

Application de la méthodologie «MATTEROCK» à l'évaluation du danger lié aux falaises

JEAN-DANIEL ROUILLER¹ & CHRISTIAN MARRO¹

Key words: Alps, hazard, Matterock, natural danger, rockslide, structural analysis, territory planning

ABSTRACT

The traditional "Cliff" type danger map, based on a phenomena map, has the inconvenience to reflect a past danger. It is only valid for events of the same size. Because the mechanisms of mobilization are not taken into account, the phenomena map might miss the large rockslides, like the one which occurred in Randa, and which are due to a long and irreversible degradation process and occur rarely at the same place. By advocating to replace the phenomena map by the hazard map, MATTEROCK suggests a real diagnosis for the danger map. Its originality is to work on the probability of mobilization (dangerousness) of the hazard and to use probabilistic analysis for assessing the probability of intersection between the discontinuities which are able to dissociate rocks from the cliff.

RESUME

La carte de danger falaise établie à partir de l'usuelle carte des phénomènes a l'inconvénient de ne représenter qu'un danger passé. Elle n'est par conséquent valable que pour des événements tout au plus de même ampleur. N'intégrant pas les mécanismes de mobilisation, elle a beaucoup de chances de rater les éboulements majeurs tel que celui de Randa qui sont issus d'un processus de dégradation lent et irréversible et qui se reproduisent très rarement au même endroit. En préconisant de remplacer la carte des phénomènes par celle d'aléas, la démarche MATTEROCK propose un réel pronostic comme partie prenante de la carte de danger. Son originalité est de travailler sur la probabilité de mobilisation (dangerosité) de l'aléa et d'utiliser l'analyse probabiliste pour évaluer les possibilités d'intersection des discontinuités appelées à désolidariser la falaise.

Avant-propos

La carte de danger *falaise*, telle que pratiquée habituellement, est établie sur la base du nombre, répartition et état de fraîcheur des blocs répartis en pied de pente. L'examen de ces «témoins muets» est certes utile pour délimiter les périmètres de danger liés aux chutes de pierres répétitives; il ne reflète cependant qu'un danger «passé» qui, dans le cas des éboulements majeurs, a l'inconvénient de ne se reproduire qu'exceptionnellement au même endroit. Or on sait maintenant que ce type d'éboulement se prépare «sournoisement» sur plusieurs milliers d'années par altération progressive et irréversible de la roche. L'analyse des cicatrices d'éboulements majeurs a démontré sans équivoque qu'il y a une prédisposition structurale des falaises. Le site de Grossgugger à Randa (CRSFA 1991, Rouiller 1992, Schindler et al. 1993) est certainement la falaise au monde qui a vu passer le plus de géologues à son pied. Combien ont prévu le Bergsturz de 1991?

La toute récente «Légende modulable pour la cartographie des phénomènes» (OFEE – OFEFP 1995) propose de prendre en compte pour l'établissement de la carte de danger aussi bien la zone de départ que celles de transit et de dépôt des blocs. Pour

les auteurs du présent article, ce document n'insiste pas assez sur l'importance de l'analyse de la falaise elle-même.

1. Introduction

MATTEROCK est le nom donné à une démarche originale d'auscultation de falaises et d'évaluation du danger qui en découle pour l'aval. Elle a été développée par le Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées (CRSFA, Sion, Suisse) dans le cadre du programme national de recherche NFPNR 31 «Changements climatiques et catastrophes naturelles». Les principaux sites de développement et application de la méthode sont le Mattertal, le Saastal et le Val de Bagnes, trois vallées alpines sises en Valais. Après l'événement de Randa (1991), elle se veut un outil adapté aux exigences du canton du Valais en matière de dangers géologiques pouvant affecter les zones d'activité humaine.

MATTEROCK s'inspire à l'origine de la méthodologie développée par A. Wagner (Wagner et al. 1990) et connue sous le nom de SHIVA. Elle se base sur une analyse détaillée

¹ Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées, Rue de l'Industrie 45, CH-1951 Sion

