuzione relativamente parietale.

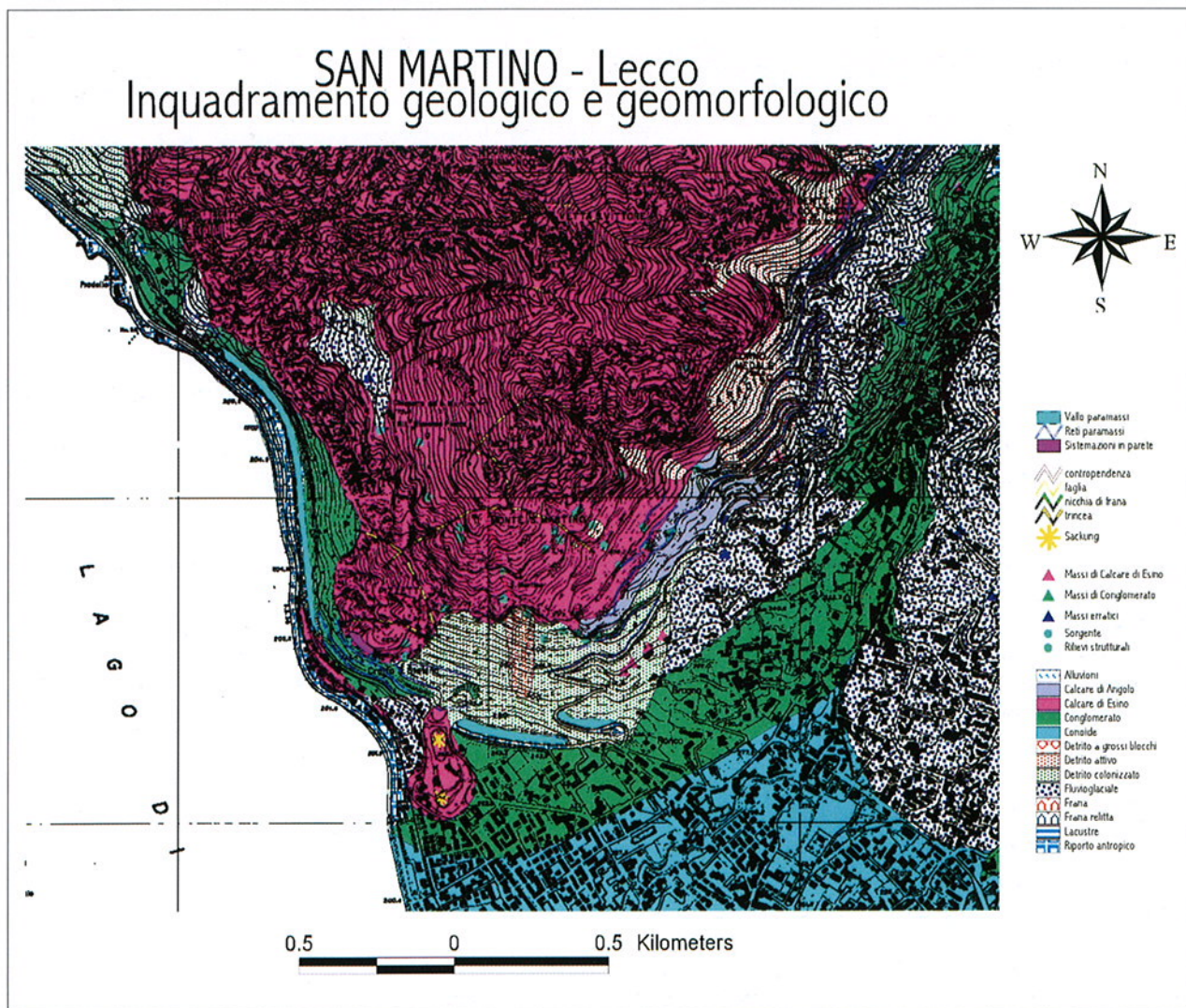


Fig. III.18: Carta geologica-geomorfologica dell'area del Monte San martino (LC).

Fig. III.19: *Nicchia di distacco del diedro roccioso franato nel 1969.*

L'area su cui sorge l'abitato di Lecco si raccorda con le pareti subverticali del S. Martino attraverso un pendio a inclinazione moderata ma costante ($33^\circ - 38^\circ$) corrispondente all'incirca all'angolo di riposo del detrito di falda di cui è costituito. Localmente associato a tale materiale si trovano sedimenti fluvio-lacustri rinvenuti fino a quote comprese tra i 270 ed i 450 m s.l.m.; da qui le pareti in roccia (che raggiungono un'altezza massima di 330 m), con andamento complessivamente a gradonata e con inclinazioni elevatissime comprese tra 70° e 90° , si sviluppano fino a quota 500-700 m s.l.m. (Fig. III.18).

Inventario delle frane e condizioni degli ammassi rocciosi

Il problema, storicamente sentito, delle frane di crollo provenienti dal Monte San Martino è stato riacutizzato dopo l'ultimo tragico evento verificatosi la notte tra il 22 e il 23 febbraio 1969 quando una frana di notevoli dimensioni ($10.000-15.000 \text{ m}^3$), staccatasi dalle pendici montuose in zona "La cava" travolgeva un edificio abitato provocando la morte di sette persone e il ferimento di altre tre (Fig. III.19).

Più recentemente, nel 1994, si è verificata una serie di crolli (sono tuttora visibili la nicchia di distacco e l'accumulo) a seguito di piogge intense. La cubatura del materiale interessato dal franamento è dell'ordine di un centinaio di metri cubi; in uno di tali eventi è stato distrutto un tratto di una barriera paramassi, ed un masso di circa 2 m^3 è stato trattenuto dal vallo paramassi sottostante.

Crolli puntuali e localizzati di piccole o medie dimensioni sono piuttosto diffusi e si verificano periodicamente, spesso in concomitanza di precipitazioni intense o cicli di gelo-disgelo.

In base ai numerosi studi effettuati sulle frane che hanno interessato la periferia settentrionale dell'abitato di Lecco, è stato possibile definire essenzialmente 3 diversi scenari:

- Frane di crollo di elevata volumetria (da 1.000 m^3 a decine di migliaia di metri cubi) per cui le opere di difesa esistenti potrebbero non essere del tutto efficaci; in particolare, tale scenario è stato segnalato come possibile nelle zone Santo Stefano (parete meridionale del Monte S. Martino), Corno Medale e pareti rocciose a W e a NNE del Corno Medale;
- Frane di crollo con volumi unitari maggiori di 1 m^3 o inferiori ma con velocità superiori a 80 km/h ; blocchi in grado di sfondare e superare almeno una barriera paramassi;
- Frane di crollo con volumi unitari inferiori ad 1 m^3 o maggiori ma con velocità inferiori a 80 km/h , in grado di essere trattenuti dalle opere attuali.

Nel corso di un recente studio, sono state catalogate le dimensioni minime, medie e massime (queste ultime volumetrie risultano comprese tra 2.2 e 4.6 m^3) dei massi già franati (Fig. III.20); tali dati sono stati quindi utilizzati per un'analisi probabilistica della caduta massi.

Infine, recenti rilievi hanno evidenziato la presenza di una massa di Calcere di Esino di notevoli dimensioni (circa 5 ha esposti in affioramento) entro il nucleo abitato di Lecco (quartiere S. Stefano), probabilmente legata ad uno scivolamento in massa di grandi dimensioni verificatosi prima dell'ultima glaciazione.



San Martino - Lecco Carta delle frane

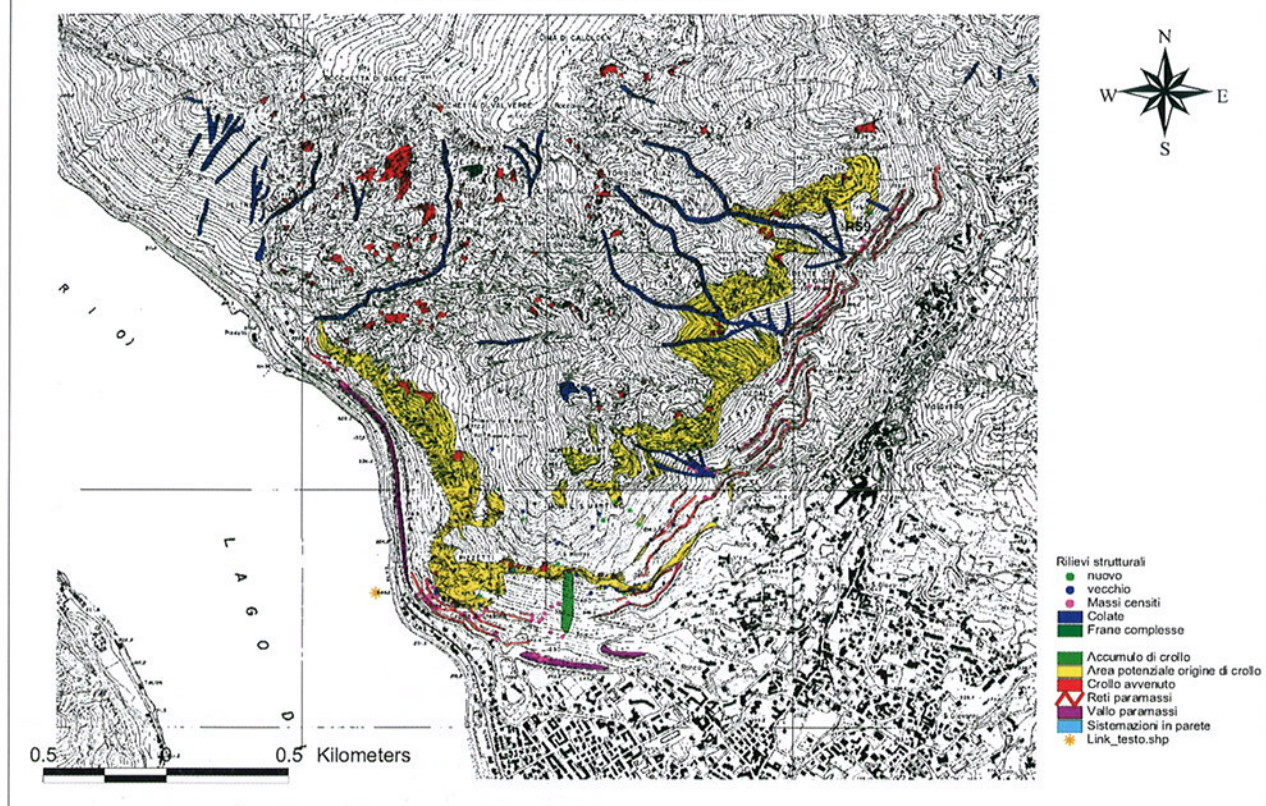


Fig. III.20: Carta inventario delle frane dell'area del Monte San Martino (LC).

Interventi di sistemazione

Dopo l'evento del 1969, a seguito sia di uno studio statistico su un modello effettuato dalla società ISMES (1972), sia di uno studio geomeccanico di Broili (1972), il Genio Civile di Como fece potenziare ed ampliare il sistema di difese passive, storicamente già presenti, con opere di pronto intervento comprendenti principalmente barriere elasto-plastiche, disgaggio di massi, consolidamento e sigillatura di porzioni rocciose instabili con resine epossidiche, costruzione di valli paramassi. Le zone maggiormente interessate da tali interventi sono distribuite, praticamente senza soluzione di continuità, ai piedi dei rilievi del S.Martino, ed in particolare comprendono le località Le Caviate, La Cava, Rancio Superiore, Laorca, Malavedo, Ronco e Brogno e la cima del Corno Medale.

Nel recente lavoro realizzato nell'ambito della redazione dello studio geologico-tecnico di supporto al Piano Regolatore Generale del Comune di Lecco e in ottemperanza alla legge nazionale 267/98, sulla zonazione dei siti a rischio, si evidenzia la necessità di interventi prioritari che, oltre alla realizzazione di disgaggi localizzati e di un monitoraggio geologico, prevedano la messa in opera di nuove reti elastoplastiche ad alta resistenza, a sostituzione ed integrazione di quelle esistenti.

