

## V. CONFRONTATION DES MÉTHODES

L'objectif de ce chapitre est de comparer les différentes méthodes proposées par les participants au projet. Pour cela, la démarche aboutissant à l'évaluation de la probabilité d'atteinte par un éboulement (chute de bloc ou éboulement en masse) a été décomposée en plusieurs phases. Les principales caractéristiques des différentes méthodes sont présentées dans le tableau V.1. Seule la méthode RES allant jusqu'à l'appréciation du risque, la confrontation des méthodes ne portera que sur la probabilité de rupture, la prise en compte de la propagation et la caractérisation de l'aléa.

## V. CONFRONTO DEI METODI

L'obiettivo di questo capitolo è di paragonare i diversi metodi proposti dai partecipanti al progetto. A questo scopo, il procedimento per arrivare alla valutazione della pericolosità per frana (caduta blocchi o valanga di roccia) è stato suddiviso in varie fasi. Le principali caratteristiche dei diversi metodi sono presentate nella tabella V.1. Poiché solo il metodo RES va fino alla valutazione del rischio, il confronto fra i metodi riguarderà soltanto la probabilità di rottura, la valutazione della propagazione e la caratterizzazione della pericolosità.

	LPC	MAT	RHAP	RES	HGP	PT
<b>TYPE D'ÉTUDE</b>						
Études de type cartographique		X	X	X	X	
Études spécifiques d'aménagement	X					
Études spécifiques de site actif						
Étude théorique						X
<b>VOLUME DES INSTABILITÉS</b>						
< 1000 m <sup>3</sup>	X	X	X	X		X
> 1000 m <sup>3</sup>	X	X			X	X
<b>MOYENS NÉCESSAIRES</b>						
Méthode rapide			X	X		
Méthode plus complète	X	X			X	X
<b>DÉTECTION</b>						
Phase de détection préliminaire	X	X			X	X
Évaluation directe			X	X		
<b>ÉVALUATION FOURNIE</b>						
Probabilité de rupture	X	X	X		X	X
Prise en compte de la propagation	X	X	X	X		
Caractérisation de l'aléa	X	X	X	X		
Appréciation du risque				X		

*Tab. V.1 : Caractéristiques générales des différentes méthodes.  
Caratteristiche generali dei diversi metodi.*

### V.1. DÉFINITION DU CAHIER DES CHARGES

Pour chaque méthode, il est nécessaire de préciser le type d'étude concerné. On peut distinguer :

- les études de type cartographique, qui portent sur des surfaces étendues (commune, vallée al-

### V.1. DEFINIZIONE DELLO SCHEMA DI LAVORO

Per ogni metodo è necessario precisare il tipo di studio in oggetto. Si possono distinguere:

- gli studi di tipo cartografico che riguardano superfici estese (comuni, vallata alpina, corridoio

pine, couloir d'itinéraire routier, région) et dont l'objectif se limite généralement à l'affichage des probabilités de rupture et d'atteinte ;

- les études spécifiques d'aménagement, qui concernent des aménagements bien précis (urbanisation, ouvrage routier, etc.) et qui doivent généralement fournir une appréciation des travaux nécessaires pour une mise en sécurité des aménagements ; elles sont donc nécessairement plus détaillées ;
- les études spécifiques de sites actifs, dans lesquelles une évaluation à très court terme est nécessaire et qui doivent définir les moyens à mettre en œuvre pour éliminer tout risque à venir.

La méthode LPC est plutôt destinée aux études spécifiques, ponctuelles ou d'itinéraires, les autres aux études de type cartographique. La méthode du *Politecnico de Turin* est une méthode théorique pouvant s'intégrer dans différents types d'études opérationnelles.

La période sur laquelle porte l'évaluation doit également être définie. A l'exception des études de sites actifs, elle est le plus souvent de l'ordre du siècle.

Enfin, les volumes d'éboulement considérés doivent être précisés. La méthode RHAP est destinée à évaluer la probabilité d'éboulements de volume total inférieur à 1000 m<sup>3</sup>.

Les autres méthodes peuvent, a priori, être utilisées pour différentes tailles d'éboulements.

## **V.2. DONNÉES NÉCESSAIRES POUR L'ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ DE RUPTURE**

Le tableau V.2 recense les principales données utilisées par les méthodes proposées, pour l'évaluation de la probabilité de rupture. Le nombre de X reflète le niveau de détail requis pour chaque type de données. Les données nécessaires à l'étude de la propagation ont été décrites dans le chapitre IV.

## **V.3. DÉTECTION DES INSTABILITÉS POTENTIELLES ET ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ DE RUPTURE**

### **V.3.1. Sectorisation**

Explicitement ou implicitement, toutes les méthodes supposent qu'une sectorisation a été effectuée, c'est à dire que la zone étudiée a été divisée en secteurs homogènes en fonction des caractéristiques structurales, géomécaniques et morphologiques des versants. Dans la méthode LPC, la sectorisation apparaît explicitement, avant la détection des instabilités potentielles. Pour les autres méthodes, le fait de faire intervenir la structure du massif rocheux implique qu'une sectorisation a été effectuée.

stradale, regione) e il cui obiettivo si limita generalmente alla segnalazione delle probabilità di rottura e di pericolosità;

- gli studi specifici di gestione del territorio che riguardano degli aspetti ben precisi (urbanizzazione, opere stradali) e che devono generalmente indicare una valutazione dei lavori necessari per la messa in sicurezza delle strutture; essi sono dunque necessariamente più dettagliati;
- gli studi specifici relativi ai siti soggetti a frane attive nei quali è necessaria una valutazione a breve termine e che devono definire i mezzi da mettere in opera per mitigare il rischio futuro.

Il metodo LPC è destinato prevalentemente agli studi specifici, puntuali o lineari, gli altri agli studi di tipo cartografico. Il metodo del Politecnico di Torino è un metodo teorico che può integrarsi in diversi tipi di studi operativi.

Bisogna ugualmente definire il periodo interessato dalla valutazione. Ad eccezione degli studi sui siti soggetti a frane attive, tale periodo è il più spesso dell'ordine di un secolo.

Infine, i volumi di frana considerati devono essere precisati. Per esempio il metodo RHAP è destinato a valutare la probabilità di frane di volume totale inferiore a 1000 m<sup>3</sup>.

Gli altri metodi possono, a priori, essere utilizzati per diverse dimensioni di frane.

## **V.2. DATI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE DELLA PROBABILITÀ DI ROTTURA**

La tabella V.2 censisce i principali dati utilizzati dai metodi proposti per la valutazione della probabilità di rottura. Il numero di X rispecchia il livello di dettaglio richiesto per ogni tipo di dati. I dati necessari allo studio della propagazione sono descritti nel capitolo IV.

## **V.3. INDIVIDUAZIONE DELLE INSTABILITÀ POTENZIALI E VALUTAZIONE DELLA PROBABILITÀ DI ROTTURA**

### **V.3.1. Settorializzazione**

Explicitamente o implicitamente, tutti i metodi presuppongono che si effettui una settorializzazione, cioè che la zona studiata sia divisa in settori omogenei in funzione delle caratteristiche strutturali, geomecchaniche e morfologiche dei versanti. Per esempio nel metodo LPC, la settorializzazione appare esplicitamente prima dell'individuazione delle instabilità potenziali. Per gli altri metodi, il fatto di considerare la struttura del massiccio roccioso implica che è stata effettuata una settorializzazione.