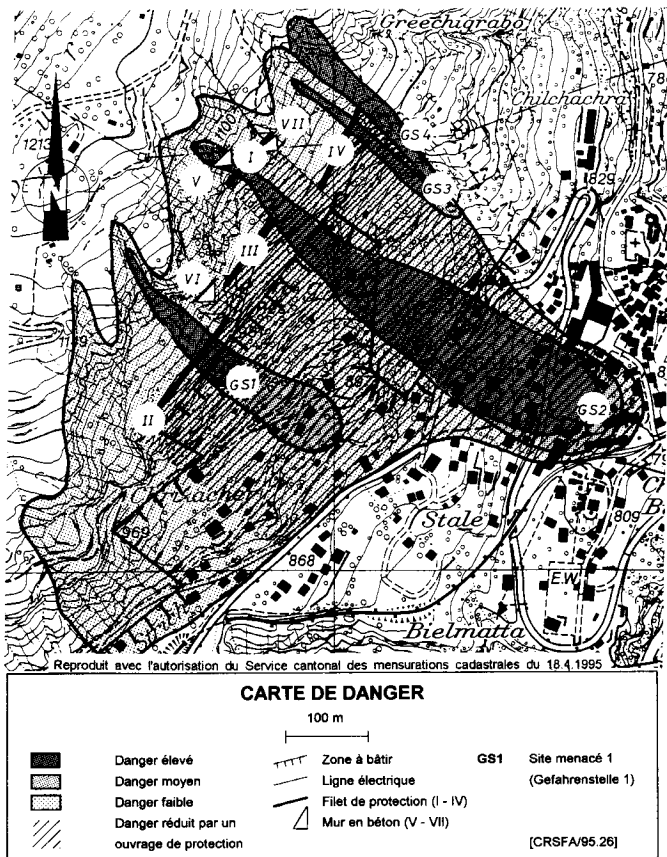


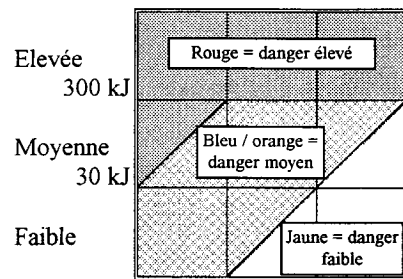
Fig. 1. Carte de danger. Les ouvrages de protection proposés permettront de réduire le risque pour les bâtiments sis dans la zone à bâtir. Des calculs d'énergie d'impact ont été effectués aux points GS.

des discontinuités affectant les falaises en vue d'en dégager les mécanismes de mobilisation potentielle (Rouiller et al. 1997). En l'état actuel de la recherche, l'approche structurale est privilégiée et s'appuie en partie sur le traitement statistique et probabiliste des discontinuités (Jaboyedoff et al. 1996). La présence d'un agencement structural défavorable est en effet la condition sine qua non à la réalisation d'un éboulement. Dans un deuxième temps, la méthodologie devra procéder à l'intégration mathématique de facteurs géomécaniques et hydrauliques. Si un poids important est donné à l'analyse structurale, le but ultime de la méthodologie proposée n'en demeure pas moins l'élaboration d'une carte de danger basée sur le pronostic le plus scientifique possible.

2. Carte de danger

La carte de danger *falaise* est devenu un outil indispensable pour réaliser l'aménagement du territoire en région de montagne. Une zone à bâtir telle que celle représentée sur la figure 1 doit tenir compte de ce type de danger pour assurer la sécurité des habitants. Les recommandations fédérales en la matière

INTENSITE



Elevée Moyenne Faible
PROBABILITE D'OCCURRENCE

Fig. 2. Diagramme de gradation du danger. Le degré de danger est proportionnel à l'intensité du choc (kJ) et à la probabilité d'occurrence de l'impact. Dans Matterrock cette dernière est elle-même fonction de la dangerosité (probabilité de mobilisation) de l'aléa et de la probabilité d'atteinte du site menacé (modifié d'après Rouiller et al. 1997).

(en préparation) subdivisent le danger en trois degrés et proposent de l'évaluer au moyen d'un diagramme à deux entrées: intensité et probabilité d'occurrence de l'événement (fig. 2). Elles proposent d'interdire toute habitation en zone de danger élevé et d'assujettir à des mesures de protection adaptées les autorisations de construire en zone de danger moyen et faible. Le flow-chart de la figure 3 présente les étapes d'élaboration de la carte de danger. Les notions d'intensité et de probabilité d'occurrence méritent d'être commentées.

2.1 Intensité

L'intensité des chutes de blocs en un endroit donné est définie par l'énergie cinétique des blocs en ce point. Suivant les recommandations fédérales précitées, trois classes d'intensité sont distinguées:

- **élevée (> 300 kJ):** les personnes sont menacées aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments. Il faut compter avec la destruction totale des bâtiments;
- **moyenne (30–300 kJ):** les personnes sont peu menacées à l'intérieur des bâtiments. Il faut compter avec des dégâts aux bâtiments;
- **faible (< 30 kJ):** les personnes sont peu menacées à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. Il faut compter avec de faibles dégâts aux bâtiments.

Bien qu'encore imparfait, la modélisation est le seul outil apte à cerner au mieux l'intensité d'impact d'un bloc le long de sa trajectoire. Cette analyse est de plus en plus réclamée pour les zones à bâtir et voies de communication menacées par ce type de danger. L'examen des blocs déjà éboulés (taille, répartition dans la pente, traces d'impact) ne permet en effet qu'une estimation des plus grossières de l'intensité.