Manutenzioni alle opere di difesa sono previste con finanziamenti predisposti dalle leggi nazionali 35/95, 438/95, 267/98.

Suddivisione in aree omogenee ai fini della valutazione della pericolosità da crollo con le metodologie RHAP e RES

La porzione della parete del Monte San Martino che va dalla frazione Rancio, ad Est, ai Pizzetti, ad Ovest, (Fig. III.21) è orientata all'incirca E-O, con esposizione a Sud ed ha inclinazione subverticale. La pa-



Fig. III.21: Porzione della parete del Monte San Martino oggetto di studio.

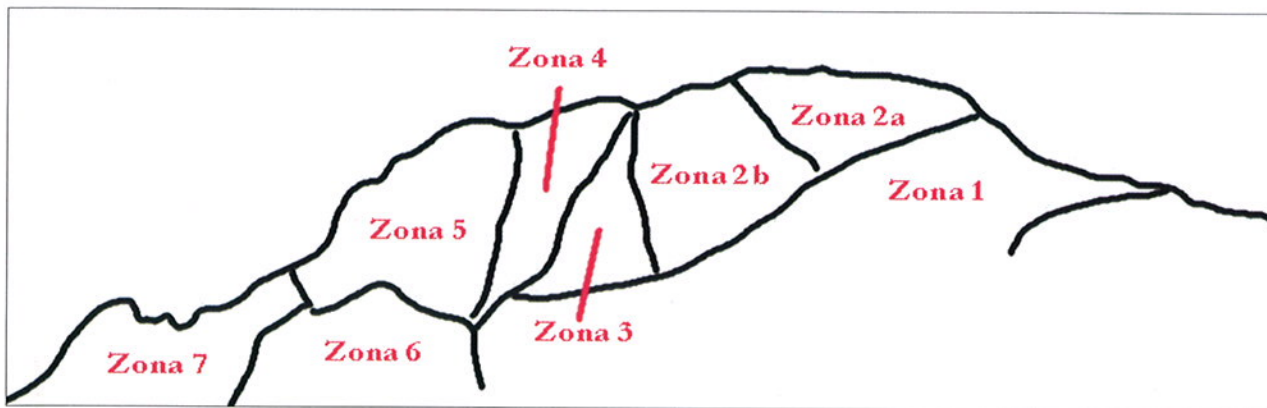


Fig. III.22: Suddivisione in aree omogenee della parete oggetto di studio.

rete è stata suddivisa in aree omogenee per caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi. Tale suddivisione è rappresentata in Fig. III.22 e ad essa verrà fatto riferimento nella presentazione dei risultati dell'applicazione delle differenti metodologie.

BIBLIOGRAFIA

- BATEMAN M. (1997) - "A rock slope stability analysis of the southernmost slopes of Monte Coltignone, Lecco, Lombardia, Italy" - Master Degree in Engineering Geology, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- BROILI L. (1972) - Studio geologico e geotecnico delle pendici del Monte S.Martino (Lecco) - ANAS, Compartimento di Milano.
- GRASSO F. (1991) - Relazione geologica e geotecnica per la realizzazione della galleria e del camino di aerazione, SS n.36" - ANAS, Compartimento di Milano.
- ISMES (1972) - Relazione di studio sull'efficacia delle opere a protezione dell'abitato di Lecco sperimentate a mezzo di un modello. Esperienze sulla dinamica di caduta di masse lapidee e verifica delle opere di protezione dell'abitato di Lecco eseguite a mezzo di un modello.
- REGIONE LOMBARDIA, Archivio Servizio Geologico (1994-1995)
- REGIONE LOMBARDIA (1999) - Studio geologico integrativo per la definizione delle aree esposte a rischio geologico nell'area ricompresa nel vincolo del S. Martino (D.P.R.219/72), con l'applicazione della metodologia elaborata dall'Ufficio Rischi Geologici della Regione Lombardia ai sensi della L.267/98. - studio De Maron E. & Alborghetti P. - Struttura Rischi Geologici.
- REGIONE LOMBARDIA (2000) - Centri abitati instabili della Provincia di Lecco - Pubblicazione CNR-GNDCI n. 2066.

III.2.3. La metodologia RES

Premessa

Questa metodologia è stata applicata dalla Struttura Rischi Idrogeologici della Regione Lombardia al sito del Monte San Martino (Lecco) per confronto con la procedura RHAP nell'ambito del presente progetto. Essa non viene utilizzata come metodologia specifica in Regione Lombardia e quindi non è associata a strumenti normativi.

III.2.3.1 Introduzione

I Rock Engineering Systems sono stati sviluppati da J.A. Hudson e dal gruppo di meccanica delle rocce dell'Imperial College di Londra a cominciare dal 1989 (Arnold, 1989; Hudson 1989, 1991, 1992a, 1992b; Hudson et al. 1991; Hudson & Harrison, 1992; Yong, 1995; Mazzoccola 1992a, 1992b; Mazzoccola & Hudson 1996; Nathanail et al. 1992).

Lo scopo per il quale la metodologia è concepita è quello di proporre una tecnica per affrontare una vasta gamma di problemi di elevata complessità che riguardino la meccanica delle rocce nel campo ingegneristico. La metodologia incorpora le teorie affermate nel settore della meccanica delle rocce, ma allo stesso tempo è concepita in modo da adattarsi a qualsiasi tipo di ricerca e di progetto (Hudson, 1992).

Questa metodologia prende le mosse dalla teoria generale dei sistemi. Una delle definizioni di sistema più citate è quella di Hall & Fagen (1956): "un sistema è un insieme di oggetti che comprende le interazioni tra gli oggetti e tra i loro attributi". Questi autori descrivono come "oggetti" le parti o componenti di un sistema, siano essi fisici o astratti, come "attributi" le proprietà fisiche degli oggetti, come "relazioni" ciò che "lega assieme il sistema". Un concetto basilare è che sta a ciascun ricercatore scegliere quali relazioni siano importanti e quali no (Thorn, 1988).

La teoria generale dei sistemi è dovuta a von Bertalanffy (1950, 1956, 1962), ma l'utilizzo della modellazione sistematica per studi geomorfologici fu promossa per la prima volta da Strahler (1952, 1980). La modellazione sistematica si sviluppa poi durante tutti gli anni '60 e '70 terminando con le più recenti applicazioni di Strahler & Strahler (1973).

Il nuovo approccio sistemico alla meccanica e ingegneria delle rocce proposto da Hudson (1992 b) è una metodologia basata sull'obiettivo prefissato, che permette l'utilizzo di tutte le informazioni collegate al problema in esame, forgiando il metodo sulle circostanze reali. Il metodo è generale, ma la caratterizzazione dell'ammasso roccioso in ciascuna località è indirizzata al particolare progetto che si vuole sviluppare, quindi il metodo non è standard, ma dipende dal motivo per cui si vuole caratterizzare l'ammasso roccioso (Hudson et al., 1991).

L'approccio metodologico RES può essere utilizzato per elaborare una caratterizzazione dell'ammasso roccioso mirata al particolare problema che si intende affrontare. A questo scopo la metodologia propone una serie di passi da seguire che sono indipendenti dal tipo di problema e che comprendono: la scelta dei parametri rilevanti per il problema in esame, l'analisi delle interazioni binarie tra parametri, la valutazione dell'importanza relativa tra le interazioni, l'assegnazione di codici a differenti classi di valori dei parametri, il calcolo finale di un "indice" dell'ammasso roccioso. La metodologia RES è stata utilizzata per scopi specifici, come ad esempio quello di differenziare porzioni di versante con diverso grado di instabilità (Mazzoccola & Hudson, 1996) o quello di definire un differente livello di pericolosità da crollo (Cancelli & Crosta, 1993 a, b, c). Per l'analisi del sito di studio verrà utilizzata sia la metodologia RES modificata per i crolli da Cancelli & Crosta (1993 a, b, c), sia un metodo speditivo sempre derivato da RES (Nathanail & Hudson, 1992; Mazzoccola, 1992 a, b) e adattato ai crolli per il presente studio.

III.2.3.2 Fasi di applicazione della metodologia RES

Scelta dei parametri rilevanti

Lo schema sequenziale da seguire per la selezione dei parametri parte dalla definizione del progetto e del tipo di ambiente e termina con una lista dettagliata dei parametri legati alle condizioni del sito, corredata da una descrizione qualitativa o quantitativa. La scelta dei parametri può essere dettata dall'esperienza esistente nel settore, dalla pratica e dalla normativa correntemente seguite, dall'applicazione dei principi di

meccanica delle rocce e dalla conoscenza delle problematiche geologico-tecniche del sito in esame. In particolare, un aiuto per la scelta dei parametri può venire dall'analisi, su basi bibliografiche, dei tipi di parametri che sono stati più frequentemente considerati per il problema in questione. La metodologia consente quindi sia lo studio di ampie aree, con l'utilizzo di parametri validi in senso generale, sia l'analisi dettagliata di piccole aree, tramite parametri di valenza locale. Nel caso dell'analisi dei crolli Cancelli & Crosta (1993 a, b, c) hanno dato un significato generale al modello in modo da consentirne l'impiego in diverse condizioni.

La caratterizzazione dell'ammasso roccioso, mirata all'instabilità dei versanti (Bieniawski, 1974; Romana, 1985), e l'esecuzione di verifiche di stabilità (cinematiche: Matheson, 1983; equilibrio limite con metodi stocastici: Scavia et al., 1988; Crosta & Locatelli, 1999) costituiscono la fase preparatoria indispensabile all'applicazione del metodo. Questa fase permette di valutare il grado di instabilità, la probabilità del verificarsi dei fenomeni di instabilità o semplicemente dei fattori di innesco. Di conseguenza, le cause di innesco non ricadono nell'elenco dei parametri che definiscono l'intensità del fenomeno di crollo, se non per il contributo della velocità iniziale (scosse sismiche o azioni antropiche) o come valore terminale di una precedente fase di scorrimento. Le cause di innesco verranno invece considerate nella definizione dei tempi di ritorno e nel processo di valutazione della pericolosità.

Cancelli & Crosta (1993 a, b, c) indicano 15 parametri, qualitativi e quantitativi, che controllano la severità meccanica e geometrica dei crolli (Tab. III.8).

n°	DESCRIZIONE	n°	DESCRIZIONE	n°	DESCRIZIONE
1	Dimensione/forma dei blocchi	6	Velocità	11	Rugosità superficie di impatto
2	Topografia/geometria versante	7	Tipo di impatto	12	Vegetazione
3	Moto dei blocchi	8	Coefficiente di restituzione	13	Altezza di caduta libera
4	Traiettoria del crollo	9	Materiale lungo versante	14	Coefficiente di resistenza
5	Massima distanza raggiunta	10	Resistenza dell'ammasso roccioso	15	Crollo di progetto

Tab. III.8: Parametri per lo studio dei crolli (Cancelli & Crosta, 1993 a).

In tale elenco sono inclusi parametri simili (moto, traiettoria blocchi) o strettamente interdipendenti (impatto e coefficiente di restituzione normale e tangenziale; materiale costituente il versante, rugosità superficie di impatto, vegetazione, materiale lungo superficie di impatto, coefficiente di resistenza). La rugosità della superficie di impatto e la presenza ed il tipo di vegetazione sono stati separati per la più facile definizione della prima e per il molteplice e complesso ruolo giocato dalla seconda (ostacoli flessibili, teneri e di facile abbattimento con effetti di deviazione, variabilità nel tempo: stagioni, incendi, disboscamenti). Allo stesso tempo non si considerano alcuni fattori (effetto combinato della temperatura e della presenza di acqua, cambiamento del grado di saturazione del materiale costituente il versante o il blocco in moto e possibilità di terreno gelato) in grado di influenzare l'impatto poichè già inclusi nei coefficienti di restituzione e nella resistenza.