	LPC	MAT	RHAP	RESr	HGP	PT
<b>DONNÉES GÉOMÉCANIQUES</b>						
Orientation des discontinuités	X	XXX	X	X	XX	XXX
Extension	X	XXX	X	X	XX	XXX
Espace	X	XXX	X	X	XX	XXX
Intensité de fracturation	X		X	X	X	
Rugosité des joints (JRC)	X	X			XX	XXX
Etat d'altération des joints, remplissage	X	X	X	X	XX	XXX
Ouverture des joints	X	X	X	X	X	X
Présence de faille	X	X	X	X	X	
Lithologie	X	X	X	X	X	
Résistance de la roche	X	X	X	X	X	XXX
Cavités karstiques			X	X		
Nombre de mécanismes potentiels				X		
<b>DONNÉES SUR L'ACTIVITÉ</b>						
Fissures ouvertes par un mouvement récent			XX	X	X	
Blocs basculés			XX	X		
<b>DONNÉES HYDROLOGIQUES</b>						
Présence d'eau (écoulement dans les joints?)	X	X	XX	XX	X	X
Précipitations maximales	X	X			X	
Fréquence ou distribution des pluies					X	
Intensité maximale de la fonte de neige	X	X			X	
Bassin versant alimentant les joints					X	
<b>DONNÉES SISMOLOGIQUES</b>						
Carte d'aléa (accélération ou intensité)	X	X			X	X
<b>DONNÉES CLIMATIQUES</b>						
Nombre de cycles gel-dégel	X	X			X	
Évolution du permafrost		X			X	
Orientation du versant			XX	XX		
Vent (action sur les arbres, érosion éolienne)	X				X	
Végétation	X		XX		X	
<b>DONNÉES MORPHOLOGIQUES</b>						
Hauteur de la paroi	X	X		X		
Pente de la paroi	X	X		X		
Érosion, accumulation	X	X		X	X	
<b>DONNÉES HISTORIQUES</b>						
Éboulements dans le secteur étudié	X	X	XX	XX	X	
Éboulements dans une zone plus large					XX	

**Tab. V.2 :** Principales données utilisées par les méthodes proposées, pour l'évaluation de la probabilité de rupture.  
*Principali dati utilizzati dai metodi proposti per la valutazione della probabilità di rottura.*

### V.3.2. *Détection*

Les méthodes RHAP et RES ne comportent pas véritablement de phase d'identification de masses instables (instabilités localisées) ou de mécanismes particuliers susceptibles de se produire (instabilités diffuses). Elles affectent directement un indice de susceptibilité ou de probabilité de départ à chaque secteur homogène.

Dans les méthodes LPC, HGP et Matterock, on cherche à identifier plus précisément des instabilités localisées ou diffuses. Le principe général consiste à rechercher soit des **mécanismes de rupture potentiels** à partir d'un catalogue de configurations typiques (Fig. V.1), soit des **zones actives** (c'est à dire déjà instables), présentant des indices de mouvements récents. Du fait du type de terrain sur lequel la méthode a été développée, Matterock recherche essentiellement les mécanismes de glissement, alors que les catalogues des méthodes LPC et HGP sont plus exhaustifs.

La recherche d'**instabilités potentielles localisées** est effectuée sur le terrain ou sur photographies aériennes. La confrontation de la topographie avec l'agencement structural du massif permet d'identifier des zones d'**instabilité potentielle diffuse**. La méthode Matterock comporte aussi la possibilité d'une détection automatique, par confrontation d'un modèle numérique de terrain et d'un modèle structural probabiliste du massif. La détection d'une zone d'instabilité potentielle diffuse permet d'orienter la recherche d'instabilités localisées sur le terrain ou sur photos.

Le **volume** d'une instabilité potentielle localisée (dont les limites en surface sont à peu près connues) peut être évalué. Pour une zone d'instabilité diffuse, une évaluation par excès ou une évaluation probabiliste sont possibles.

### V.3.3. *Évaluation de la probabilité de rupture*

L'objectif est d'évaluer la probabilité qu'un éboulement se produise dans un délai donné, à partir d'une zone d'instabilité potentielle identifiée (instabilité localisée ou diffuse).

#### V.3.3.1 **Principes généraux**

La plupart des méthodes d'évaluation utilisent à la fois une approche mécanique (ou déductive), basée sur une description géomécanique des instabilités identifiées, et une approche de type historique, basée sur l'observation du comportement passé de la falaise.

L'approche mécanique des processus conduisant à la rupture est illustrée de manière simplifiée

### V.3.2. *Individuazione*

I metodi RHAP e RES non comportano in realtà una fase d'identificazione di masse instabili (instabilità localizzate) o di meccanismi particolari suscettibili di prodursi (instabilità diffuse). Essi attribuiscono un indice di suscettibilità o di probabilità di origine per ciascun settore omogeneo, sulla base di un numero di indicatori di instabilità rilevati sulla parete.

Nei metodi LPC, HGP e Matterock, si cerca più precisamente di identificare delle instabilità localizzate o diffuse. Il principio generale consiste nel ricercare sia dei **meccanismi di rottura potenziali** a partire da un catalogo di configurazioni tipiche (Fig. V.1), sia delle zone attive (cioè già instabili), che presentano degli indici di movimenti recenti. Visto il tipo di terreno sul quale il metodo è stato sviluppato, Matterock ricerca soprattutto i meccanismi di scivolamento, mentre i cataloghi dei metodi LPC e HGP sono più esaurienti.

La ricerca di **instabilità potenziali localizzate** è effettuata sul terreno o su fotografie aeree. Il confronto della topografia con la disposizione strutturale del massiccio permette di identificare delle zone d'**instabilità potenziale diffusa**. Il metodo Matterock comporta anche la possibilità di una individuazione automatica per confronto fra un modello numerico di terreno e un modello strutturale probabilistico del massiccio. L'individuazione di una zona d'instabilità potenziale diffusa permette di orientare la ricerca di instabilità localizzate sul terreno o su foto.

Il **volume** di una instabilità potenziale localizzata (i cui limiti in superficie sono approssimativamente conosciuti) può essere valutato. Per una zona a instabilità diffusa, sono possibili valutazioni per eccesso o valutazioni probabilistiche.

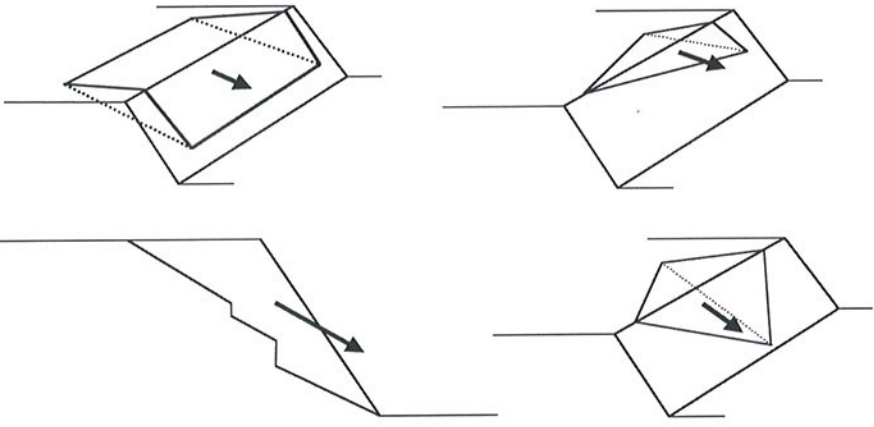

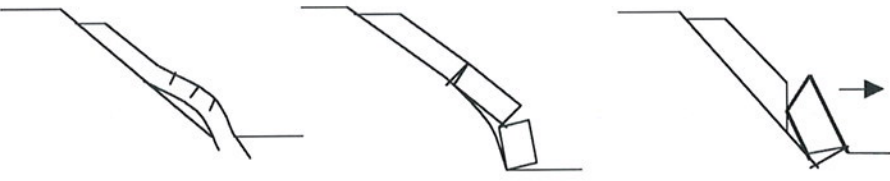
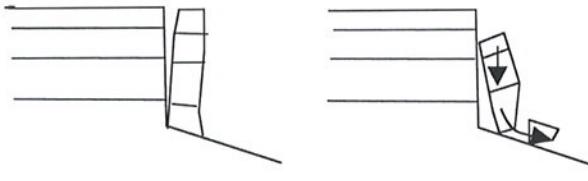


### V.3.3. *Valutazione della probabilità di rottura*

L'obiettivo è di valutare la probabilità che una frana si verifichi in un tempo determinato a partire da una zona di instabilità potenziale identificata (instabilità localizzata o diffusa).