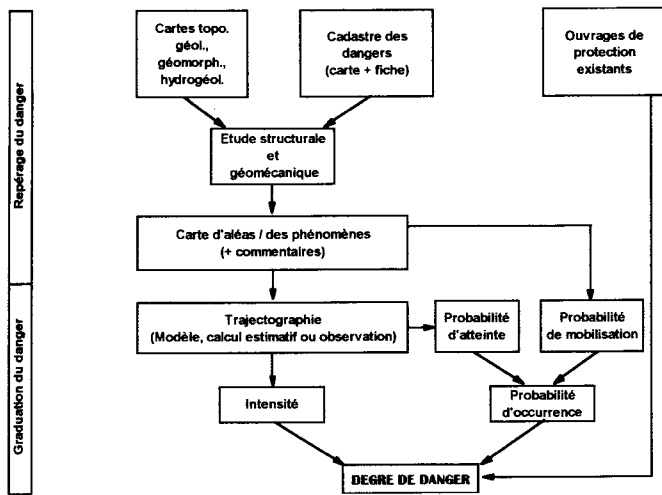


Fig. 3. Démarche séquentielle de graduation du danger falaise. L'étude structurale et géomécanique est à la base de la carte d'aléas dont les éléments permettent de déterminer aussi bien la probabilité de mobilisation que celle d'atteinte (tiré de Rouiller et al. 1997).

2.2 Probabilité d'occurrence

Pour estimer la probabilité d'occurrence d'un impact de bloc, les mêmes recommandations fédérales proposent l'échelle suivante: *élevée* pour une période de retour de 1 à 30 ans, *moyenne* pour 30–100 ans et *faible* pour 100–300 ans.

Si ce mode de raisonnement en terme de fréquence est valable pour un *type d'événement répétitif au même endroit* – comme c'est notamment le cas sur certains tronçons de route où les chutes de pierres sont suffisamment nombreuses pour l'autoriser – il n'en va pas de même pour les éboulements majeurs qui se reproduisent très rarement au même endroit. Entre ces deux extrêmes, seule une analyse détaillée de la zone de production permettra de trancher. Ce constat nous a conduit à assujettir la probabilité d'occurrence à celle de *mobilisation du bloc* (voir plus loin la notion de dangerosité) et à celle d'*atteinte* de l'objet menacé par le bloc. Aussi bien les observations de terrain que la modélisation trajectographique démontrent que les possibilités d'arrêt naturel du bloc dans la pente sont réelles, ce qui permet dans bien des cas de faire contre-poids à la dangerosité lorsque seule une faible proportion des blocs atteint le site menacé. Il ressort de ce qui précède que la probabilité d'occurrence d'un impact de bloc (PO_{ib}) est inférieure ou égale à la dangerosité (D) de l'aléa le générant:

$$PO_{ib} \leq D$$

2.3 Analyse de la zone de production

Comme le suggère le flow-chart de la figure 3, l'analyse de la falaise en tant que site de production des blocs est indispen-

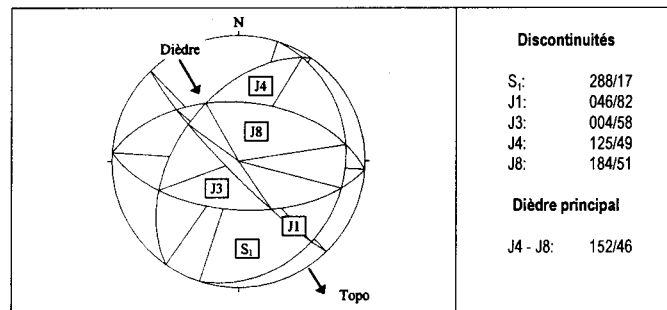


Fig. 4. Stéréogramme Schmidt-Lambert (hémisphère supérieur) des discontinuités. On y relève le mécanisme de mobilisation principal, à savoir *glissement profond potentiel vers le SE sur dièdre généré par J4 et J8*.

sable à l'élaboration de la carte de danger. Sans elle, l'intensité et la probabilité d'occurrence ne peuvent être quantifiés et par conséquent le degré de danger ne peut être évalué.

3. Etude structurale et géomécanique

Selon le glossaire rédigé par le CRSFA (1997), un aléa est une instabilité reconnue spatialement et dotée d'un degré de dangerosité. L'étude structurale et géomécanique qui permet de fixer ce degré s'appuie sur le postulat qu'en matière de roche dure il n'y a pas d'aléa sans la présence dans la falaise de familles de discontinuités.

L'étude consiste à mesurer les caractéristiques structurales (orientation, persistance, espacement) et géomécaniques (ondulation, ouverture, remplissage, etc.) des discontinuités, puis de les regrouper en familles de mêmes caractéristiques (tableau 1). On en tire l'**agencement structural** du site qu'on représente sur un diagramme de Schmidt-Lambert (fig. 4). Tableau et diagramme sont indissociables l'un de l'autre.