La matrice delle interazioni e la sua codificazione

I parametri sopra discussi sono importanti sia singolarmente sia perché interagiscono reciprocamente, poiché la variazione di uno dei fattori può causare variazioni negli altri. Le interazioni binarie tra i parametri possono essere valutate più agevolmente utilizzando una disposizione matriciale (Hudson, 1989; Hudson & Harrison, 1992) dove i parametri sono elencati lungo la diagonale e le interazioni nelle altre caselle. Attraverso questa modalità di rappresentazione, un problema può essere analizzato in maniera complessiva e in parallelo, piuttosto che per stadi separati ed in serie (Hudson, 1989). Ciascuna riga passante attraverso un parametro lungo la diagonale principale descrive l'influenza del parametro sul sistema ("causa"), mentre ciascuna colonna descrive l'influenza del sistema sul parametro ("effetto") (Fig. III.23). Le interazioni devono essere lette in senso orario, poiché la matrice può essere asimmetrica (la Fig. III.24 mostra alcuni esempi di interazioni binarie tra parametri).

WEIGHT																CAUSE
2.5	P1	1	3	3	4	3	2	2	3	2	2	1	1	2	4	33
1.74	2	P2	3	4	3	3	3	0	2	0	1	1	3	0	4	29
2.45	2	0	P3	3	2	3	2	2	2	1	1	1	1	3	4	27
2.94	2	0	3	P4	3	3	3	3	1	1	1	1	3	2	4	30
2.63	1	0	2	2	P5	3	1	0	2	1	2	1	0	1	4	20
2.85	1	0	2	3	4	P6	3	3	1	2	0	2	2	2	4	29
2.67	3	0	2	3	3	4	P7	4	1	1	2	1	2	1	2	29
2.23	0	0	2	4	3	3	4	P8	1	1	2	0	1	1	4	26
2.54	4	3	3	3	3	3	3	3	P9	3	3	1	0	3	4	39
1.83	3	2	1	2	2	1	2	2	2	P10	1	0	1	3	2	24
1.78	0	2	2	3	2	2	3	2	0	0	P11	0	1	3	3	23
1.34	2	0	2	2	3	2	1	1	2	1	1	P12	0	2	2	21
1.6	2	0	1	2	3	2	2	1	1	2	1	0	P13	0	3	20
2.09	1	2	2	2	4	3	2	1	0	2	0	0	1	P14	4	24
2.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P15	0
EFFECT	23	10	28	36	39	35	31	24	18	17	17	9	16	23	48	748

Fig. III.23: Matrice delle interazioni per i crolli (Cancelli & Crosta, 1993a).

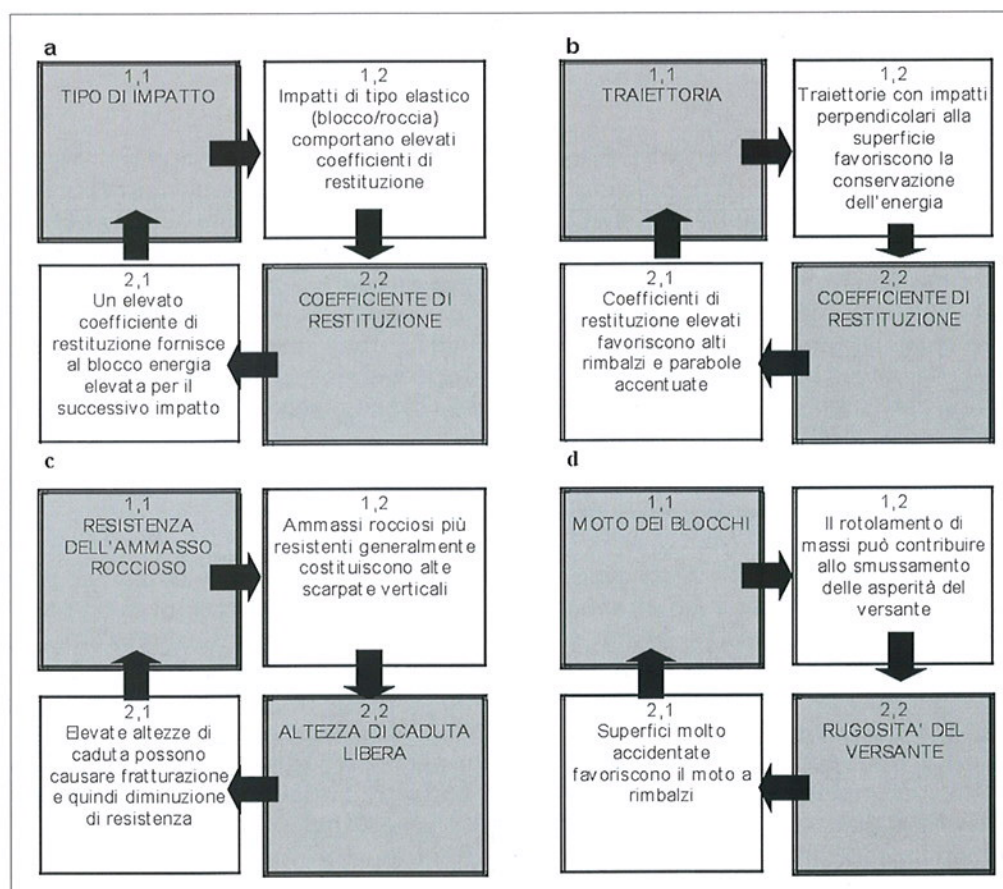


Fig. III.24: Esempi di interazioni binarie tra parametri: a, b - interazione elevata; c, d - interazione bassa.

Ciascuna riga passante attraverso un parametro descrive l'influenza del parametro sul sistema (denominata la "causa" dovuta a quel parametro), mentre ciascuna colonna descrive l'influenza del sistema sul parametro ed è denominata l'"effetto" sul parametro. Alcuni parametri avranno maggiore effetto sul sistema rispetto ad altri; a loro volta alcuni parametri saranno notevolmente influenzati dal sistema ed altri in misura minore. Per quantificare queste differenti influenze è necessario istituire un metodo di codificazione. Nel presente studio è stata scelta una codificazione semiquantitativa nella quale l'importanza di un'interazione viene espressa con un codice 0 quando è ininfluente e con codici crescenti per diversi livelli di importanza, fino ad un massimo di 4 che indica un'interazione critica (Fig. III.23). I codici sono assegnati considerando solo le interazioni binarie, cercando di depurare l'effetto della concatenazione di influenze di più di due parametri. Inoltre, i codici vengono stabiliti per confronto tenendo presente quali sono le interazioni più efficaci in questo contesto.

Dalla codificazione della matrice, per ogni parametro possono essere calcolati la causa C (somma di tutti i codici nella riga) e l'effetto E (somma di tutti i codici nella colonna) (Fig. III.23)

La somma di causa + effetto per ciascun parametro permette di valutare l'interattività (= C+E) di ciascun parametro. Il valore della somma C+E come discriminante tra i parametri è stato scelto perché qualsiasi altra combinazione algebrica di C ed E che implichi un confronto (ad esempio il rapporto C/E o la differenza C-E) sarebbe priva di un preciso significato e trascurerebbe l'effettivo valore numerico di C e di E. La somma C+E rappresenta l'interattività del parametro e mantiene un suo significato in quanto più il sistema è interattivo più è potenzialmente instabile, poiché una piccola variazione di un parametro può causare significative variazioni nel comportamento del sistema.

Istituzione di classi di valori e relativi codici per ciascun parametro

Una volta definita l'importanza relativa dei parametri, il loro effettivo valore numerico deve essere preso in considerazione. Alcuni parametri vengono descritti qualitativamente, altri quantitativamente e con differenti unità di misura, quindi non è possibile utilizzare gli effettivi valori dei parametri per calcolare l'indice di instabilità, ma devono essere assegnati dei codici a differenti classi di valori.

Per quanto riguarda i crolli si adottano le classi di valori proposte da Cancelli & Crosta (1993a), create suddividendo il campo di valori che ciascun parametro può assumere nella realtà. Ad ogni intervallo o classe viene attribuito un codice (V_i) crescente all'aumentare della criticità del fenomeno (4 classi codificate da 0 a 3) (Tab. III.9).

CODICE	PARAMETRO							
	1 DIMENSIONE BLOCCO	2 GEOMETRIA VERSANTE	3 MOTO BLOCCO	4 TRAJETTORIA BLOCCO	5 MAX DISTANZA / MAX DISTANZA AMMISSIBILE	6 VELOCITA' Max velocità nell'area in esame	7 IMPATTO	8 COEFFICIENTE RESTITUZIONE
0	< 0.1 m ³	Pendenza debole > 25°	Scivolamento	Scivolamento	< 0.3	< 5 m/s	Plastico (blocco/ terreno)	< 0.1
1	0.1 - 0.5 m ³	Rapido, canali	Rotolam / Scivolam	Rotolamento / Scivolamento	0.3 - 0.7	5 - 10 m/s	Elasto-plastico (blocco/ destrito)	0.1 - 0.3
2	0.5 - 2.0 m ³	Molto rapido	Rotolamento	Rotolamento e parabole tese	0.7 - 1	10 - 20 m/s	Elasto-plastico (blocco/ destrito/roccia)	0.3 - 0.5
3	> 2.0 m ³	Rapido, effetti 3D	Rimbalzo	Parabole alte ed effetti 3D	> 1	> 20 m/s	Elastico (blocco/roccia)	0.5 - 1

CODICE	PARAMETRO							
	9 MATERIALE VERSANTE % prevalente lungo il profilo	10 RESISTENZA AMMASSO ROCCIOSO (RMR)	11 RUGOSITA' SUPERFICIALE in base alla velocità in base all'altezza di rimbalzo	12 VEGETAZIONE	13 ALTEZZA A DI CADUTA LIBERA	14 COEFFICIENTE DI RESISTENZA (coefficiente di attrito equivalente)	15 CROLLO DI PROGETTO	
0	Terreno	classe I - II	S > 4 raggio del blocco (R)	< 0.5 R	Bosco fitto - grandi alberi	< 5 m	> 1.0	Esatto (simulazione calcolatore)
1	Detrito fine o materiale sciolto	Classe II - IV	4 - 2 R	0.5 - 1.5 R	Alberi e cespugli - rari alberi di grandi dimensioni	5 - 25 m	0.58 - 1.0	Incerto (se nessun evento progresso) (sua linea di energia)
2	Detrito grossolano o mat- denso, roccia debole	Classe IV - V	2 - 1 R	1.5 - 3.0 R	Cespugli e piccoli alberi	25 - 100 m	0.2 - 0.58	Variabilità di 2 o più parametri
3	Roccia intatta	Condizioni molto sfavorevoli (per discontinuità, volumi, ecc.)	< 1 R	> 3.0 R	Rada o assente	> 100 m	< 0.2	Estrem complesso (nessun metodo di calcolo)

Tab. III.9:
Attribuzione
di codici a classi
di valori dei
parametri
(Cancelli & Crosta,
1993a).

Rockfall Intensity Index

L'interattività di ciascun parametro è chiaramente il fattore che ne determina il peso nel sistema. Il valore (C+E) di ciascun parametro viene quindi, espresso in percentuale sul totale e scalato in modo che, per un valore massimo possibile dei codici pari a 3 (per il caso in esame), il massimo valore dell'indice sia pari a 100:

$$W_i = \text{Peso del parametro} = \frac{(C + E)}{(\Sigma C + \Sigma E)} \quad (III-8)$$

Stabilito quindi il peso di ciascun parametro e normalizzato rispetto alla sommatoria di cause ed effetti, Cancelli & Crosta (1993 a, b, c) hanno calcolato un indice di intensità dei fenomeni di crollo (Rockfall Intensity Index: R.I.I.) utilizzando il codice relativo all'intervallo di valori dei parametri (V_i) valido per il caso in esame:

$$R.I.I. = \Sigma_i V_i * W_i \quad (III-9)$$

L'indice intensità di crollo (R.I.I.) dà un'indicazione sul livello di intensità (magnitudo o severità) del fenomeno di crollo, basato su criteri geometrici e meccanici senza riferimento alla valutazione della pericolosità e del rischio.