#### V.3.3.1 **Principi generali**

La maggior parte dei metodi di valutazione utilizzano contemporaneamente un approccio meccanico (o deduttivo), basato su una descrizione geomeccanica delle instabilità identificate e un approccio storico, basato sull'osservazione del comportamento progressivo della parete.

L'approccio meccanico del processo che conduce alla rottura è illustrato in modo semplificato

Configuration	Mécanisme d'instabilité
<p>a</p> 	<p>Glissements translationnels (sur 1 plan, sur une famille de plans ou sur 2 plans)</p>
<p>b</p> 	<p>Glissements rotationnel et composé</p>
<p>c</p> 	<p>Rupture de banc</p>
<p>d</p> 	<p>Rupture de colonne en pied</p>
<p>e</p> 	<p>Basculement de colonne ou de blocs</p>
<p>f</p> 	<p>Rupture de surplomb</p>

**Fig. V.1 :** Configurations favorables aux éboulements et mécanismes de rupture.  
*Configurazioni favorevoli alle frane di crollo e meccanismi di rottura.*

par la figure V.2. Il apparaît que la probabilité de rupture dans un certain délai dépend :

- du **degré de stabilité actuel** de la masse susceptible de s'écrouler ;
- de l'évolution lente de ce degré de stabilité au cours du temps (due aux différents **facteurs dégradants**, qui réduisent la résistance ou augmentent les contraintes actives) ;
- de la probabilité d'occurrence de sollicitations exceptionnelles ou **facteurs déclenchants** (séisme centennal, pression hydraulique exceptionnelle).

dalla figura V. 2. Risulta che la probabilità di rottura entro un certo tempo dipende:

- dal **grado di stabilità attuale** della massa suscettibile di franare;
- dall'evoluzione lenta di questo grado di stabilità nel corso del tempo (dovuta a diversi **fattori degenerativi** che riducono la resistenza o aumentano le sollecitazioni attive);
- dalla probabilità di accadimento di sollecitazioni eccezionali o di **fattori scatenanti** (sisma centennale, pressione idraulica eccezionale).

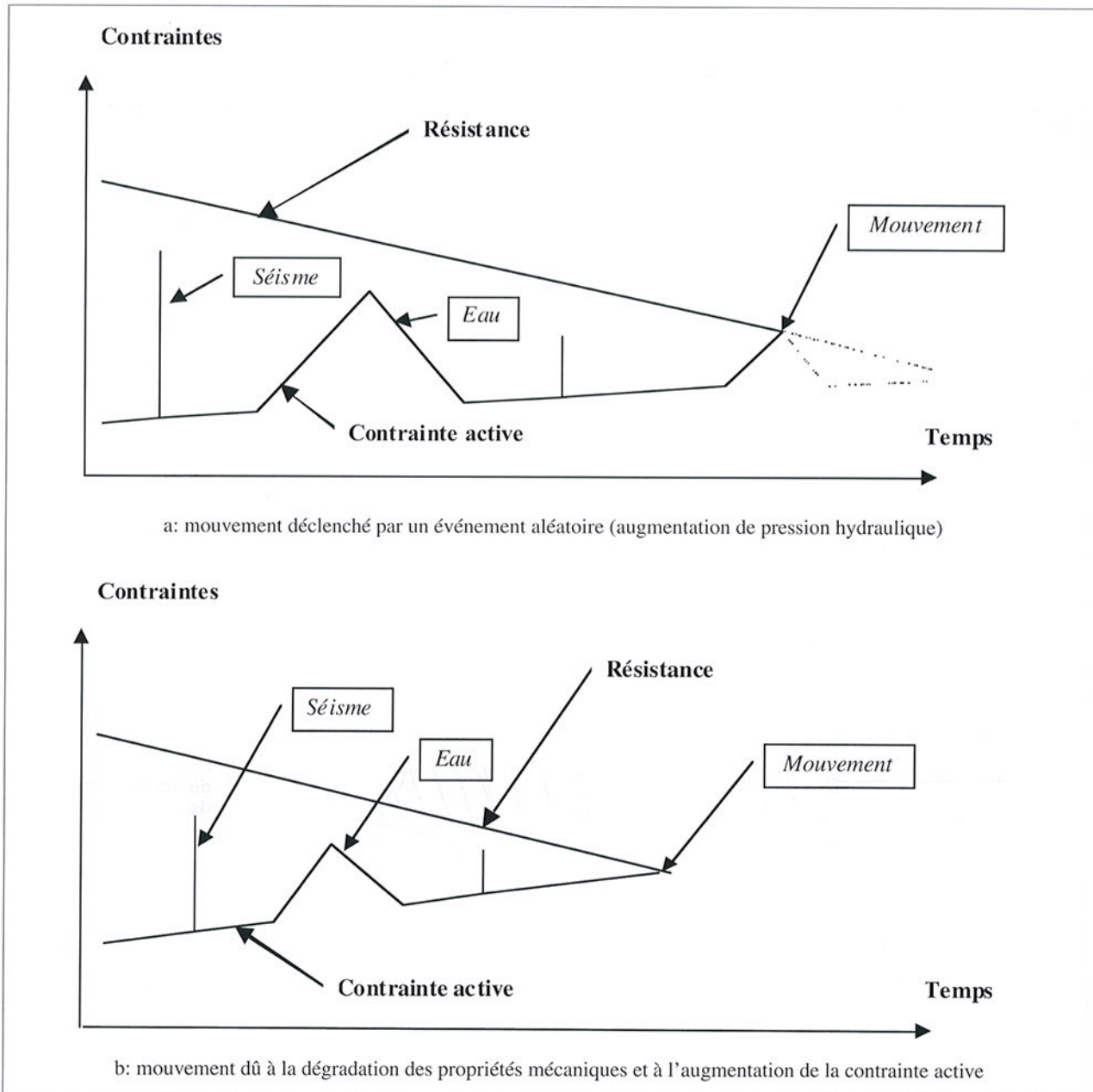


Fig. V.2 : Schématisation des processus conduisant à la mise en mouvement d'une masse rocheuse.  
Schema dei processi che conducono alla messa in movimento di una massa rocciosa.

L'approche historique prend en compte des événements passés survenus dans la zone évaluée, dans une zone plus large, considérée comme suffisamment homogène, ou sur d'autres sites, présentant une certaine similitude avec le site étudié. L'expérience personnelle des experts est basée essentiellement sur l'observation d'éboulements passés, survenus dans des conditions très variées.

Les différents facteurs susceptibles d'être pris en compte dans l'évaluation sont listés dans la première colonne du tableau V.3.

L'approccio storico prende in considerazione degli avvenimenti passati accaduti nella zona in esame, in una zona più larga, considerata come sufficientemente omogenea o su altri siti che presentano una certa somiglianza con il sito in oggetto. L'esperienza personale degli esperti si basa essenzialmente sull'osservazione di frane passate sovrappiunte in condizioni molto diverse.

I differenti fattori suscettibili di essere presi in considerazione per la valutazione sono elencati nella prima colonna della tabella V.3.