4. Détermination de l'aléa

Un aléa est un périmètre bien défini ou au contraire diffus le long d'un versant rocheux à l'intérieur duquel agissent un ou plusieurs mécanismes de mobilisation.

La confrontation entre l'agencement structural et la topographie qui englobe l'aléa est la clé de voûte de la démarche MATTEROCK. En révélant notamment les plans potentiels de glissement et basculement, cette confrontation va démontrer l'existence ou non d'un aléa. Une analyse probabiliste (§ 8) permet de mettre en évidence les périmètres à haute probabilité de recoupement de la topographie par une famille de discontinuités ou un dièdre. L'analyse de visu (cartes, photos, etc.) du processus de dislocation d'une falaise et des cicatrices en résultant contribue à circonscrire les périmètres potentiellement instables. Les dépôts rocheux en pied de falaise sont un élément d'appréciation complémentaire. Les sites reconnus comme dangereux font l'objet d'une analyse de détail in situ.

Tab. 1. Caractéristiques structurales et géomécaniques des discontinuités

Discontinuité	Azimut	Pendage	Persistence [m]		Espacement [m]		Ouverture [mm]		Ondulation	Remplissage	Remarques
			moy	max	moy	min	max				
S ₁	279-330	16-20	50	50	8	0	100	Faible		Erodé	
J ₁	040-060 220-240	55-90 70-90	20	60	5	0	1000	Moyenne	Limon		
J ₃	004	40-76								Rare	
J ₄	110-140	40-70	5	15	3	0	100	Faible	Sable		
J ₈	180-220	40-60	300	400	30	0	100	Moyenne		Extension régionale	

5. Mécanismes de mobilisation

La confrontation entre l'agencement structural et la topographie peut générer trois principaux mécanismes de mobilisation: le **glissement profond** (où les plans de glissement pénètrent profondément dans la falaise), le **glissement superficiel** et le **basculement**, auxquels correspondent grosso modo des volumes mobilisables décroissants. Une lecture avertie du stéréogramme livre de fait les mécanismes de mobilisation des aléas puisqu'on y trouve reportés aussi bien l'agencement structural que la topographie. On peut donc lire sur la figure 4 qu'il y a «*glissement profond vers le SSE sur le dièdre formé par J4 et J8, avec décollement arrière par le plan J1*». L'analyse probabiliste met en évidence quant à elle le mécanisme le plus probable. Une reconnaissance in situ des cicatrices d'aléas environnantes permettra de confirmer le ou les mécanismes actifs. Hormis le cas extrême du Bergsturz potentiel qui ne s'est pas encore produit, l'expérience montre que la «lecture» de l'agencement structural des cicatrices confirme celui des aléas inventoriés.

6. Dangersité

Dans la démarche proposée par MATTEROCK il est essentiel de faire la distinction entre la notion de danger et celle de dangersité. La première est appelée à qualifier le site menacé alors que la deuxième est une appréciation de la probabilité de mobilisation de l'aléa en tant qu'objet menaçant. En regard de la notion de fréquence (§ 2.2) qui n'est qu'un comptage d'événements répétitifs au même endroit, la dangersité a le grand avantage – au même titre que la notion de facteur de sécurité du géotechnicien – de prendre en compte l'état d'altération progressive et irréversible de la roche en tant qu'acteur primordial d'instabilité et sans connotation temporelle. On sait par exemple que l'éboulement des Crétaux (Isérables, 1985) se reproduira au même endroit d'ici 100 à 1000 ans voire bien plus. Dans un tel cas, l'appréciation du degré d'instabilité par le biais de la dangersité est sans conteste un outil de prévision plus scientifique que le simple comptage d'événements dont la plupart du temps un seul est connu historiquement (Heim 1932)! Et cela même si nous n'en sommes qu'aux premiers balbutiements pour ce qui est d'exprimer en termes de temps le

phénomène d'altération de la roche qui est réputé pour agir comme un effet tampon à très long terme.

Parmi les facteurs qui agissent sur la dangersité, il y a lieu de distinguer en milieu alpin:

- les **facteurs intrinsèques** qui régissent l'état de la roche au sortir du dernier retrait glaciaire. Ils sont d'ordre pétrographique, structural et géomécanique;
- les **facteurs dégradants**, à savoir tous les éléments externes qui avec le temps concourent à la dégradation de la falaise. Citons parmi les plus courants l'eau, la température et la séismicité de base (bruit de fond correspondant à une intensité de 1 à 4 sur l'échelle Richter);
- les **facteurs déclenchants** qui sont des conditions physiques exceptionnelles intervenant soit à la surface de la terre (météo) soit en profondeur (frottement des plaques entre elles) et qui du fait de leur intensité déclenchent l'aléa par le biais des mêmes éléments que ci-dessus.

La limite d'action entre facteur dégradant et déclenchant n'est pas toujours aussi tranchée qu'on le souhaiterait. Plus un aléa est proche de la rupture d'équilibre, plus il devient difficile de mettre en évidence un seul facteur déclenchant.