III.2.3.3 Valutazione della pericolosità e del rischio

Il Rockfall Intensity Index è un valore legato alla suscettività dell'area in esame a essere investita da crolli. Per ottenere un valore associabile direttamente alla pericolosità occorre prendere in considerazione il numero di eventi pregressi o comunque la probabilità di accadimento di un fenomeno di crollo nell'area in esame. Cancelli & Crosta (1993 a) propongono dei codici per i quali l'indice R.I.I. viene moltiplicato per ottenere la pericolosità a seconda della probabilità di accadimento del crollo (Tab. III.10). Analogamente, per la valutazione del rischio specifico, il valore della pericolosità andrà moltiplicato per un codice relativo all'uso del territorio, differente a seconda che l'area in esame sia oggetto di una pianificazione oppure che vi siano strutture e infrastrutture già realizzate (Tab. III.10). Infine, il rischio specifico verrà moltiplicato per un ultimo codice per ricavare il rischio residuo a seconda degli interventi di mitigazione già realizzati (Tab. III.11). La pericolosità (e conseguentemente anche il rischio specifico ed il rischio residuo) può essere calcolata a differenti distanze dalla parete rocciosa, espresse come rapporto (L) tra la distanza presa in considerazione e la distanza massima ammissibile (ad esempio tra la parete ed il primo elemento a rischio oppure tra la parete ed un elemento a rischio particolarmente vulnerabile o di elevato valore).

CODICE	PERICOLOSITA'		RISCHIO	
	PROBABILITA' DI ACCADIMENTO		USO DEL SUOLO (PIANIFICAZIONE)	USO DEL SUOLO (MITIGAZIONE)
0	Nessuna		Estremamente sicuro (edifici pubblici, impianti nucleari, autostrade, ecc.)	Aree desertiche non utilizzate
0,2	Molto bassa		Insedimenti urbani, impianti industriali	Colture poco pregiate, mulattiere, transito saltuario, ecc.
0,4	Bassa		Insedimenti stagionali, impianti industriali, aree ricreative	Colture pregiate, impianti automatici, ecc.
0,6	Media		Colture pregiate, impianti automatici, ecc.	Insedimenti stagionali, impianti industriali, aree ricreative
0,8	Alta		Colture poco pregiate, mulattiere, transito saltuario, ecc.	Insedimenti urbani, impianti industriali
1	Estremamente alta		Aree desertiche non utilizzabili	Estremamente sicuro (edifici pubblici, impianti nucleari, autostrade, ecc.)

Tab. III.10: Codici per la valutazione della pericolosità e del rischio specifico (Cancelli & Crosta, 1993a).

CODICE	RISCHIO RESIDUO	
	OPERE DI DIFESA ATTIVE	OPERE DI DIFESA PASSIVE
1	Nessuna	Nessuna
0,8	Bonifica e disgaggio	Reti
0,6	Disgaggio e riprofilatura	Barriere a basso assorbimento, poche ad elevato assorbim.
0,4	Ancoraggi, shotcrete e sigillatura	Più ordini barriere elevato assorbimento, valli
0,2	Chiodatura, ancoraggi e shotcrete	Reti elastiche e valli accoppiati
0	Riprofilatura, ancoraggi e shotcrete	Combinazioni multiple di barriere rilevati, valli e gallerie

Tab. III.11: Codici per la valutazione del rischio residuo (Cancelli & Crosta, 1993a).

III.2.3.4 Applicazione della metodologia: il sito Monte San Martino (Lecco)

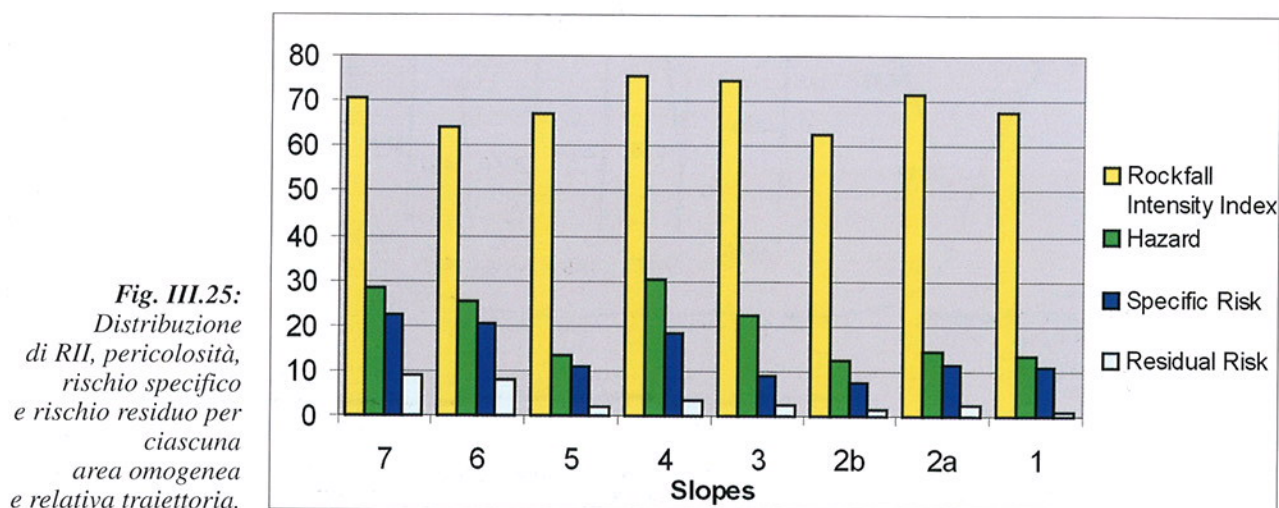
Le caratteristiche geologiche e geologico-tecniche degli ammassi rocciosi costituenti il sito studiato sono descritte nella relativa "fiche d'identità" alla fine del paragrafo III.2.2.. Per ogni area omogenea e relativa traiettoria di caduta corrispondente sono stati calcolati Rockfall Intensity Index (Tab. III.12), pericolosità rischio specifico e rischio residuo (Tab. III.13) nel punto terminale di ciascuna traiettoria (distanza massima ammissibile)(Fig. III.25). È stata inoltre calcolata la pericolosità a diverse distanze lungo le traiettorie rispetto alla distanza massima ammissibile (Tab. III.14 e Fig. III.26). La rappresentazione in pianta dei valori di pericolosità lungo le differenti traiettorie è mostrato in Fig. III.27, mentre la Fig. III.28 mostra un'interpolazione areale dei risultati.

AREE OMOGENEE	PARAMETRI															RII
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	2	1	3	3	3	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	67,63
2a	2	2	3	3	2	3	2	2	2	1	3	1	2	2	1	71,37
2b	2	2	3	2	2	1	2	2	2	1	3	1	2	2	1	62,73
3	2	3	3	3	3	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	74,59
4	2	3	3	3	3	3	2	2	2	1	3	1	2	2	1	75,74
5	2	3	3	2	2	2	2	2	2	1	3	1	2	2	1	67,32
6	1	2	3	2	3	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	63,93
7	1	2	3	3	3	2	2	2	2	2	3	1	2	2	1	70,48
Pesi dei parametri	2,5	1,74	2,45	2,94	2,63	2,85	2,67	2,23	2,54	1,83	1,78	1,34	1,6	2,09	2,14	

Tab. III.12: Rockfall Intensity Index per ciascuna area omogenea e relativa traiettoria nell'area di studio.

Aree omogenee	RII	Codice pericolosità	Pericolosità	Codice rischio specifico	Rischio specifico	Codice rischio residuo	Rischio residuo
1	67,63	0,2	13,526	0,8	10,8208	0,1	1,08208
2a	71,37	0,2	14,274	0,8	11,4192	0,2	2,28384
2b	62,73	0,2	12,546	0,6	7,5276	0,2	1,50552
3	74,59	0,3	22,377	0,6	13,4262	0,2	2,68524
4	75,74	0,4	30,296	0,6	18,1776	0,2	3,63552
5	67,32	0,2	13,464	0,8	10,7712	0,2	2,15424
6	63,93	0,4	25,572	0,8	20,4576	0,4	8,18304
7	70,48	0,4	28,192	0,8	22,5536	0,4	9,02144

Tab. III.13: Pericolosità, rischio specifico e rischio residuo per ciascuna area omogenea e relativa traiettoria.



Aree omogenee	RII	L=1-0.7		L=0.7-0.3		L<=0.3	
		Codice pericolosità	Pericolosità	Codice pericolosità	Pericolosità	Codice pericolosità	Pericolosità
1	67,63	0,4	27,052	0,8	54,104	1	67,63
2a	71,37	0,2	14,274	0,8	57,096	1	71,37
2b	62,73	0,4	25,092	0,6	37,638	0,8	50,184
3	74,59	0,4	29,836	0,6	44,754	1	74,59
4	75,74	0,8	60,592	1	75,74	1	75,74
5	67,32	0,6	40,392	0,8	53,856	1	67,32
6	63,93	0,4	25,572	0,6	38,358	1	63,93
7	70,48	0,4	28,192	0,6	42,288	0,8	56,384

Tab. III.14: Pericolosità per ogni area omogenea a differenti distanze dalla parete espresse in frazioni (L) della distanza massima ammissibile (L=1).

Fig. III.26: Distribuzione della pericolosità da crollo per ciascuna area omogenea e per differenti distanze dalla parete espresse come frazioni della distanza massima ammissibile (L=1).

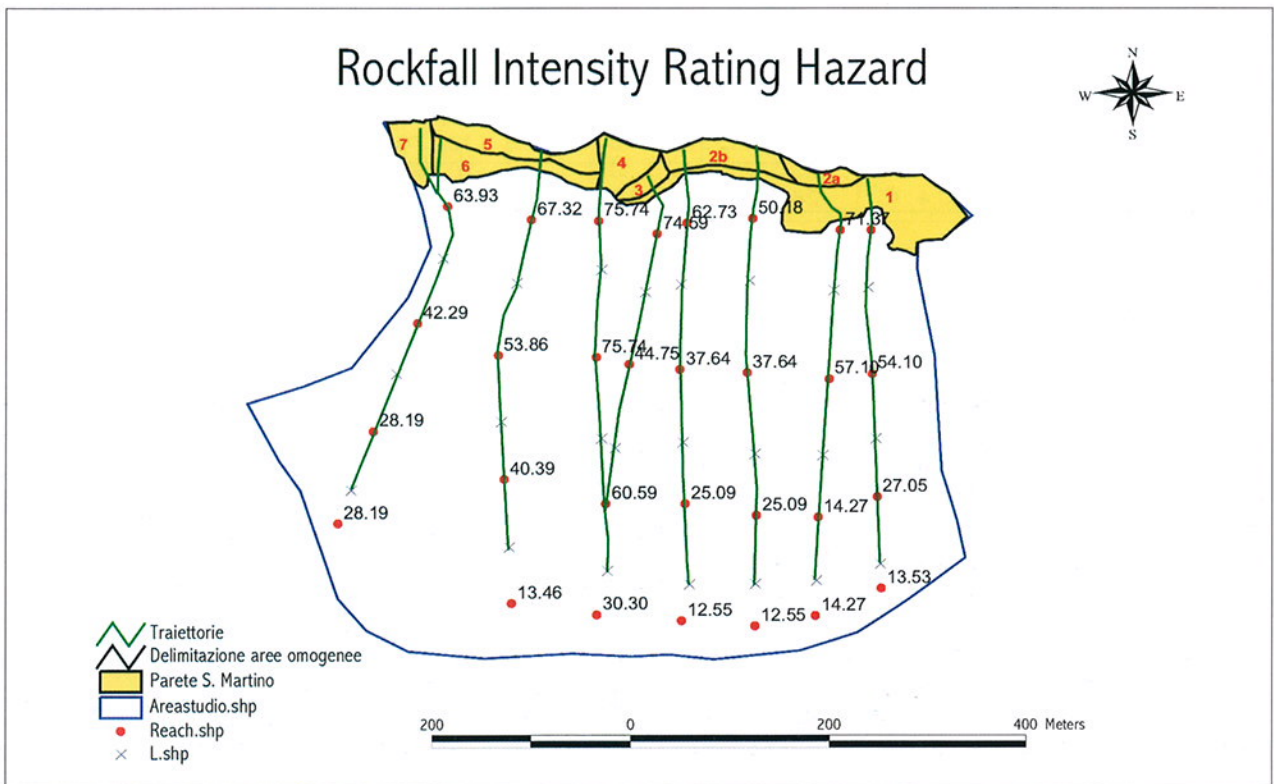
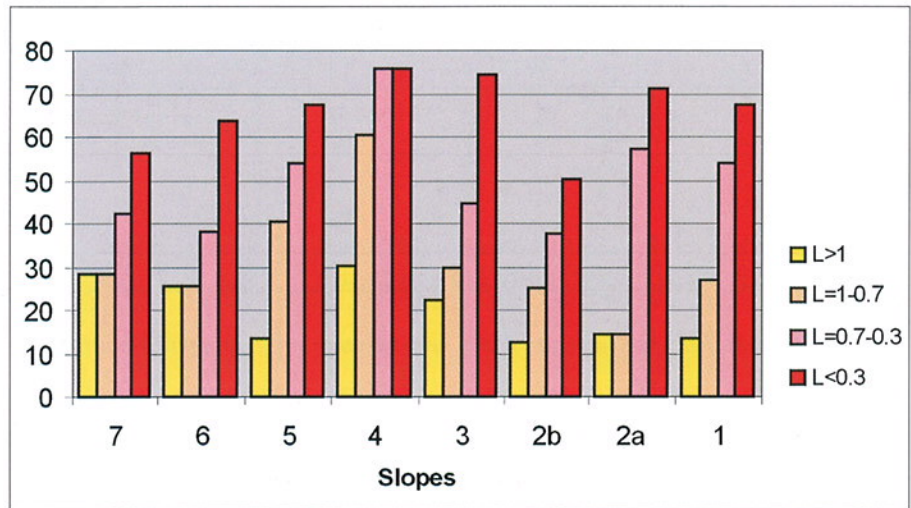