	LPC	MAT	RHAP	RESr	HGP	PT
ÉTAT DE STABILITÉ ACTUEL						
Structure	XX	XXX	X	XX	XX	XXX
Paramètres géomécaniques	X	X		X	XX	XXX
Pressions interstitielles	X	(X)	(X)	(X)	X	X
Coefficient de sécurité		X				XXX
Indices de mouvements récents		XXX	XXX	XX	XXX	
SOLLICITATIONS EXCEPTIONNELLES						
Probabilité de séismes déclenchants	X	X			X	
Sensibilité aux séismes déclenchants	X	X			X	X
Probabilité de pluies déclenchantes	X	X			XX	
Sensibilité aux pluies déclenchantes	X	X			X	
ACTIVITÉ DES FACTEURS DÉGRADANTS						
Altération, dissolution	X	X	(X)	(X)	X	
Fatigue due à la sismicité de base	(X)	X			X	
Fatigue due aux mises en pression	X				XX	
Fatigue due aux cycles thermiques	X				X	
Orientation de la pente				X		
Erosion ou accumulation	X	X		X	X	
Déformation de versant	X				X	
Tectonique actuelle						
Cycles gel-dégel	X	XX			X	
Végétation (racines, vent)	X					
Fonte du permafrost		X			X	
APPROCHE EMPIRIQUE						
Éboulements dans le secteur étudié	X	X	XX	XX	X	
Éboulements dans une zone plus large					XXX	
Expérience d'autres sites						
Facteur subjectif	X	X				

**Tab. V.3 :** Facteurs considérés dans l'évaluation de la probabilité de rupture.

*Fattori considerati per valutare la probabilità di rottura.*

### V.3.3.2 Confrontation des méthodes

Pour chaque méthode, les facteurs qui interviennent directement dans l'évaluation de la probabilité de rupture, sont notés dans la colonne correspondante dans le tableau V.3. Le nombre de X reflète l'importance donnée à chaque facteur dans les textes de présentation des méthodes (et non son poids relatif dans le calcul d'un indice).

(X) signifie que le facteur n'est pas mentionné explicitement dans le texte.

Dans cette confrontation, nous avons considéré la version dite "rapide" de la méthode RES (notée RESr), car la version primitive ne propose pas de méthode pour déterminer la probabilité de rupture. En revanche, elle propose une méthode originale, basée sur une approche de type système, pour évaluer la probabilité de propagation, c'est-à-dire la probabilité d'atteinte, sachant que la rupture s'est produite. La même approche, mais simplifiée, est utilisée dans la version rapide, qui intègre les deux aspects rupture et propagation.

Les méthodes MATTEROCK, RHAP, RES et LPC fournissent une **évaluation qualitative** de la probabilité de rupture (de type : probabilité élevée, moyenne, faible, etc.). Pour les trois premières, cette évaluation passe par l'attribution de notes aux facteurs pris en compte et par le calcul d'un indice reflétant la probabilité de rupture. Cependant, dans Matterock, la méthode de calcul de l'indice de dangerosité est présentée comme un "essai" de pondération des facteurs et ne semble pas être utilisée de manière opérationnelle. Dans la méthode LPC, la démarche aboutissant à la qualification n'est pas quantifiée.

Les méthodes HGP et *Politecnico* Turin visent à déterminer une véritable **probabilité de rupture**. Ces deux méthodes ne sont pas des méthodes opérationnelles et sont actuellement l'objet de recherches dans les Universités de Grenoble et de Turin.

### V.3.3.3 Comparaison des résultats obtenus sur le site du Monte San Martino

L'objectif est de comparer les estimations de la probabilité de rupture données par chaque méthode, sur un même site. Quatre méthodes ont été appliquées sur le site du Monte San Martino (Lecco, Lombardie) présenté dans le paragraphe III.2.2.3 : RHAP, RES, RESr et Matterock.

Dans la méthode RHAP, l'estimation de la probabilité de rupture est représentée par l'indice d'activité (donné, pour chaque zone homogène, dans le

### V.3.3.2 Confronto dei metodi

Per ogni metodo, i fattori che intervengono direttamente nella valutazione della probabilità di rottura sono referenziati nella colonna corrispondente nella tabella V.3. Il numero di X rispecchia l'importanza data ad ogni fattore nei testi di presentazione dei metodi (e non il suo peso relativo nel calcolo di un indice).

(X) significa che il fattore non è menzionato esplicitamente nel testo.

In questo confronto, abbiamo considerato la versione cosiddetta "rapida" del metodo RES (annotata RESr), perché la versione originale (Cancelli & Crosta, 1993a, b) non propone alcun metodo per definire la probabilità di rottura. In compenso, essa propone un metodo originale basato su un approccio di tipo sistemico per valutare la probabilità di propagazione, cioè la pericolosità, sapendo che la rottura si è verificata. Lo stesso approccio, semplificato, è utilizzato nella versione rapida che integra i due aspetti rottura e propagazione.

I metodi MATTEROCK, RHAP, RES e LPC forniscono una **valutazione qualitativa** della probabilità di rottura (di tipo: probabilità elevata, media, debole, etc.). Per i primi tre, questa valutazione passa attraverso l'attribuzione di un punteggio e del calcolo di un indice che rispecchia la probabilità di rottura. Tuttavia, in Matterock, il metodo di calcolo dell'indice di pericolosità è presentato come una "prova" di equilibrio tra i fattori e non sembra essere utilizzato in modo operativo. Nel metodo LPC il procedimento che arriva alla qualificazione non è quantificato.

I metodi HGP e Politecnico di Torino mirano a determinare una vera **probabilità di rottura**. Questi due metodi non sono dei metodi operativi e sono attualmente oggetto di ricerche nelle università di Grenoble e di Torino.

### V.3.3.3 Confronto dei risultati ottenuti sul sito del Monte San Martino

L'obiettivo è confrontare le stime della probabilità di rottura fornite da ogni metodo su uno stesso sito. Quattro metodi sono stati applicati sul sito di Monte San Martino (Lecco, Lombardia) presentato al termine del paragrafo III.2.2.3.: RHAP, RES, RESr e Matterock.

Nel metodo RHAP, la stima della probabilità di rottura è rappresentata dall'indice di attività (fornito, per ogni zona omogenea, nella tabella



tableau III.6). Dans RES, elle correspond à l'indice de dangerosité défini dans le tableau III.10 (probabilité di accadimento) et donné pour chaque zone dans le tableau III.13.

Dans RESr, la probabilité de rupture n'apparaît pas explicitement, mais elle a pu être estimée en calculant un indice à partir des paramètres relatifs à la zone de départ, en excluant donc ceux relatifs à la zone de propagation (Tab. III.15).

La méthode Matterock, quant à elle, a permis de délimiter et d'évaluer des instabilités potentielles localisées ou diffuses, indépendamment des différentes zones.

Les estimations de la probabilité de rupture fournies par les trois méthodes pour chacune des 8 zones homogènes préalablement définies (Fig. III.22) sont représentées sur la figure V.3. On constate un désaccord important entre les méthodes. En effet, avec la méthode RHAP, les 4 zones les plus dangereuses se situent dans la partie droite de la falaise, alors qu'avec RES et RESr, les 3 zones les plus dangereuses se situent dans la partie gauche. Les instabilités détectées avec la méthode Matterock, à l'exception d'une instabilité diffuse qui suit la crête de la falaise sur toute sa largeur, se situent dans la partie droite (dans les zones 1, 2b et 3). Les résultats fournis par RHAP et Matterock sont donc relativement compatibles.

Les divergences entre les méthodes peuvent être dues à des différences d'appréciation de la part des personnes chargées des études et aux principes sur lesquels reposent les méthodes. La méthode RHAP repose essentiellement sur l'observation du comportement passé de la falaise, à travers la recherche d'indices de mouvement (petits déplacements ou chutes de blocs), qui représentent 3 paramètres sur 5 considérés. Cette approche semble bien adaptée à la détection d'instabilités de volume nettement plus petit que la zone étudiée.

L'approche précédente n'est pas utilisable dans le cas de volumes importants par rapport à la zone étudiée. Il est alors nécessaire d'utiliser une approche plus déductive, en considérant les propriétés géomécaniques du massif rocheux. C'est le cas de la méthode RESr, dans laquelle la majorité des paramètres constitue une description géomécanique du massif (les indices d'activité sont également pris en compte, mais ils représentent un poids plus faible, de l'ordre de 25%). Ce type d'approche est plus délicat, car l'influence des différents paramètres sur la probabilité de rupture n'a jamais été étudiée précisément et la pondération adoptée est très subjective.

III.6). Nel RES, essa corrisponde all'indice di pericolosità definito nella tabella III.10 (probabilità di accadimento) e data per ogni zona nella tabella III.13.