Pour les cas de configuration structurale les plus simples, le facteur de sécurité de l'aléa est calculé sur la base de la méthode géomécanique classique qui rapporte le cisaillement effectif au cisaillement mobilisable (Hoeck & Bray 1981). Ce facteur participe à la pondération de la dangersité d'aléa.

7. Compartiments instables et taille des blocs

A tout mécanisme de mobilisation d'un aléa correspond un volume instable. Particulièrement utile, l'analyse probabiliste des persistances et des espacements a pour but de déterminer le volume le plus probable d'un compartiment, donc d'un événement.

L'analyse probabiliste de la persistance et de l'espacement des discontinuités de chaque famille entrant dans la configuration dangereuse comme d'ailleurs l'observation de l'état de fragmentation et des cicatrices de la falaise permettent d'estimer la taille la plus probable des blocs au départ. Un contrôle de ces estimations peut être effectué sur la base des blocs éboulés.

8. Analyse probabiliste

Le prolongement effectif des discontinuités à l'intérieur du massif rocheux est en général difficilement observable. Pour tenter d'appréhender la troisième dimension de l'agencement structural, le CRSFA a développé des méthodes statistiques et probabilistes (Jaboyedoff et al. 1996). Ces méthodes peuvent être utilisées à chaque étape de la détermination d'un aléa.

L'expérience a montré que les espacements entre discontinuités d'une même famille répondaient sensiblement à une répartition de type exponentielle négative (Hudson & Priest 1979, 1983; Priest 1993) selon la formule

$$\text{Probabilité (espacement} \geq \text{constante)} = \exp\left(\frac{-\text{constante}}{\text{espacement}}\right)$$

alors que la persistance est définie par sa valeur moyenne (constante).

Pratiquement les deux cas de figure suivants peuvent être traités par l'analyse probabiliste:

- *L'intersection entre deux familles de discontinuités*

On cherche ici à connaître la probabilité pour que deux familles de discontinuités se recoupent efficacement, c'est-à-dire de manière à pouvoir désolidariser à coup sûr un compartiment rocheux. Pour ce faire, la condition est que la persistance de la famille 1 soit supérieure ou égale au double de l'espacement de la famille 2 et réciproquement (fig. 5).

La probabilité P_1 que la famille 1 recoupe la famille 2 est:

$$P_1 = 1 - \exp\left(\frac{-L_1 \sin \theta}{2 e_2}\right)$$

La probabilité P_2 que la famille 2 recoupe la famille 1 est:

$$P_2 = 1 - \exp\left(\frac{-L_2 \sin \theta}{2 e_1}\right)$$

θ = angle entre les pôles des familles de discontinuités
 $L_{1,2}$ = persistance moyenne des familles de discontinuités
 $e_{1,2}$ = espacement moyen des familles de discontinuités

La probabilité P pour que les deux familles se recoupent efficacement vaut donc $P = P_1 \cdot P_2$

- *L'intersection entre une famille de discontinuités et la topographie*

La topographie est représentée ici par le modèle numérique de terrain MNT25 de l'Office fédéral de la topographie, de maille carrée et égale à 25 m. A chaque maille du réseau correspond une facette de la topographie de surface S_i (S_1 sur la figure 6). Vue en section, chaque discontinuité occupe une surface (S) égale au produit de sa persistance (L) et de son espacement moyens (e). Cette surface est projetée contre la topographie, ce qui permet de calculer la surface moyenne occupée

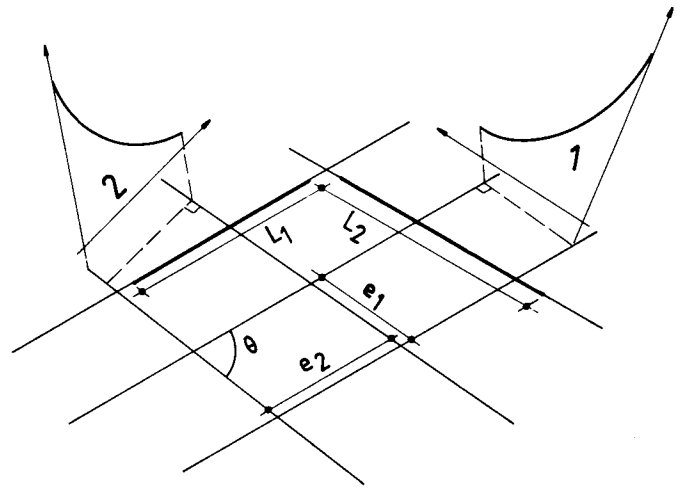


Fig. 5. Intersection entre deux familles de discontinuités. La condition est que la persistance L_1 de la famille 1 soit supérieure ou égale au double de l'espacement e_2 de la famille 2 et réciproquement. Est considérée la persistance moyenne par famille, tandis que les espacements obéissent à une loi de répartition évoquée par les courbes suivant un axe vertical (modifié d'après Jaboyedoff et al. 1996).