Fig. III.27: Pericolosità da crollo calcolata a differenti distanze dalla parete lungo le diverse traiettorie.

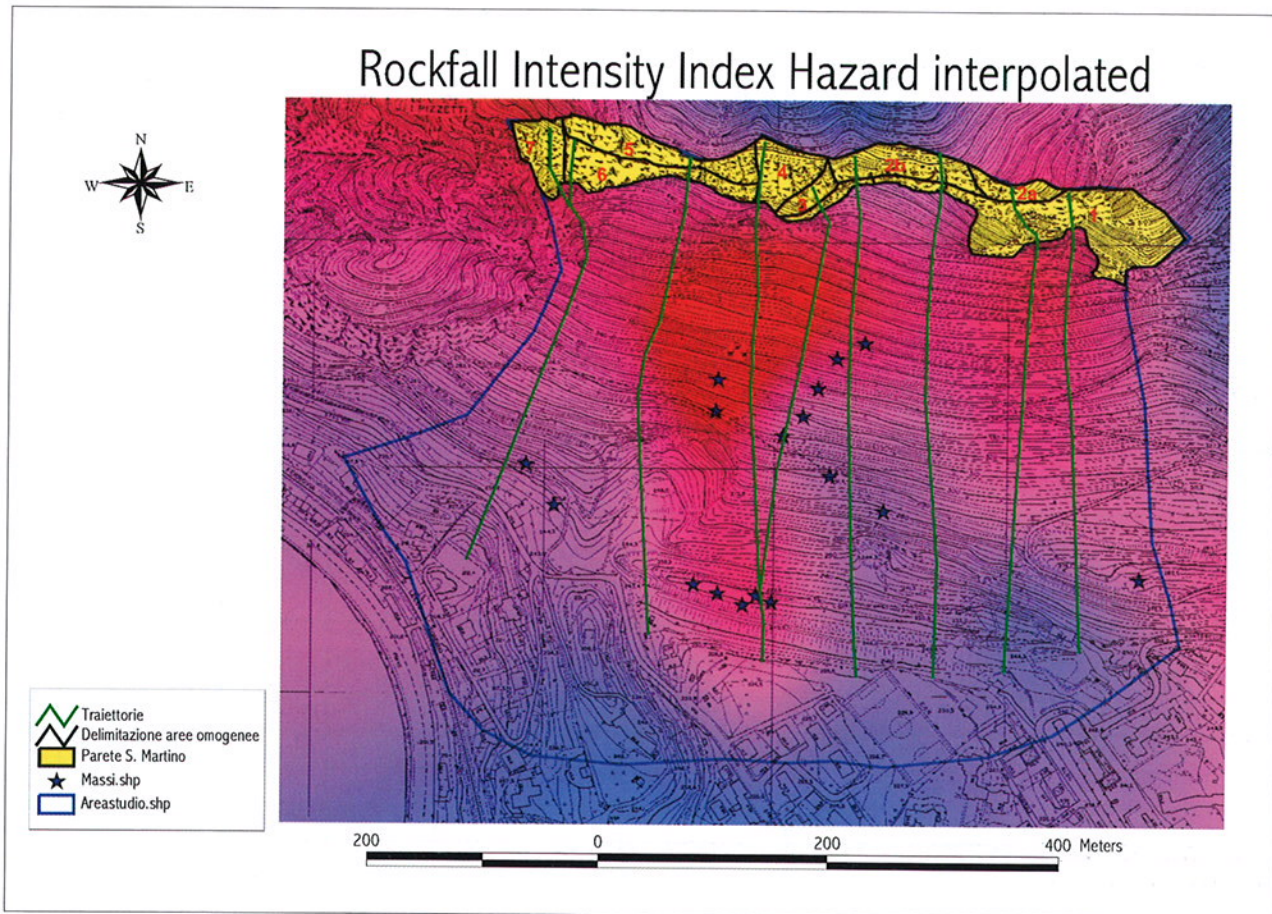


Fig. III.28: Interpolazione dei valori di pericolosità da crollo calcolati.

III.2.3.5 Metodo speditivo per la valutazione della suscettività ai crolli

In parallelo al Rockfall Intensity Index è stato anche condotto un differente tipo di analisi, più speditivo: un certo numero di parametri, facilmente riconoscibili sul terreno, sono stati giudicati indicatori significativi per prevedere l'intensità dei fenomeni di crollo. La registrazione della loro presenza o assenza in ciascuna stazione di misura ha consentito la definizione di un Rockfall Intensity Rating (RIR) (Tab. III.15). Questo indice non rappresenta una probabilità e quindi una pericolosità, ma va inteso semplicemente come un indicatore della severità di un possibile fenomeno di crollo.

La procedura qui sviluppata è ispirata al metodo utilizzato per la prima volta da Nathanail et al. (1992), per creare un sistema di "allarme" per segnalare l'instaurarsi di condizioni geologiche critiche per la stabilità di una miniera di carbone a cielo aperto. Successivamente il metodo è stato sviluppato da Mazzoccola (1992 a) e Mazzoccola & Hudson (1996) per valutare l'instabilità di versante a grande scala, e infine da Mazzoccola et al. (1998) per valutare l'attività di versanti soggetti a deformazioni gravitative profonde.

Non tutti i *rockfall intensity indicators* di Tab. III.15 hanno la stessa importanza e quindi a ciascuno di essi viene attribuito un peso variabile da 1=debole a 4=forte.

Sul terreno viene stabilito se gli indicatori sono attivi o meno (1=attivo e 0=non attivo). Per alcuni di essi questo viene giudicato semplicemente in base alla loro presenza o assenza (ad esempio trincee, faglie, blocchi ruotati); altri diventano "operativi" solo quando superano un certo valore soglia (Tab. III.15). Il passo successivo consiste nella somma dei pesi degli indicatori "attivati" per ciascun versante, per arrivare ad un Rockfall Intensity Rating preliminare.

Si è voluto poi tenere in considerazione la possibile interazione tra alcuni indicatori che, se presenti

contemporaneamente, creerebbero una situazione critica. Questi indicatori sono indicati con * in Tab. III.15 e la loro presenza contemporanea porta a moltiplicare per 1.25 il RIR preliminare, per arrivare ad un Rockfall Intensity Rating (RIR) finale (Tab. III.16 e Fig. III.29) che può anche essere espresso in percentuale sul valore massimo ottenibile se tutti gli indicatori fossero “attivi” (RIR %).

INDICATORI DELL'INTENSITA' DI CROLLO	SOGLIA	PESO INDICATORE **	AREE OMOGENEE							
			1	2a	2b	3	4	5	6	7
AREA DI ORIGINE DEI CROLLI Caratteristiche morfologiche										
Altezza della parete	>200m	1	0	0	1	1	1	1	0	0
Inclinazione della parete	>45°	2	1	1	1	1	1	1	1	1
Orientazione della parete	Sud	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Trincee parallele alla direzione della parete		1	0	0	1	1	1	1	0	1
AREA DI ORIGINE DEI CROLLI struttura dell'ammasso roccioso										
Fratture aperte	>1m	3	0	1	0	1	0	1	0	1
Discontinuità persistenti	100%	2	0	0	0	1	1	0	1	1
Tipi di meccanismo di instabilità potenziali*	>3	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Numero di potenziali meccanismi di instabilità*	>5	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Volume modale dei blocchi*	>2m ³	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Orizzonti o riempimenti a debole resistenza		2	0	0	0	0	0	0	0	0
Fasce sottili di roccia intensamente fratturata	spessore<0.5m	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cavità carsiche		1	0	0	0	0	1	0	0	0
Zone milonitiche o cataclastiche		1	0	0	0	0	1	0	0	0
Faglie		1	0	0	0	0	1	0	0	0
Segni di avvenuto distacco di blocchi*	>5	4	1	1	1	0	1	1	0	0
Blocchi ruotati o ribassati		2	0	0	1	0	0	1	0	1
AREA DI ORIGINE DEI CROLLI idrologia e idrogeologia										
Erosione torrenziale laterale		1	0	0	0	0	0	0	0	0
Erosione torrenziale al piede		1	0	0	0	0	0	0	0	0
Zone di infiltrazione idrica		2	0	0	1	1	1	1	0	1
Sorgenti		2	0	0	0	0	0	0	0	0
AREA DI TRANSITO DEI BLOCCHI										
Inclinazione	>35°	2	0	0	0	0	0	0	1	1
Gradini rocciosi		3	0	1	0	1	1	0	1	1
Detrito di falda senza vegetazione		3	1	1	1	1	1	1	1	1
Detrito/ammasso roccioso – dimensione blocchi	>1	4	0	0	0	1	0	0	0	0
Percorsi preferenziali		3	0	0	0	0	0	0	1	1
Frequenza di crolli maggiori di 2m ³ di volume*	>1/2years	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Massima distanza raggiunta*	>dist. ammiss.	4	1	0	0	1	1	0	1	1
Volume modale dei blocchi	>2m ³	3	0	0	0	0	0	0	0	0
ROCKFALL INTENSITY RATING		64	14	16	16	26	26	19	20	28
ROCKFALL INTENSITY RATING (RIR)	fattore									
Dopo la correzione per le interazioni critiche***	1.25	80	14	16	16	26	26	19	20	28
ROCKFALL INTENSITY RATING (RIR %)		100	17	20	20	32	32	23	25	35

Tab. III.15: Indicatori dell'intensità di crollo e calcolo del Rockfall Intensity Rating. **da 1=debole a 4=elevato - ***il Rockfall Rating viene moltiplicato per 1.25 se tutti gli indicatori marcati da * sono “attivi”.