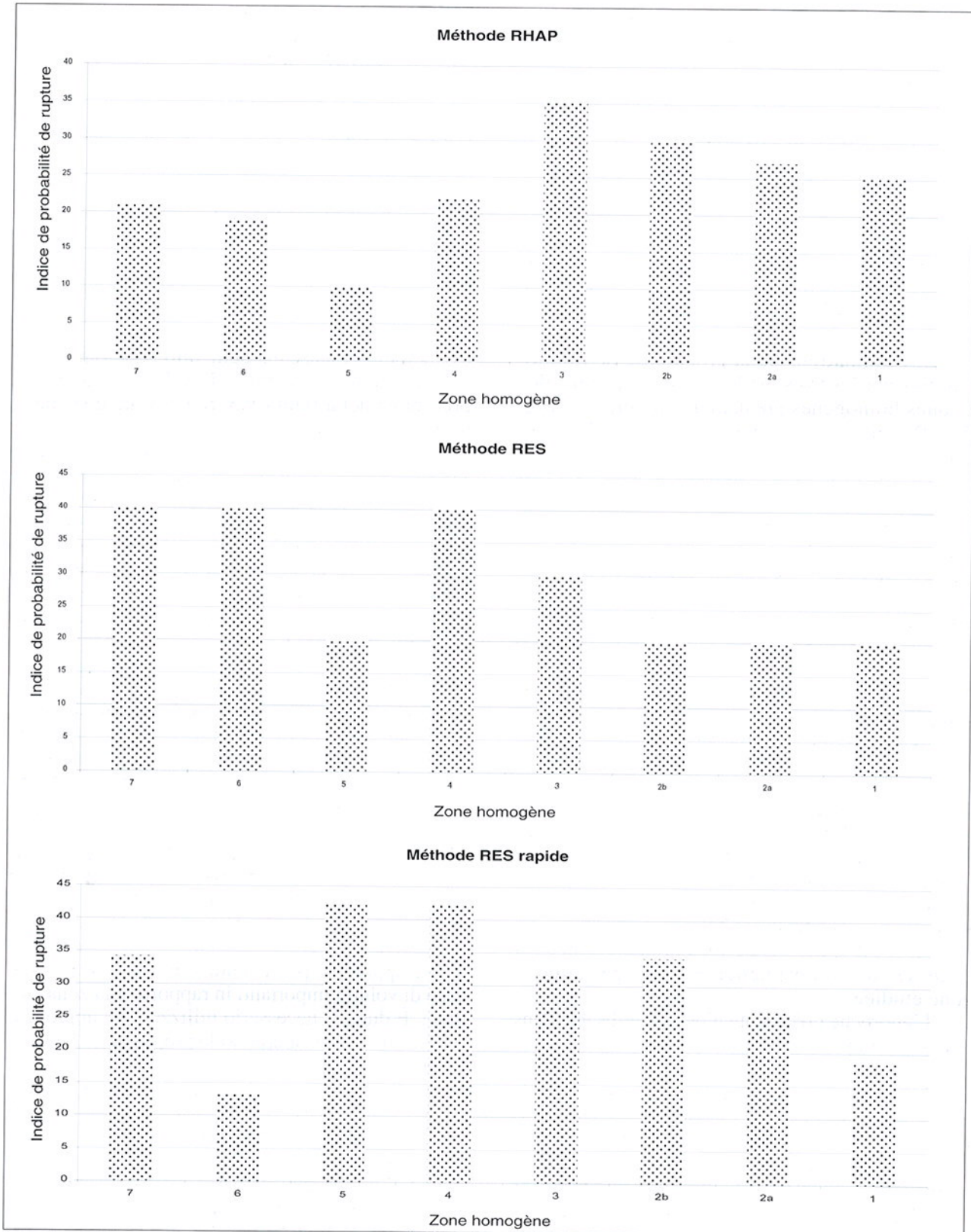
Nel RESr, la probabilità di rottura non appare esplicitamente, ma può essere stimata calcolando un indice a partire dai parametri relativi alla zona di origine, escludendo dunque quelli relativi alla zona di propagazione (Tab. III.15).

Il metodo Matterock ha permesso di delimitare e di valutare delle instabilità potenziali localizzate o diffuse, indipendentemente dalle diverse zone.

Le stime della probabilità di rottura fornite dai tre metodi per ciascuna delle otto zone omogenee precedentemente definite (Fig. III.22) sono rappresentate nella figura V.3. Si constata una sfasatura importante tra i metodi. In effetti, secondo il metodo RHAP le quattro zone più pericolose si situano nella parte destra della parete, mentre secondo il RES e il RESr, le tre zone più pericolose si situano nella parte sinistra. Le instabilità individuate con il metodo Matterock, ad eccezione di una instabilità diffusa che percorre la cresta della parete in tutta la sua lunghezza, si situano nella parte destra (nelle zone 1, 2b e 3). I risultati forniti dal RHAP e da Matterock sono dunque relativamente compatibili.

Le divergenze tra i metodi possono essere attribuite a delle differenze di valutazione da parte delle persone incaricate degli studi e ai principi sui quali si basano i metodi. Il metodo RHAP si basa anche sull'osservazione del comportamento pregresso della parete attraverso la ricerca di indici di movimento (piccoli spostamenti o cadute blocchi) che rappresentano tre parametri sui cinque considerati. Quest'approccio, sembra bene adatto all'individuazione di instabilità di volume nettamente più piccolo della zona presa in considerazione.

L'approccio precedente non è utilizzabile nel caso di volumi importanti in rapporto alla zona studiata. È dunque necessario utilizzare un approccio più deduttivo considerando le proprietà geomeccaniche del massiccio roccioso. È il caso del metodo RESr nel quale la maggior parte dei parametri costituisce una descrizione geomeccanica del massiccio (gli indici di attività sono parimenti presi in considerazione, ma essi rappresentano un peso più debole dell'ordine del 25%). Questo tipo d'approccio è più delicato poiché l'influenza dei diversi parametri sulla probabilità di rottura non è mai stata studiata a fondo e la ponderazione adottata è molto soggettiva.



**Fig. V.3 :** Comparaison des méthodes d'estimation semi-quantitatives de la probabilité de rupture sur le site du Monte San Martino (Lecco, Lombardia).

*Confronto fra i metodi di stima semi-quantitativi della probabilità di rottura sul sito del Monte San Martino (Lecco, Lombardia).*

#### V.3.3.4 Conclusions

La méthode **RHAP** est une méthode opérationnelle, rapide et bien codifiée. Basée essentiellement sur l'observation de l'activité de la zone homogène étudiée, elle est adaptée aux éboulements de petit volume.

**Matterock** est également une méthode opérationnelle, mais adaptée à une gamme plus large de volumes d'éboulement. Grâce à l'utilisation d'un modèle numérique de terrain, elle permet d'identifier rapidement des zones de glissement potentielles. Elle est plus adaptée aux versants cristallins ou métamorphiques qu'aux falaises calcaires. Une quantification de la méthode (indice de dangerosité) est en cours de développement.

La méthode **RESr** est basée essentiellement sur une description géomécanique du massif. Comme dans Matterock, la démarche de quantification de la dangerosité demande à être validée.

La méthode **HGP** combine des approches historique et géomécanique. La première nécessite des données suffisamment nombreuses et exhaustives pour estimer des fréquences globales d'éboulement sur la zone d'étude. La seconde doit fournir une évaluation quantitative relative de la probabilité de rupture des instabilités détectées. Elle se heurte aux mêmes difficultés que RES et Matterock (absence de validation).

La méthode **LPC**, initialement mise au point pour les études spécifiques orientées vers la définition des mesures de sécurisation, a été également utilisée pour l'affichage du risque dans le cadre de l'établissement de plans de prévention des risques. La qualification de la probabilité de rupture est le résultat d'une démarche d'expert qualitative.

La méthode du **Politecnico de Turin** ne permet pas actuellement de déterminer la probabilité de rupture d'une instabilité en fonction du temps. En revanche, elle fournit une estimation probabiliste de la stabilité actuelle, qui prend en compte l'incertitude inhérente aux paramètres géomécaniques du massif. Elle pourrait donc être intégrée dans une autre méthode.