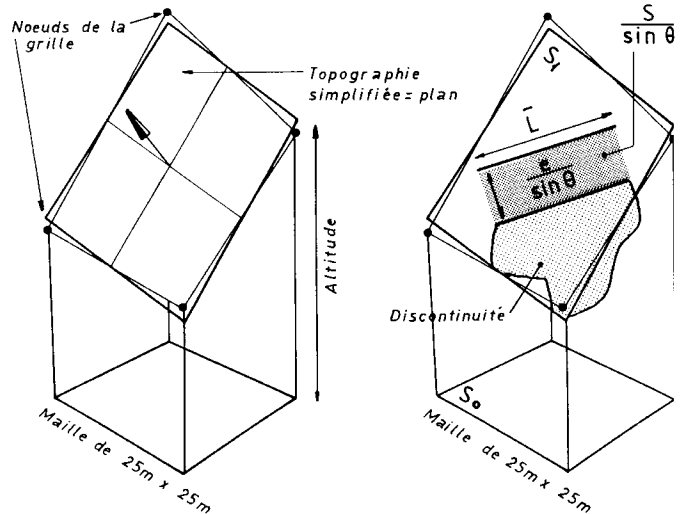


Fig. 6. Intersection entre une famille de discontinuités et la topographie. A chaque maille du réseau correspond une facette de la topo numérisée de surface S_i . Vue en section, chaque discontinuité occupe une surface (S) égale à $L_{\text{moy}} \cdot e_{\text{moy}}$. Par projection de S sur la facette topo (gris foncé) on peut calculer la surface moyenne occupée par une discontinuité sur ladite topo ($S/\sin\theta$, où θ est l'angle entre la discontinuité et la surface topo), puis le nombre moyen de discontinuités d'une famille recoupant une facette topo ($S_i \sin\theta/S$). Chaque facette ou maille de la topo numérisée est donc affectée d'un coefficient de densité d'intersection avec une famille de discontinuités (modifié d'après Rouiller et al. 1997).

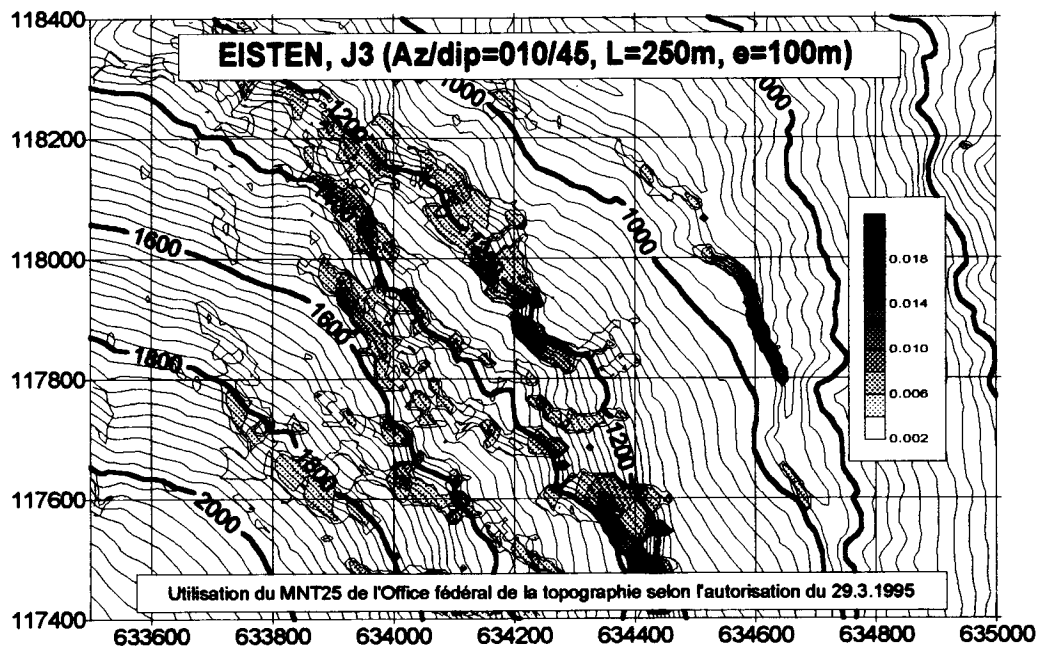


Fig. 7. Carte d'isoprobabilité d'intersection entre une famille et la topo (Az = azimut, dip = pendage, L = persistance, e = espacement de J3). Les parties sombres correspondent à une densité maximale de recouplement et sont les plus susceptibles de générer un aléa.