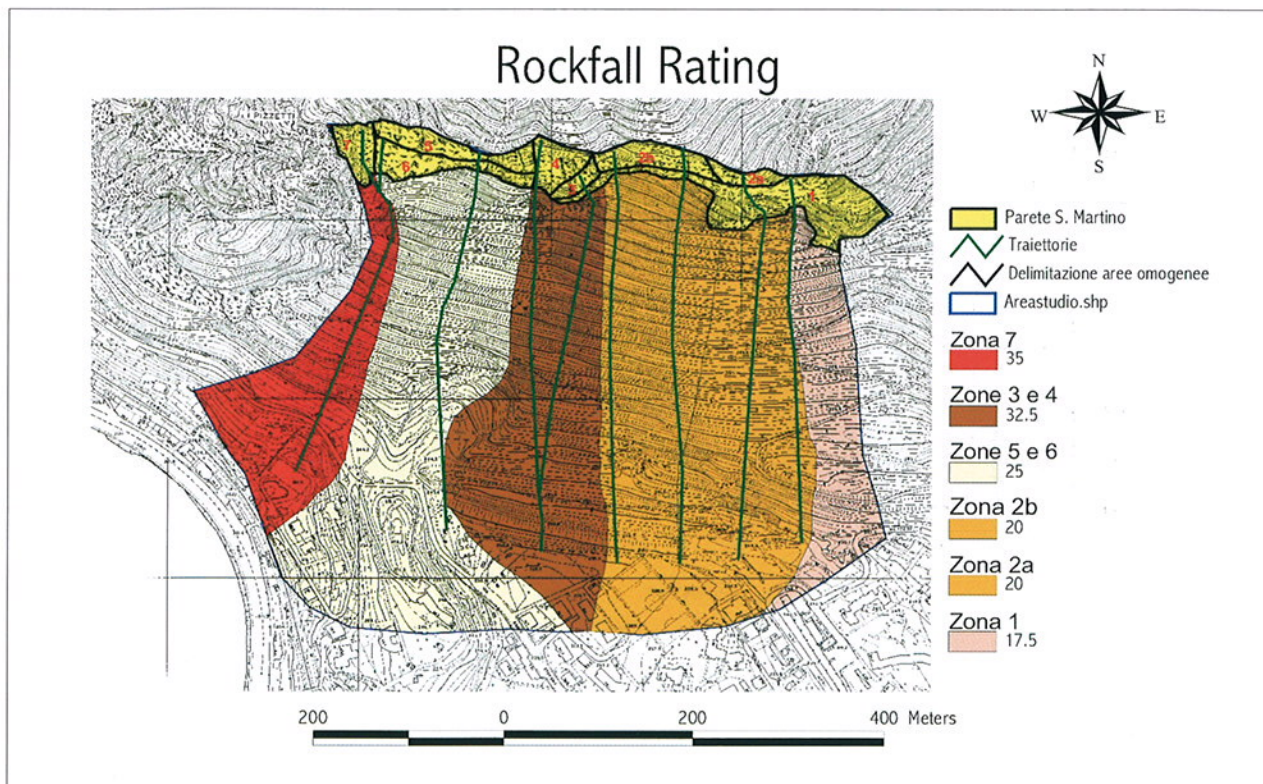


Fig. III.29: Risultati dell'applicazione del metodo del Rockfall Intensity Rating all'area di studio.

Al fine di prendere in considerazione l'effetto mitigante delle opere di protezione eventualmente presenti è stata creata una nuova tabella (Tab. III.16) in cui è stato calcolato un indice di efficacia delle opere di protezione (Protection Measures Rating = PMR) in ciascuna area omogenea e relativa traiettoria di caduta massi. Anche in questo caso un indice preliminare viene moltiplicato per un fattore maggiorativo (in questo caso pari a 2.5) se opere di protezione particolarmente efficaci, quali valli e rilevati, sono presenti. A ciascuna classe di valori di PRM viene quindi associato un fattore di riduzione per il quale il RIR viene moltiplicato e in particolare per $PMR < 5 = 0.8$; $5 < PMR < 10 = 0.6$; $10 < PMR < 15 = 0.4$; $PMR > 15 = 0.2$. In questo modo l'indice di intensità di crollo RIR viene ridotto in funzione dell'efficacia delle opere di protezione presenti (Tab. III.16 e Fig. III.30 e III.31).

OPERE DI PROTEZIONE	PESO INDICATORE	AREE OMOGENEE								
		1	2a	2b	3	4	5	6	7	
Disgaggio e riprofilatura	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Chiodi, ancoraggi e shotcrete	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
Reti singole	1	0	1	0	0	0	0	0	0	
File di reti elastiche	2	1	0	0	0	0	0	1	1	
Valli e rilevati	4	1	1	1	1	1	1	0	0	
PROTECTION MEASURES RATING	10	6	5	4	4	4	4	2	2	
PROTECTION MEASURES RATING (PMR)	fattore									
dopo la correzione per valli e rilevati*	2,5	25	15	12,5	10	10	10	10	2	2
Reduction factor due to protection measures**			0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8	0,8
ROCKFALL INTENSITY RATING CON RIDUZIONE PER OPERE DI PROTEZIONE			3,5	8	8	13	13	9,5	20	28

Tab. III.16: Protection Measures Rating e RIR ridotto in funzione delle opere di protezione presenti.

*il PMR preliminare viene moltiplicato per un fattore 2.5 se valli e rilevati sono presenti - **il RIR viene ridotto di un fattore dipendente dal PMR: $(PMR < 5) = 0.8$; $(5 < PMR < 10) = 0.6$; $(10 < PMR < 15) = 0.4$; $(PMR > 15) = 0.2$.

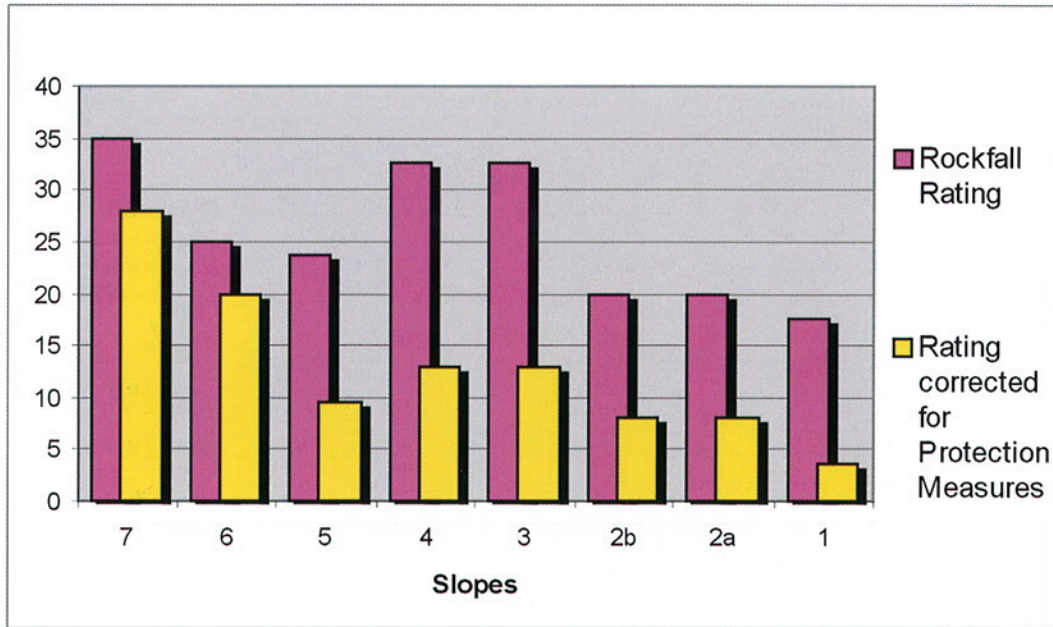


Fig. III.30: Distribuzione del Rockfall Intensity Rating e del Rating ridotto in funzione delle opere di protezione per le diverse aree omogenee e relative traiettorie nell'area di studio.

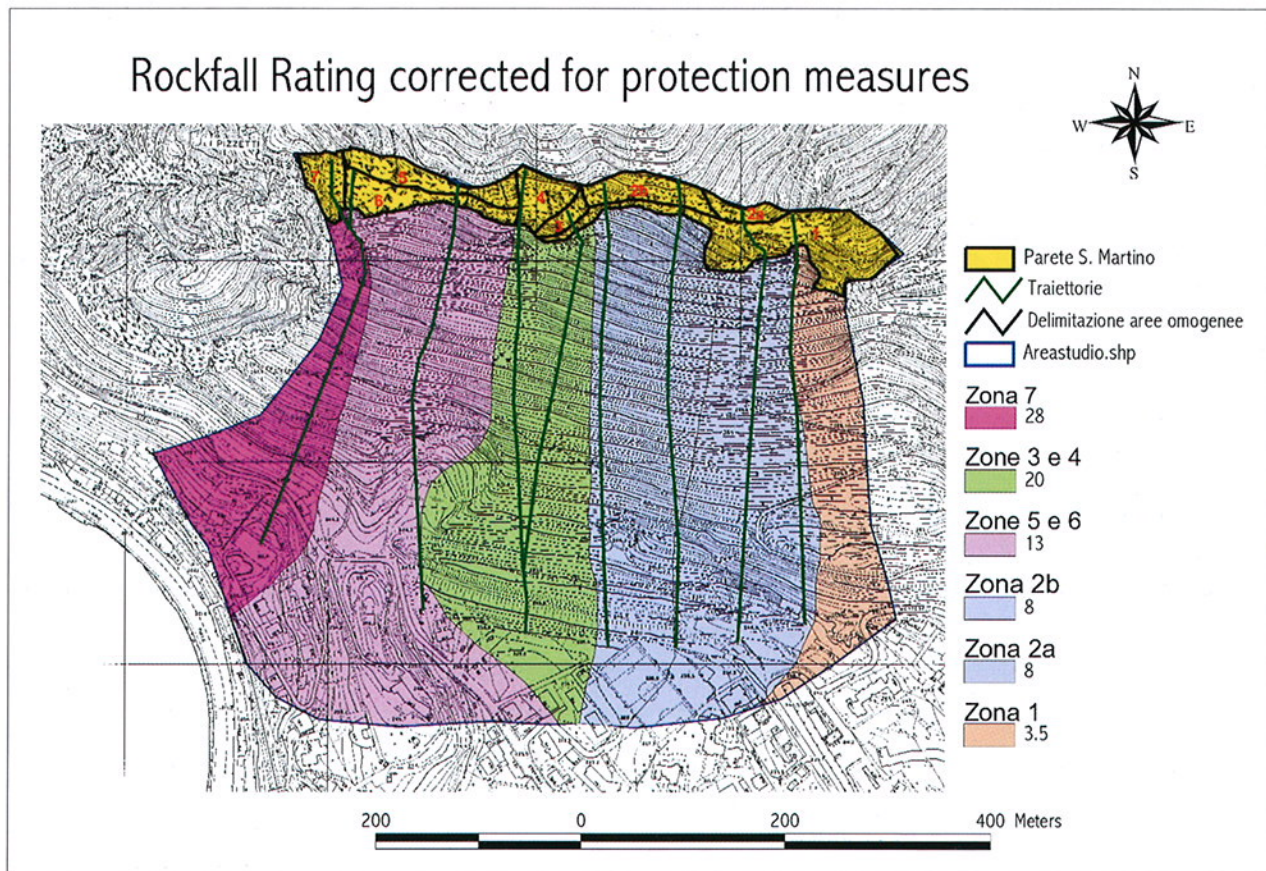


Fig. III.31: Rappresentazione del Rockfall Intensity Rating corretto in funzione delle opere di protezione per l'area di studio.