#### V.4. ÉTUDE DE LA PROPAGATION

L'objectif des études de propagation (ou études trajectographiques) est de délimiter la zone susceptible d'être atteinte par une masse rocheuse **supposée instable**, et de déterminer certaines caractéristiques du mouvement, nécessaires à la détermination de l'intensité probable du phénomène et à la définition des moyens de protection. L'intensité du phénomène en un point du versant est généralement évaluée à partir de l'énergie des blocs en ce point.

#### V.3.3.4 Conclusioni

Il metodo **RHAP** è un metodo operativo, rapido e ben codificato. Basato essenzialmente sull'osservazione dell'attività della zona omogenea studiata, è adatto alle frane di volume ridotto.

**Matterock** costituisce paramenti un metodo operativo, ma adattato ad una gamma più larga di volumi di frana. Grazie all'utilizzo di un modello numerico del terreno, permette d'identificare rapidamente delle zone potenziali di scivolamento. È più adatto ai versanti cristallini o metamorfici che alle pareti calcaree. Una quantificazione del metodo (indice di pericolosità) è in corso di elaborazione.

Il metodo **RESr** è basato essenzialmente su una descrizione geomeccanica del massiccio. Come nel Matterock, il processo di quantificazione della pericolosità richiede di essere convalidato.

Il metodo **HGP** coniuga approcci storico e geomeccanico. Il primo necessita dei dati sufficientemente numerosi ed esaustivi per stimare delle frequenze globali di frana sulla zona in oggetto. Il secondo deve fornire una valutazione quantitativa relativa della probabilità di rottura delle instabilità individuate. Esso deve affrontare le stesse difficoltà del RES e del Matterock (assenza di convalida).

Il metodo **LPC**, messo inizialmente a punto per gli studi specifici orientati verso la definizione delle misure di messa in sicurezza, è stato ugualmente utilizzato per evidenziare il rischio nell'ambito della definizione di piani di prevenzione dei rischi. La qualificazione della probabilità di rottura è il risultato di procedimento qualitativo da parte di un esperto.

Il metodo del **Politecnico di Torino** non permette attualmente di determinare la probabilità di rottura di una instabilità in funzione del tempo. Per contro, esso fornisce una stima probabilistica della stabilità attuale che prende in considerazione l'incertezza inerente i parametri geomeccanici del massiccio. Esso potrebbe dunque essere integrato in un altro metodo.

#### V.4. STUDIO DELLA PROPAGAZIONE

L'obiettivo degli studi di propagazione (o studi traietto grafici) è di delimitare la zona suscettibile di essere raggiunta da una massa rocciosa **supposta instabile** e di determinare alcune caratteristiche del movimento necessarie alla determinazione dell'intensità probabile del fenomeno e alla definizione dei metodi di protezione. L'intensità del fenomeno in un punto del versante è generalmente valutata partendo dall'energia dei blocchi in quel pun-

Pour dimensionner des ouvrages de protection, il est nécessaire de connaître l'énergie et la hauteur des trajectoires.

Les méthodes de calcul diffèrent suivant le type d'éboulement traité. On peut distinguer les chutes de blocs, dans lesquelles les blocs se déplacent de manière indépendante, et les éboulements en masse, dans lesquels ils interagissent de manière significative.

#### V.4.1. Chutes de blocs

Il existe de nombreuses méthodes de simulation des trajectoires, basées sur les principes de la mécanique (méthodes de trajectographie, chapitre IV). Certaines d'entre elles fournissent, pour chaque point du versant, les **probabilités de dépassement** des principaux paramètres des trajectoires (distance de propagation, énergie des blocs, hauteur de la trajectoire). D'autres fournissent seulement les **valeurs maximales possibles** (ou vraisemblables) de ces paramètres, sans faire apparaître explicitement l'aspect aléatoire du phénomène.

En dehors des méthodes de trajectographie, des méthodes empiriques plus rapides sont parfois utilisées. La méthode **RES** appartient à cette catégorie. À partir de l'évaluation de 15 paramètres qui influencent la trajectoire des blocs, elle fournit un indice (RII : *Rockfall Intensity Index*) reflétant une intensité **globale** de l'éboulement potentiel, caractérisant l'ensemble de la trajectoire. Cet indice peut ensuite être multiplié par un coefficient dépendant de la distance au point de départ, pour obtenir un nouvel indice, qui traduit une diminution de l'intensité locale le long de la trajectoire.

La méthode **RHAP** utilise des logiciels de trajectographie pour évaluer les probabilités de propagation, mais elle ne prend pas en compte l'énergie des blocs.

**Matterock** utilise les résultats d'études trajectographiques, pour évaluer l'énergie maximale pouvant être atteinte en chaque point du versant.

Il existe aussi des méthodes empiriques, basées sur la notion d'angle de propagation (ou cône d'ombre), qui permet d'obtenir le point d'arrêt du mouvement. Enfin, certaines méthodes très simples, utilisées pour un zonage rapide à partir d'un modèle numérique de terrain, considèrent que la zone menacée est délimitée par le fond de la vallée (rivière).

#### V.4.2. Éboulements en masse

La prévision de la propagation des éboulements en masse est plus difficile que celle des chutes de blocs, du fait de la complexité des phénomènes mis

to. Per dimensionare delle opere di protezione, è necessario conoscere l'energia e l'altezza delle traiettorie.

I metodi di calcolo differiscono a seconda del tipo di frana trattato. Si possono distinguere i crolli, nei quali i blocchi si spostano in maniera indipendente, e le valanghe di roccia, nelle quali i blocchi interagiscono in maniera significativa.

#### V.4.1. Caduta massi

Esistono numerosi metodi di simulazione delle traiettorie, basati sui principi della meccanica (metodi di traiettografia, capitolo IV). Alcuni di loro forniscono, per ogni punto del versante, le **probabilità di superamento** dei valori dei principali parametri delle traiettorie (distanza di propagazione, energia dei blocchi, altezza della traiettoria). Altri forniscono soltanto i **valori massimi possibili** (o verosimili) di questi parametri, senza fare apparire esplicitamente l'aspetto aleatorio del fenomeno.

Oltre ai metodi di traiettografia, altri metodi empirici più rapidi sono a volte utilizzati. Il metodo **RES** appartiene a questa categoria. A partire dalla valutazione di quindici parametri che influenzano la traiettoria dei blocchi, esso fornisce un indice (RII: *Rockfall Intensity Index*) che rispecchia un'intensità **globale** di frana potenziale, che caratterizza l'insieme della traiettoria. Questo indice può in seguito essere moltiplicato per un coefficiente dipendente dalla distanza dal punto di partenza, per ottenere un nuovo indice che traduce una diminuzione dell'intensità locale lungo la traiettoria.

Il metodo **RHAP** utilizza dei software di traiettografia per valutare le probabilità di propagazione, ma esso non prende in considerazione l'energia dei blocchi.

**Matterock** utilizza i risultati degli studi traietto grafici per valutare l'energia massima che può essere raggiunta in ogni punto del versante.

Esistono anche dei metodi empirici, basati sulla nozione di angolo di propagazione (o cono d'ombra), che permette di ottenere il punto d'arresto del movimento. Infine, alcuni metodi molto semplici, utilizzati per una zonizzazione rapida a partire da un modello numerico di terreno, considerano che la zona minacciata è delimitata dal fondo della valle (fiume).

#### V.4.2. Valanghe di roccia

La previsione della propagazione delle valanghe di roccia è più difficile di quella delle cadute blocchi a causa della complessità dei fenomeni in

en jeu et du faible nombre d'éboulements qui se sont produits. En effet l'analyse de phénomènes réalisés est nécessaire pour valider les modèles. Il existe cependant quelques méthodes de simulation (Hungre et Evans, 1996 ; Rochet, 1999, Fell et al., 2000). Mais le problème de la propagation des éboulements en masse n'a pas été traité dans le présent projet.