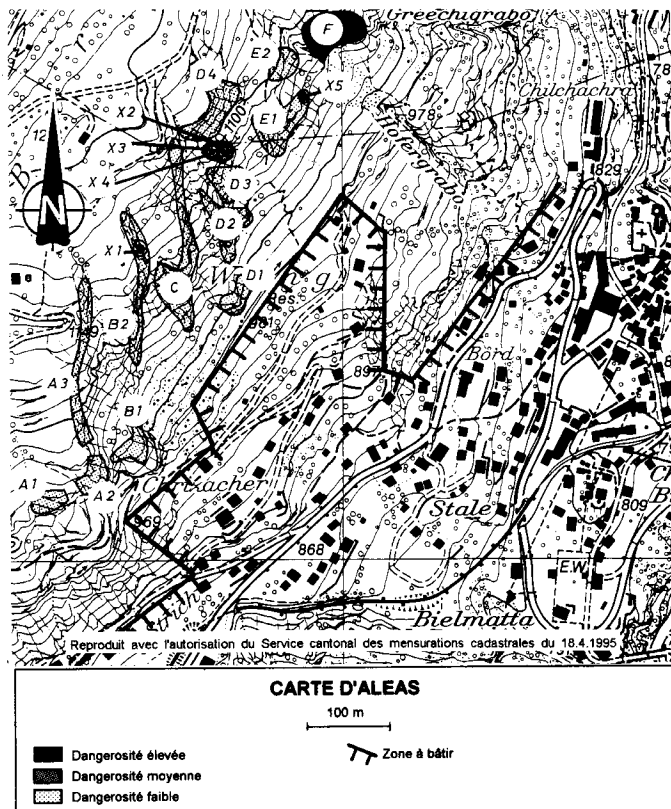


Fig. 8. Carte d'aléas. Chaque aléa est flanqué d'un code qui renvoie à une fiche descriptive où sont consignés mécanisme de mobilisation, volume des compartiments, taille des blocs, etc.

par une discontinuité sur ladite topographie ($S/\sin\theta$, où θ est l'angle entre la discontinuité et 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 recouplement par une famille de discontinuités.

Cette démarche permet de tirer une *carte d'isoprobabilité* d'intersection de la topographie avec une famille de discontinuités jugée dangereuse tel par exemple un plan de glissement profond. Les périmètres ombrés de la figure 7 sont ceux où la famille J3 recoupe la topographie avec une densité maximale. On dégage de cette carte les périmètres où la discontinuité considérée est le plus susceptible de générer des aléas. Les sites potentiellement les plus dangereux sont ensuite reconnus in situ.

9. Carte d'aléas et fiche descriptive

La carte d'aléas ponctue et condense les résultats de l'analyse structurale et géomécanique. Dans l'exemple de la figure 8, chaque aléa est caractérisé par son périmètre et sa dangerosité. Pour chacun, un code renvoie à une fiche descriptive où sont consignés type, mécanisme, volume des compartiments, taille des blocs, etc.

10. Résumé et discussion de la méthodologie

En résumé et en suivant l'ordre chronologique de la démarche MATTEROCK:

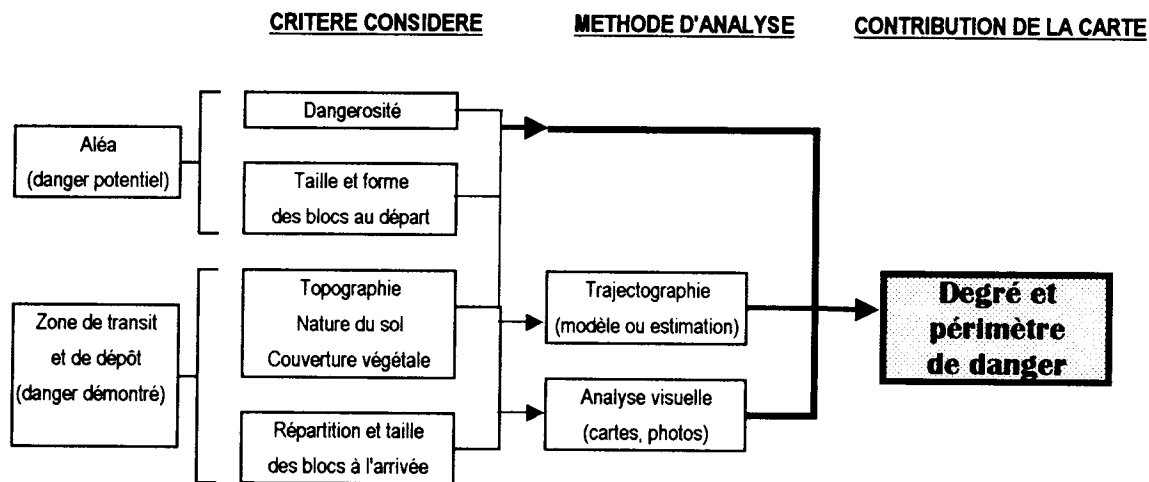


Fig. 9. Flow-chart d'élaboration de la carte de danger falaise (tiré de Rouiller et al. 1997).