BIBLIOGRAFIA

- ARNOLD P. (1989) - Rock mass classifications for the design of rock slopes - MSc. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- BIENIAWSKI Z.T. (1979) - The geomechanics classifications in rock engineering design. Proc. IVth Int. Cong. Rock Mech., Montreaux, 2, 41-48.
- CANCELLI A. & CROSTA G. (1993) a - Hazard and risk assessment in rockfall prone areas. Risk and reliability in ground engineering - London, Thomas Telford.
- CANCELLI A. & CROSTA G. (1993) b - Rockfall hazard and risk mapping - Seventh International Conference and Field Workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics, Balkema.
- CANCELLI A. & CROSTA G. (1993) c - Rockfall hazard in Italy: assessment, mitigation and control - Environment management, geo-water and engineering aspects, Wollongong, Balkema, key lecture.
- CROSTA G. & LOCATELLI C. (1999) - Approccio alla valutazione del rischio da frane per crollo. Studi Geografici e Geologici in onore di Severino Belloni - Orombelli. Genova, Glauco Brigati: 259-286.
- HALL A.D. & FAGEN R.E. (1956) - Definition of system - Gen. Syst. Yearbook, 1, 18-28.
- HUDSON J.A. (1989) - Rock mechanics principles in engineering practice - CIRIA Ground Engineering Report: Underground Construction, 72 pp.
- HUDSON J.A. (1991) - Atlas of rock engineering mechanisms: underground excavations - Int. J. Rock Mech. Min. & Geomech. Abstr., 28, 6, 523-26.
- HUDSON J.A. (1992) a - Atlas of rock engineering mechanisms. Part 2 - Slopes - Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 29, 2, 157-59.
- HUDSON J.A. (1992) b - Rock Engineering Systems: Theory & Practice - High Plains Press (JAH), 185 pp.
- HUDSON J.A. ET AL. (1991) - Rock Engineering Mechanisms Information Technology (REMIT): Part I - The Basic Method, Part II - Illustrative Case Examples - International Symposium of Rock Mechanics - Aachim, 1113-1119.
- HUDSON J.A. & HARRISON J.H. (1992) a - A new approach to studying complete rock engineering problems - Q. J. Eng. Geol., 25, 93-105.
- MATHESON G.C. (1983) - Rock stability assessment in preliminary site investigations - graphical methods. Transport and Road Research Laboratory, Report 1039, Crowthorne, Berkshire.
- MAZZOCCOLA D. (1992) a "A new method for rock mass characterization for evaluating large scale slope instability - with an example application in the Italian Alps MSc Thesis in Engineering Rock Mechanics, Department of Mineral Resources Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK.
- MAZZOCCOLA D. (1992) b - Una nuova metodologia classificativa dell'ammasso roccioso per una valutazione preliminare dell'instabilità di versante a grande scala - Atti II Conv. Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Viterbo, in stampa su Geologica Romana, 30.
- MAZZOCCOLA D. & HUDSON J.A. (1996) - A new rock mass characterisation method for indicating large scale instability with an example application in the Italian Alps - Quarterly Journal of Engineering Geology, 29, 37-56.
- MAZZOCCOLA D., LAFFI R., SCIESA E. & PRESBITERO M. (1998) - State of activity evaluation for landslides in deep-seated slope deformation areas - Proceedings of the 8th Congress of the International Association of Engineering Geologists, Vancouver, 21-25 September 1998, Balkema, 2, 1209-1216.
- NATHANAIL C.I. ET AL. (1992) - A stability hazard indicator system for slope failures in heterogeneous strata - EUROCK '92 Int. ISRM Symp. on Rock Characterization, 14-17 September 1992, Chester, U.K.
- ROMANA M. (1985) - SMR classification. Int. Symposium of Rock Mechanics, Aachen, 955-960.
- SCAVIA C., BARLA G. & VAI L. (1988) - Analisi di tipo probabilistico. Il ciclo di conferenze di Meccanica e Ingegneria delle Rocce: Pendii naturali e fronti di scavo, Torino, 12, 27 pp.
- STRAHLER A.N. (1952) - Dynamic basis of geomorphology - Bull. Geol. Soc. Am., 63, 923-38.
- STRAHLER A.N. (1980) - Systems theory in physical geology - Phys. Geog., 1, 1-27.
- STRAHLER A.N. & STRAHLER A.H. (1973) - Environmental geoscience: interaction between natural systems and man - Santa Barbara, CA, Hamilton.

- THORN C.E. (1988) - Introduction to theoretical geomorphology - Unwin Hyman.
- VON BERTALANFFY L. (1950) - An outline of General System Theory - Br. J. Phil. Sci., 1, 134-65.
- VON BERTALANFFY L. (1956) - General System Theory - Gen. Syst., 1, 1-10.
- VON BERTALANFFY L. (1962) - General System Theory: a critical review - Gen. Syst., 7, 1-20.
- YONG J. (1995) - Formalizing the systems approach to rock engineering - PhD Thesis Department of Mineral Resources Engineering, Imperial College, London, UK.

III.2.4. La méthodologie LPC (réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées)

Le présent document est un résumé succinct du guide actuellement en cours de finalisation dans le réseau des LPC. Ce guide a pour objectif de formaliser les pratiques progressivement mises au point et affirmées à travers, les nombreuses études produites depuis plus de 20 ans tant pour les grands Services opérationnels de l'Etat que pour les collectivités locales.

Les grandes lignes du document sont présentées ci-après, en insistant notamment sur les actions préalables à la qualification des aléas. C'est l'ensemble de la méthodologie d'étude des aléas rocheux qui est décrite, ceci recouvrant bien sûr l'estimation de la dangerosité.

Afin d'éviter toute ambiguïté dans la lecture de ce qui suit, nous signalons que les termes spécifiques utilisés sont issus d'une longue pratique au sein du réseau des LPC et de leur ministère de tutelle, ceci pouvant impliquer quelques différences par rapport à la nomenclature proposée dans le glossaire INTERREG.

L'exemple présenté au fil du texte est tiré d'une étude spécifique réalisée en Tarentaise (Savoie).

III.2.4.1 Définition de la notion d'étude spécifique

Il s'agit d'une recherche détaillée et exhaustive sur un site délimité des aléas d'éboulements rocheux présents et des mesures de sécurisation les mieux adaptées (induit la prise en compte de la vulnérabilité). Ici, seuls sont abordés les aspects détection, qualification et affichage des aléas, à l'exclusion de la définition et du dimensionnement des parades.

La démarche est en général initialisée, soit à l'occasion d'incidents de chute de blocs isolés ou récurrents, soit à l'occasion de travaux d'amélioration de la géométrie d'un itinéraire en site montagneux, ou encore dans le cadre de travaux neufs comportant des talus rocheux de grande hauteur.

Les études spécifiques sont plus particulièrement orientées vers la réduction du risque par différence avec les études cartographiques destinées préférentiellement à l'affichage du risque, au zonage réglementaire ou se situant à un niveau préliminaire.

III.2.4.2 Définition du cahier des charges d'une étude spécifique

Il est indispensable de fixer un cadre préalable à l'étude spécifique, ceci nécessite en général une visite préliminaire de cadrage sur le terrain avec le service demandeur de l'étude :

Objectif de l'étude

Le niveau de détail fourni par l'étude est à afficher clairement, par exemple on pourra a priori ne pas s'intéresser aux chutes de pierres si la végétation des pentes inférieures est abondante. A l'inverse, les chutes de pierres ou petits blocs pourront faire l'objet d'une action spécifique dans le cas de la mise à niveau ou de la vérification d'un système de détection type nappe de fils SNCF.

Délimitation de la zone d'étude

À défaut d'être connues ou prédéterminées, les limites devront être précisées dans la proposition d'étude.

Détermination de la période d'étude

Il est important de spécifier la durée et le moment dans l'année où sera réalisée l'étude pour éviter notamment la période de végétation abondante ou la neige.

Teneur de l'étude

La teneur de l'étude est à préciser clairement en fonction des objectifs

- recherche et exploitation des archives
- utilisation des cartes et documents existants
- travaux photopographiques spécifiques (définition et programmation de la sous traitance)
- travaux de terrain

- simulations trajectographiques
- synthèse
- documents à produire

Inventaire des documents nécessaires

Ce point de la démarche vise à s'assurer, dès la phase de commande de l'étude, d'avoir à disposition en temps utile les outils de représentation topographique et géométrique du terrain. Sont plus particulièrement concernés : les achats de cartes, agrandissements, photos aériennes, levés topo spécifiques, couvertures photo spécifiques, etc.

III.2.4.3 Analyse d'ensemble

Cette phase concerne la description d'ensemble du site d'investigation à travers la prise en compte des rubriques suivantes, de manière non exhaustive et en s'adaptant au contexte :

- Les travaux phototopographiques préalables : choix des supports topographiques, couvertures photographiques (verticale, oblique, plan de vol), plan photogrammétrique, levés au sol ;
- L'approche morphologique ;
- L'approche géologique ;
- L'approche structurale ;
- L'approche hydrologique, hydrogéologique et climatique ;
- Les données relatives au couvert végétal ;
- L'approche historique ;
- Les mécanismes d'évolution (à l'échelle de l'ensemble du site).

Après cette approche préliminaire générale, la **zone d'étude** peut être **partagée en secteurs homogènes**, essentiellement sur la base des critères topographiques, morphologiques, pétrographiques et structuraux. Ce premier zonage est très important en ce sens qu'il va **implicitement regrouper des populations d'aléas à caractéristiques voisines**, en préparation à l'étape d'identification et de caractérisation des compartiments de stabilité douteuse qui fait l'objet du paragraphe suivant.

III.2.4.4 Identification et caractérisation des instabilités potentielles

Définition et objectif

Cette étape de la démarche vise à **individualiser** et à **désigner**, puis à **caractériser** à l'intérieur de chaque secteur défini à l'étape précédente les **sous ensembles rocheux** ou "**compartiments**" susceptibles de présenter un risque d'éboulement ou de remise en mouvement (Fig. III.32).

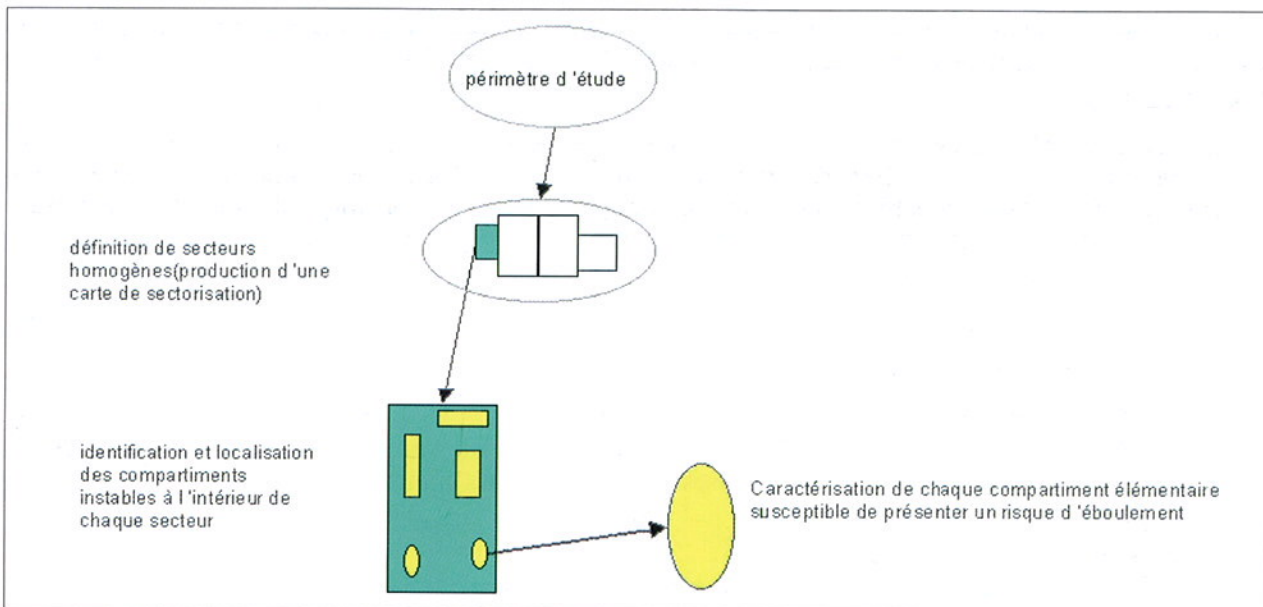


Fig III.32 : Synoptique de la démarche globale de recherche et caractérisation des aléas rocheux.



Fig III.33 : Vallée de la Tarentaise - Savoie - Secteur d'étude n°2 - "Vue d'ensemble et repérage des compartiments" : en vert, compartiments et ensembles à caractériser, en rouge, traces des trajectoires déterminées à partir de l'analyse de la topographie sur le plan du site au 1/2000^e et pouvant le cas échéant être utilisées pour effectuer des simulations de propagation.



Fig III.34 : Vallée de la Tarentaise – Savoie – Secteur d'étude n°2 - Exemple de Compartiment instable (n° P2-13) - Schistes Foliation subverticale Glissement dièdre - Dislocation.