## V.5 CARACTÉRISATION DU DANGER

### V.5.1. *Objectif*

La caractérisation la plus complète du danger consisterait à donner, en chaque point du versant et pour une période donnée, la distribution de probabilité de l'énergie cinétique (et éventuellement d'autres paramètres) de l'éboulement considéré. Une telle caractérisation probabiliste du danger est possible pour l'aléa sismique, pour lequel la distribution de probabilité de l'intensité ou de l'accélération maximale peut être calculée. En pratique, les cartes d'aléa sismique représentent l'accélération associée à une probabilité de dépassement donnée ou la probabilité de dépassement d'une accélération donnée. Pour le danger d'éboulement, les méthodes trajectographiques permettent de déterminer la distribution de probabilité de l'énergie, mais en supposant connues les caractéristiques de la zone de départ et sa probabilité de rupture. Or, cette dernière ne peut actuellement être évaluée que de manière qualitative ou semi-quantitative.

### V.5.2. *Résultats fournis par les différentes méthodes*

Une caractérisation simplifiée du danger consiste à évaluer seulement la probabilité d'atteinte de chaque point du versant, sans prendre en compte l'énergie du phénomène. (cela revient à considérer seulement la probabilité de dépassement d'une énergie nulle, au lieu de considérer la distribution complète). C'est le cas de la méthode RHAP. En théorie, la probabilité d'atteinte est le produit de la probabilité de rupture par la probabilité (conditionnelle) de propagation. Dans la méthode RHAP, ces probabilités sont évaluées, de manière semi-quantitative, au moyen d'indices qui sont ensuite combinés pour donner un indice final reflétant la probabilité d'atteinte.

Dans la méthode Matterock, plusieurs valeurs d'énergies (0, 30 et 300 kJ), issues de calculs trajectographiques, sont considérées. Elles peuvent être des valeurs maximales possibles, lorsque l'aspect probabiliste de la propagation n'est pas pris en compte explicitement. Mais avec une méthode de

jeu et del ridotto numero di frane che si sono verificate. In effetti, l'analisi dei fenomeni realizzati si è necessaria per convalidare i modelli. Esistono tuttavia alcuni metodi di simulazione (Hungre e Evans, 1996; Rochet, 1999, Fell et al. 2000). Ma il problema della propagazione delle valanghe di roccia non è stato trattato in questo progetto.

## V.5. CARATTERIZZAZIONE DEL PERICOLO

### V.5.1. *Obiettivo*

La caratterizzazione più completa del pericolo consisterebbe nel dare in ciascun punto del versante per un periodo determinato, la distribuzione di probabilità dell'energia cinetica (ed eventualmente di altri parametri) della frana studiata. Tale caratterizzazione probabilistica del pericolo è possibile per "l'alea" sismico la cui distribuzione di probabilità dell'intensità o dell'accelerazione massima può essere calcolata. Nella pratica, le carte d'"alea" sismico rappresentano l'accelerazione associata ad una probabilità di superamento determinata o la probabilità di superamento di una accelerazione determinata. Per quanto riguarda il pericolo di frana, i metodi traietto grafici permettono di definire la distribuzione di probabilità dell'energia, presupponendo però che le caratteristiche della zona di partenza e la sua probabilità di rottura siano conosciute. Attualmente quest'ultima può soltanto essere valutata in modo qualitativo o semi-quantitativo.

### V.5.2. *Risultati forniti dai diversi metodi*

Una caratterizzazione semplificata del pericolo consiste nel valutare soltanto la pericolosità di ciascun punto del versante senza prendere in considerazione l'energia del fenomeno (ciò che significa considerare solo la probabilità di superamento di una energia nulla invece di considerare la distribuzione completa). È il caso del metodo RHAP. Nella teoria, la pericolosità è il prodotto della probabilità di rottura per la probabilità (condizionale) di propagazione. Nel metodo RHAP, queste probabilità sono valutate in modo semi-quantitativo grazie a degli indici che sono poi combinati per dare un indice finale che rispecchia la pericolosità.

Nel metodo Matterock, più valori di energie (0,30 e 300 kJ) ricavati dai calcoli traietto grafici sono presi in considerazione. Possono essere dei valori massimi possibili quando l'aspetto probabilistico della propagazione non è esplicitamente preso in considerazione. Con un metodo di traietto-

trajectographie probabiliste, il est possible de donner les probabilités de dépassement de ces valeurs. Le croisement de ces informations avec la probabilité de rupture, qualifiée à l'aide d'un indice, permet de fournir un degré de danger en tout point du versant.

Dans la méthode RES, aucun paramètre physique (distance de propagation ou énergie) n'est calculé, mais l'intensité est évaluée par un indice en tout point du versant. Celui-ci peut être considéré comme une espérance mathématique conditionnelle de l'intensité, en supposant que la rupture a eu lieu. Le produit de cet indice par un coefficient reflétant la probabilité de rupture est donc représentatif de l'intensité (la valeur la plus probable).

Dans la méthode LPC, la qualification de la probabilité de rupture peut être associée à une évaluation qualitative de la probabilité de propagation (voir chapitre III) ou à une simulation trajectographique qui permet d'obtenir l'extension maximale possible du phénomène étudié (logiciel Propag, décrit au chapitre IV).

La méthode HGP, en cours de développement, fournit une probabilité de rupture pour chaque instabilité potentielle. En l'associant à une méthode de trajectographie probabiliste, il est donc possible, en multipliant les probabilités de dépassement par la probabilité de rupture de l'instabilité étudiée, d'obtenir la distribution de probabilité de l'énergie en tout point du versant. La connaissance de cette distribution permet de fournir des cartes représentant l'énergie associée à une probabilité de dépassement donnée ou la probabilité de dépassement d'une énergie donnée.

## **V.6 BILAN ET PERSPECTIVES**

### **V.6.1. Validation des méthodes**

La caractérisation complète du danger d'éboulement sur un versant nécessite la détection d'instabilités potentielles localisées ou diffuses, l'évaluation de leur probabilité de rupture dans un délai donné et de la probabilité de dépassement d'une certaine intensité (reflétant notamment l'énergie cinétique des blocs) en tout point du versant. Si l'intensité choisie est nulle, cette probabilité est simplement la probabilité d'atteinte du point considéré.

Pour l'étude de la phase de propagation des blocs, il est souvent possible de caler les méthodes de simulation sur des observations d'éboulements survenus sur le même site. Plusieurs méthodes ont ainsi pu être validées. Lorsqu'il n'existe pas de données sur le site étudié, l'expérience acquise sur d'autres sites peut être utilisée. Dans le cadre de ce projet, trois méthodes ont été comparées (chapitre IV).

grafia probabilistica è possibile comunque dare le probabilità di superamento di questi valori. L'incrocio di queste informazioni con la probabilità di rottura, qualificata grazie ad un indice, permette di fornire un grado di pericolo su ogni punto del versante.

Nel metodo RES, nessun parametro fisico (distanza di propagazione o energia) è calcolato ma l'intensità è valutata da un indice su ogni punto del versante. Il prodotto di questo indice per un coefficiente che rispecchia la probabilità di rottura è dunque rappresentativo dell'eventualità dell'intensità (oppure del suo valore più probabile).

Nel metodo LPC, la qualificazione della probabilità di rottura può essere associata ad una valutazione qualitativa della probabilità di propagazione (vedere il capitolo III) o ad una simulazione traietto grafica che consente di ottenere l'estensione massima possibile del fenomeno studiato (software Propag descritto nel capitolo IV).

Il metodo HGP, in corso di elaborazione, fornisce una probabilità di rottura per ogni instabilità potenziale. Associandola ad un metodo di traietto grafia probabilistica, è dunque possibile, se le probabilità di superamento sono moltiplicate per la probabilità di rottura dell'instabilità studiata, ottenere la distribuzione di probabilità dell'energia in ogni punto del versante. La conoscenza di questa distribuzione permette di fornire delle carte che rappresentano l'energia associata ad una probabilità di superamento determinata o la probabilità di superamento di una energia determinata.