- le périmètre localise l'aléa en tant que la source du danger;
- la dangerosité exprime la **probabilité de mobilisation** de l'aléa;
- l'étude trajectographique permet d'évaluer la **probabilité d'atteinte** d'un site donné par un bloc ainsi que l'**intensité** énergétique de l'impact;
- probabilité de mobilisation et probabilité d'atteinte forment la **probabilité d'occurrence** d'un impact;
- intensité et probabilité d'occurrence de l'impact déterminent le **degré de danger** au moyen du diagramme de la figure 2.

Le flow-chart de la figure 9 relie la notion de danger potentiel exprimée par le concept d'aléa avec les autres paramètres intervenant dans l'établissement du degré et du périmètre de danger. Cela a l'avantage de mieux intégrer dans la carte de danger un diagnostic de potentialité pour le futur. L'examen des zones de transit et de dépôt ne doit bien entendu pas être négligé: la morphologie et la résistance géotechnique du sol sont des paramètres indispensables à toute analyse trajectographique, par ailleurs calibrée en fonction de la répartition des blocs dans la pente. Il n'en demeure pas moins que toute l'originalité de la démarche consiste à *prendre en compte le danger potentiel à partir de critères dynamiques* (mécanisme de mobilisation, état d'altération, etc.) et non pas en observant des témoins figés dans la falaise voire «muets» au pied de celle-ci.

Le point faible de la méthodologie à ce stade de développement réside dans la difficulté d'exprimer le degré de dangerosité d'un aléa. Tant qu'on se satisfait de trois degrés (comme pour l'évaluation du danger), la reproductibilité est bonne entre utilisateurs de MATTEROCK. La recherche se poursuit au CRSFA pour pondérer le degré de dangerosité de manière plus fine en établissant notamment une échelle chiffrée.

Remerciements

Nous sommes reconnaissants à la direction du PNR31, sans laquelle le développement de cette méthodologie n'aurait pas été possible. Un merci tout par-

ticulier au Prof. F. Descoedres de l'EPFL qui n'a cessé de nous encourager de travailler dans cette direction. Le traitement statistique et probabiliste n'aurait pas abouti sans l'intérêt et la compétence pour le sujet de MM. M. Jaboyedoff et F. Philipposian (CRSFA). Nos remerciements s'adressent également à MM. M. Sartori (Université de Genève), A. Wagner (ITECO) et O. Lateltin (SHGN) pour les fructueuses discussions.

BIBLIOGRAPHIE

- CRSFA 1991: Bergsturz Grossgauer Randa, étude structurale et géomécanique (par Wagner, A.). Rapport CRSFA/91.35. Sion. Inédit.
- CRSFA 1997: Instabilités de falaise. Lexique technique. Rapport CRSFA/97.07. Sion. Inédit.
- HEIM A. 1932: Bergsturz und Menschenleben. Vjschr. natf. Ges., Zürich, Jg. 77.
- HOECK, E. & BRAY, J. 1981: Rock slope engineering (3rd ed). – IMM, London.
- HUDSON, J. A. & PRIEST, S. D. 1979: Discontinuities and rock mass geometry. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 16, 339–362.
- 1983: Discontinuity frequency in rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 20, 73–89.
- JABOYEDOFF, M., PHILIPPOSIAN, F., MAMIN, M., MARRO, CH. & ROUILLER, J.-D. 1996: Distribution spatiale des discontinuités dans une falaise. Approche statistique et probabiliste. Rapport de travail PNR31. Hochschulverlag AG, ETH Zürich.
- OFEE - OFEFP 1995: Légende modulable pour la cartographie des phénomènes. Office central fédéral des imprimés et du matériel, Berne. No de commande 310.022.
- PRIEST, S. D. 1993: Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman & Hall, London.
- ROUILLER, J.-D. 1992: Eboulement de Randa. Route et trafic 5, 373–376.
- ROUILLER, J.-D., JABOYEDOFF, M., MARRO, CH. & PHILIPPOSIAN, F. 1997: Pentes instables du Pennique valaisan – MATTEROCK: une méthodologie d'auscultation des falaises. Rapport final PNR31. Hochschulverlag AG, ETH Zürich (sous presse).
- SCHINDLER, C., CUENOD, Y., EISENLOHR, T. & JORIS CH.-L. 1993: Die Ereignisse vom 18. April und 9. Mai bei Randa (VS) – Ein atypischer Bergsturz in Raten. Eclogae geol. Helv. 86, 643–665.
- WAGNER, A., LEITE, E. & OLIVIER, R. 1990: SHIVA, a landslide hazard mapping software. Version 1.0. – Inst. Geophys. Univ. Lausanne & ITECO Affoltern a.A (eds).

Manuscrit reçu le 10 octobre 1996

Révision acceptée le 28 août 1997