Identification - localisation

Le repérage exhaustif des compartiments " douteux " nécessite une **reconnaissance de terrain détaillée**, avec l'appui de plans détaillés et des prises de photos sous les angles les plus appropriés (Fig. III.33).

Caractérisation des compartiments instables

La notion de compartiment correspond à la plus petite structure instable physiquement individualisable sur le terrain. Par compartiment instable, il faut entendre également des ensembles regroupant plusieurs éléments dont la stabilité est liée (Fig. III.34).

Nature

On distingue :

- la **typologie** du compartiment (colonne, écaille, surplomb, etc.). Le type de rupture le plus probable est identifié par référence à les figures II.4 et V.1;
- sa **lithologie**
- sa **structure** (détermination des données structurales principales délimitant le compartiment)

Ces critères complétés par les autres éléments de caractérisation des compartiments (cf. ci-après) et des photographies caractéristiques aboutit à la constitution de véritables fiches d'identité.

Caractérisation géométrique

Dans cette étape de la caractérisation, vont être déterminés : le volume, la forme, la localisation et l'orientation des discontinuités déterminant les contours de chaque compartiment et la/les surface(s) ou point(s) de rupture supposé(s) du compartiment par rapport au massif.

Caractérisation géomécanique

La détermination de ces paramètres fondamentaux impose la visite au plus près du compartiment considéré. Il est procédé à l'identification et à la caractérisation de la ou des surfaces de rupture jugées déterminantes dans le modèle :

- type (plan de schistosité, de stratification, diaclase, faille, fracture, joint de retrait, etc.) ;
- degré d'imbrication des épontes (rugosité, morphologie, ouverture, etc.) ;
- indices de mouvement, dilatance ;
- remplissage (origine endo ou exogène, cimentation, etc.) ;
- présence, rôle de l'eau ;
- appréciation de l'angle de frottement du plan considéré, idem pour la cohésion ;
- évaluation, calcul sommaire de stabilité (glissement, basculement, etc.).

Paramètres topographiques

Position dans le versant, éperon, plan de falaise, etc..

Environnement (au sens large)

Hydrogéologie, hydraulique- Climat, orientation - Végétation

III.2.4.5 Qualification de l'aléa

(estimation de la dangerosité ou probabilité de rupture d'un aléa identifié)

Les éléments recueillis dans la phase de caractérisation des compartiments potentiellement instables sont complétés en prenant en compte les processus d'évolution dont dépend la régression de la stabilité conduisant à l'écroulement.

Les conditions de stabilité actuelle sont ensuite évaluées à travers la procédure dite de qualification des aléas.

Processus d'évolution

On fait une description du/des processus d'évolution de la stabilité.

Qualification de l'aléa de rupture

On caractérise l'aléa de rupture par l'évaluation de ses deux composantes : classe, probabilité/délai.

Classe :

concerne le volume du phénomène, elle est définie à partir de la grille suivante :

Cp : chutes de pierres, vol unit $< 1 \text{ dm}^3$

Cb : chute de blocs, vol unit /m³ jusqu'à xm³, peut dépasser 100 m³

Ebl : éboulement en masse limité < quelques centaines de m³

Ebm : éboulement en masse, volume simultané $< 1 \text{ hm}^3$

La différenciation entre les deux dernières classes peut s'avérer délicate pour les très grands volumes,

le diagnostic peut nécessiter des investigations importantes. A priori pour le type d'études couvertes par la présente méthodologie, les éboulements en très grande masse impliquant une fluidisation des matériaux au cours de la phase de propagation ne sont pas concernés.

Probabilité / délai d'occurrence – grille de qualification

Pour chaque compartiment, l'évaluation de la stabilité et de la dynamique d'évolution sont traduites dans la matrice probabilité / délai par le choix des classements jugés les plus cohérents. Cette notion volontairement qualitative basée sur le jugement du chargé d'étude désigne la probabilité que le compartiment étudié s'éboule dans un temps donné. Pour formuler son jugement, le chargé d'étude doit au préalable procéder à une analyse détaillée en considérant les "Types de ruptures" et les "Processus d'évolution".

Probabilité d'occurrence

- te** = très élevée 9 chances sur 10 (*)
- e** = élevée 7 chances sur 10
- m** = modéré 5 chances sur 10
- f** = faible 3 chances sur 10
- tf** = très faible 1 chance sur 10

(*) La traduction chiffrée de la probabilité d'occurrence est donnée ici à titre indicatif. Ce mode de représentation d'une appréciation qualitative n'est plus utilisé dans le réseau des LPC pour ne pas introduire une illusion de maîtrise statistique de l'occurrence du phénomène.

Délai d'occurrence

- i** = imminent risque imminent
- tct** = très court terme dans les deux ans
- ct** = court terme dans les 10 ans
- mt** = moyen terme dans les 30 ans
- lt** = long terme entre 30 et 100 ans

La durée des périodes considérées dans l'échelle des délais est définie en tenant compte du rythme d'activité des phénomènes d'évolution naturelle (cycles saisonniers notamment) et des délais caractéristiques des programmes de sécurisation.

La notion de probabilité /délai est définie comme une variable à deux dimensions prise en compte à l'aide de la grille de qualification :

Délai	i <i>(immédiat)</i>	tct <i>(très court terme)</i>	ct <i>(court terme)</i>	mt <i>(moyen terme)</i>	lt <i>(long terme)</i>	>lt
Probabilité						
te (très élevée)						non
e (élevée)				X		quali-
m (modérée)			X			fia-
f (faible)						ble

On remarque que la grille probabilité / délai comporte en général plusieurs valeurs de qualification (X) correspondant à des couples probabilité / délai différents. Ces différentes qualifications sont complémentaires et doivent être interprétées en fonction de la vulnérabilité et des objectifs de sécurité (protection, aménagements). Cette déclinaison correspondant à des délais différents est généralement exploitée pour apporter la meilleure réponse à l'intensité du risque : action rapide pour les classes de délais les plus courts, programmation d'actions préventives pour les délais les plus longs.

A l'issue de l'analyse, seuls sont retenus les aléas ayant pu être cadrés par la grille de qualification. Les autres aléas, non qualifiables pour le moment sont conservés en archive de façon à permettre une requalification ultérieure si une évolution est constatée.

Exemple : n° de compartiment qualification rupture
P2-13 m ct \Leftrightarrow e mt

Blocométrie prévisionnelle

La prévision du découpage des blocs au cours de leur chute sera utilisée, entre autres, pour les dimensionnement d'ouvrages.

Exemple : n° de compartiment volume fragmenté après propagation
P2-13 $\geq 10 \text{ m}^3$

Conclusion sur l'analyse de stabilité

La méthode CETE ne propose volontairement qu'une approche qualitative des paramètres de mécanisme de rupture et de processus d'évolution, les approches paramétrale indicée et matricielle n'ayant pas jusqu'à présent démontré une fiabilité opérationnelle suffisante.

Indépendamment des aspects de fond, il faut remarquer que l'identification et l'affichage de tous les paramètres décrits pour chacun des compartiments " candidats " identifiés apporte une dimension de traçabilité intéressante que ce soit en terme de suivi d'affaire ou en terme de responsabilité pénale. Les résultats sont stockés sur des grilles récapitulatives de synthèse par secteurs. Les compartiments sont identifiés et positionnés sur des plans et photographies.

III.2.4.6 Estimation de la trajectoire

Avant d'envisager une étude de propagation de l'éboulement à l'aide d'une simulation numérique, il convient d'effectuer une approche qualitative prenant en compte les critères relatifs aux conditions de départ, ceux relatifs au versant dans lequel se propagent les éboulis, et éventuellement les caractéristiques des zones d'épandage. L'observation des éboulis présents sur le site et dans les zones connexes, le recueil circonstancé de témoignages et de phénomènes archivés vont apporter des indications qui pourront être d'importance. Le relevé d'impacts, au sol et sur la végétation, pourra également apporter des informations relatives au comportement général du versant vis à vis des éboulements.

Influence des conditions de départ

Le volume global de l'éboulement, la taille des blocs susceptibles de se former au premier impact ou au cours des premiers rebonds, la hauteur de chute libre éventuelle, vont influencer de manière très directe sur l'amorçage du phénomène de propagation. L'influence de ces différents paramètres initiaux sera d'autant plus grande que le versant sera court. Pour des propagations longues, les conditions rencontrées tout au long du versant deviendront alors prépondérantes.

Influence des conditions de propagation

Passée la phase d'initialisation, la propagation des blocs va être conditionnée par la nature morphologique et physique du versant :

- pente générale du versant
- déviations latérales par rapport à la ligne de plus grande pente (initiées dès le départ, ou provoquées par effet de thalweg)
- présence d'irrégularités morphologiques (ruptures de pente pouvant permettre un accroissement d'énergie, replats pouvant avoir un effet ralentisseur ou, au contraire, un effet de tremplin, etc.)
- nature et épaisseur des formations superficielles (comportement variable en fonction de l'énergie des blocs)
- nature du substratum (qui peut être atteint par poinçonnement dans certaines conditions)

Les obstacles, qu'ils soient naturels ou artificiels, rencontrés au cours de la propagation sont à prendre en compte, et à pondérer en fonction des énergies mises en jeu :

- couvert végétal, forêt (la qualité et la densité du peuplement peut jouer un rôle important dans le cas d'éboulements modestes)

- contre-pentes naturelles
- ouvrages de stabilisation des versants (murets, perrés, etc. dont le rôle peut être positif ou négatif)
- éboulis à gros blocs
- ouvrages de protection déjà en place (à apprécier au regard des énergies en jeu)

Appréciation qualitative globale de la probabilité de propagation

La probabilité de propagation des éboulis jusqu'à un objectif est à apprécier à la lumière des critères précédents, à l'exclusion de toute référence à la probabilité de réalisation de l'aléa de rupture. Elle pourra être nulle, très faible, faible, modérée, élevée ou très élevée. L'expérience du géologue vis-à-vis des phénomènes rocheux aura un effet prépondérant sur l'intégration et la pondération des données collectées.

Cette première approche qualitative va déterminer, en fonction des enjeux, si une simulation numérique de la propagation est nécessaire.

III.2.4.7 Synthèse

Un effort particulier doit être consenti pour exprimer les résultats de l'étude spécifique sous la forme la plus synthétique possible. Le tableau ci-après est un exemple représentatif.

N° compartiment	Risque Eboulement	Volume fragmenté après Propagation (m ³)	Risque Propagation	Hypothèse retenue
P2-11	mmt/fmt	≥ 10	te	Bloc dimensionnant 10 m ³
P2-12 P2-16	mmt/emt mmt/fmt	≥ 10 5/10	te te	
P2-13 P2-17	mct/emt mmt/fmt	≥ 10 2/5	te m	Bloc dimensionnant ≥ 10 m ³
P2-21 P2-22 P2-34 et P2-34	mmt/fmt fmt/emt emt/temt fmt	2/5 5/10 2/5 2/5	e te e m/e	Bloc dimensionnant 5 m ³ (ou 10 m ³ mais risque faible)
P2-23 P2-24 P2-28	mmt/fmt emt/temt mmt/fmt mmt/fmt	5/10 2/5 5/10 5/10	te e te te	Bloc dimensionnant 5 m ³ côté 1,75m (ou 10 m ³ mais risque modéré)
P2-29	mmt/fmt	0,5/5	m/e	Bloc dimensionnant 5 m ³ (côté 1,75 m)
P2-32	mmt	1/2	F	Bloc dimensionnant 2 m ³ (côté 1,25 m) mais risque faible

Exemple : tableau de synthèse "Vallée de la Tarentaise - Savoie – Secteur d'étude n° 2".

III.2.4.8 Risques résultants (recensement exhaustif)

La caractérisation du risque résultant consiste à faire l'inventaire et déterminer la sensibilité des vulnérabilités situées dans l'aire couverte par les trajectoires des aléas. Cette démarche et la problématique de sécurisation qui en découle : stabilisation des aléas en place, définition, dimensionnement et mise en œuvre de parades actives, zonages réglementaires, etc., ne sont pas abordées dans le présent document.