## **V.6. BILANCIO E PROSPETTIVE**

### **V.6.1. Convalida dei metodi**

La caratterizzazione complessiva del pericolo di frana su un versante necessita l'individuazione delle instabilità potenziali localizzate o diffuse, la valutazione della loro probabilità di rottura e della probabilità di superamento di una certa intensità (che rispecchia in particolare l'energia cinetica dei blocchi) in ogni punto del versante. Se l'intensità scelta è nulla, questa probabilità è semplicemente la pericolosità del punto considerato.

Per quanto riguarda la fase di propagazione dei blocchi, è spesso possibile tarare i metodi di simulazione sulle osservazioni di frane avvenute sullo stesso sito. In questo modo, più metodi sono stati convalidati. Quando non esiste alcun dato riguardante il sito indagato, può essere utilizzata l'esperienza acquisita su altri siti. Nell'ambito di questo progetto, tre metodi sono stati paragonati (capitolo IV).

En revanche, les données nécessaires pour valider les méthodes d'évaluation (qualitative ou quantitative) de la probabilité de rupture sont beaucoup plus difficiles à obtenir pour les raisons suivantes. D'abord, le résultat de l'évaluation n'est pas une grandeur physique mesurable sur le terrain, comme la distance de propagation d'un bloc ou sa vitesse, mais l'occurrence ou non d'un éboulement sur une longue période (de l'ordre de quelques années à quelques siècles). Ensuite, l'aspect aléatoire du phénomène nécessite de considérer un assez grand nombre de cas. Enfin, les données d'entrée nécessaires à l'évaluation sont, elles, observables ou mesurables sur le terrain, mais avant que l'éboulement ne survienne.

Pour les raisons évoquées ci-dessus, les différentes méthodes d'évaluation de la probabilité de rupture, qualitatives ou quantitatives, demandent encore à être validées. Pour cela, deux types d'étude peuvent être envisagés.

Le premier, le plus satisfaisant, consiste à acquérir certaines données d'entrée (morphologie notamment) dans une zone expérimentale, avant que les éboulements qui seront étudiés ne se produisent, et à suivre celle-ci sur une durée suffisante pour savoir si les zones de départ des éboulements auraient pu être détectées a priori. Dans ce cadre, la photographie aérienne (à une échelle adaptée) permet d'acquérir des données morphologiques initiales essentielles. Ce type d'étude ne peut se réaliser que sur une longue période (de l'ordre de 5 ans au minimum).

Le second type consiste à analyser des éboulements qui se sont produits dans une zone d'étude pendant une certaine période (de l'ordre de la dizaine ou de la centaine d'années) et à recueillir le maximum de données sur l'état initial du versant. Dans ce type d'étude, les données d'entrée sont nécessairement moins complètes que dans le cas précédent, mais ceci peut être compensé par un nombre de cas plus important. Une coopération internationale à l'échelle de l'arc alpin permettrait de constituer une base de données exploitable dans ce sens.

### **V.6.2. Amélioration des méthodes**

Trois voies d'amélioration sont proposées.

La première porte sur l'acquisition des données, en particulier celles concernant la structure du massif rocheux, que l'on peut difficilement appréhender par des observations de surface. Les paramètres structuraux jouent pourtant un rôle essentiel dans l'évaluation de la probabilité de rupture. L'utilisation de méthodes de reconnaissance géophysiques permettrait de progresser dans ce domaine.

La seconde concerne l'approche mécanique de l'évaluation. Elle consiste à mieux prendre en

Al contrario, i dati necessari per convalidare i metodi di valutazione (qualitativa o quantitativa) della probabilità di rottura sono molto più difficili da ottenere per i motivi seguenti. Innanzitutto, il risultato della valutazione non è un valore fisico che può essere misurato sul terreno come la distanza di propagazione di un blocco o la sua velocità, ma l'accadimento o no di una frana su un lungo periodo (dell'ordine di alcuni anni ad alcuni secoli). Secondariamente, l'aspetto aleatorio del fenomeno impone l'esigenza di dover considerare numerosi casi. Infine, i dati d'ingresso necessari alla valutazione sono sì osservabili o misurabili sul terreno, ma prima che la frana avvenga.

Per i motivi sopracitati, i diversi metodi di valutazione della probabilità di rottura, qualitativi o quantitativi, devono essere ancora convalidati. Due tipi di studio possono essere intrapresi. Il primo, il più soddisfacente, consiste nell'acquisire alcuni dati d'ingresso (morphologia, in particolare) nella zona sperimentata prima che le frane da studiare si siano prodotte, poi seguire questa zona per una durata temporale sufficiente in modo da sapere se le zone di partenza delle frane potevano essere individuate a priori. In questo quadro, la fotografia aerea (ad una scala adeguata) permette di acquisire i dati morfologici iniziali essenziali. Questo tipo di studio può essere realizzato soltanto su un lungo periodo (dell'ordine di 5 anni al minimo).

Il secondo tipo di studio consiste nell'analizzare le frane che sono accadute in una zona di studio durante un certo periodo (dell'ordine della decina o della centinaia di anni) e raccogliere i dati massimi riguardanti lo stato iniziale del versante. In questo tipo di studio, i dati d'ingresso sono necessariamente meno completi che nel caso precedente, ma questo può essere compensato da un numero più importante di casi. Una cooperazione internazionale a livello dell'arco alpino consentirebbe di costituire un database da sfruttare in questo senso.

### **V.6.2. Miglioramento dei metodi**

Tre vie di miglioramento sono proposte.

La prima riguarda l'acquisizione dei dati, in particolare quelli riguardanti la struttura del massiccio roccioso, che sono difficilmente rilevabili tramite le osservazioni di superficie. I parametri strutturali svolgono un ruolo essenziale nella valutazione della probabilità di rottura. L'utilizzo di metodi di ricognizione geofisica permetterebbe di avanzare in questo campo.

La seconda riguarda l'approccio meccanico della valutazione. Consiste nel considerare meglio la struttura complessa dei massicci rocciosi (esi-

compte la structure complexe des massifs rocheux (existence de ponts rocheux) et leur évolution temporelle (altération, dissolution, fatigue, etc.).

La troisième concerne la quantification de l'évaluation du danger. Contrairement à d'autres aléas (séismes, inondations), il n'existe pas, actuellement, de méthodes opérationnelles permettant une évaluation quantitative du danger éboulement (en particulier de la probabilité de rupture). Pourtant, celle-ci permettrait de préciser l'importance relative de cet aléa et de le prendre en compte de manière cohérente dans l'aménagement du territoire. L'évaluation quantitative de la probabilité de rupture n'est possible qu'en développant une approche probabiliste basée sur une analyse statistique d'éboulements anciens. Cette approche devrait fournir des fréquences d'éboulements de différentes tailles, pour des environnements géologiques et morphologiques différents. Le développement de ces trois axes d'amélioration doit s'appuyer sur les résultats de la validation des méthodes, afin d'orienter les recherches vers les configurations structurales et les mécanismes de rupture les plus critiques.

stenza di ponti di roccia) e la loro evoluzione temporale (alterazione, dissoluzione, fatica).

La terza riguarda la quantificazione della valutazione del pericolo. Contrariamente ad altre tipologie di rischio (sismi, alluvioni) non esistono attualmente dei metodi operativi che consentano una valutazione quantitativa del pericolo frana (in particolare della probabilità di rottura). Eppure essa permetterebbe di precisare l'importanza relativa di questa tipologia di rischio e prenderla in considerazione in modo coerente nella gestione del territorio. La valutazione quantitativa della probabilità di rottura è possibile solo sviluppando un approccio probabilistico in base ad un'analisi statistica delle antiche frane. Quest'approccio dovrebbe fornire delle frequenze di frana di varie dimensioni per ambiti geologici e morfologici diversi. Lo sviluppo di questi tre assi di miglioramento deve basarsi sui risultati della convalida dei metodi in modo da orientare le ricerche verso le configurazioni strutturali ed i meccanismi di rottura più critici.