



Source: Programme Interreg 2c - "Falaises",
Prévention des mouvements de versants et des
instabilités de falaises. Confrontation des
méthodes d'études des éboulements rocheux dans
l'arc alpin, p. 70-79.

Ouvrage disponible sous
www.crealp.ch
www.risknat.org

Matterock:

une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des instabilités rocheuses

F. Baillifard¹, M. Jaboyedoff¹, J.-D. Rouiller¹ & D. Tosoni¹

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.

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

¹ CREALP - Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin, Industrie 45, CH-1951 Sion

Tél.: ++41 +27 324 03 80 / Fax: ++41 +27 322 55 67 / e-mail: crealp@crealp.ch / web: www.crealp.ch

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 populations 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 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 des chutes de blocs potentiels nommée Matterock (Wagner et al., 1990; Rouiller et Marro, 1997; Rouiller et al., 1997, 1998; Jaboyedoff et al. 1999) [fig. 1]. Cette méthodologie a été appliquée à plus de cinquante sites en Valais, notamment dans les vallées du Mattertal, 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.

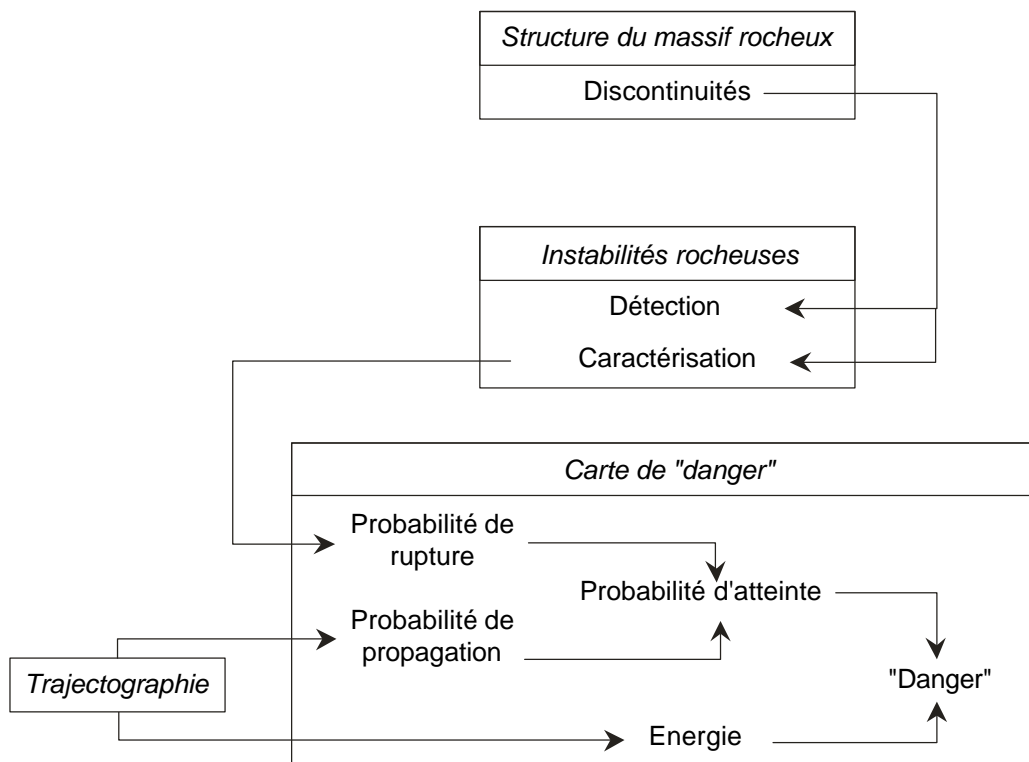


Figure 1: Flow-chart de la méthodologie Matterock.

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. 2]. 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").



Figure 2: 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 peuvent être 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.

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. 3].

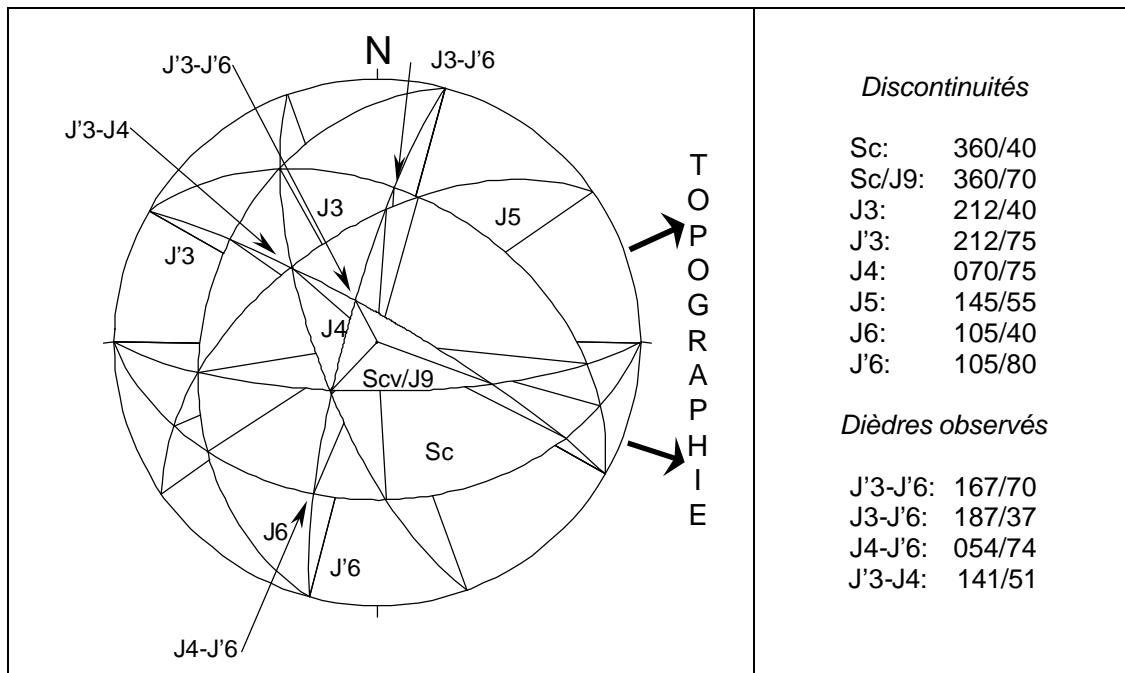


Figure 3: Stéréogramme synthétique des discontinuités de la route de Cologne (Schmidt-Lambert, hémisphère supérieur).

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 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:

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

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:

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

- **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 de la persistance moyenne \bar{T} , soit:

$$\bar{s} = L\bar{T} \quad (3)$$

de plus:

$$n\bar{s} = S_{obs} = nL\bar{T} \quad (4)$$

L est donc donné par:

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

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):

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

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

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

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.

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. 4].

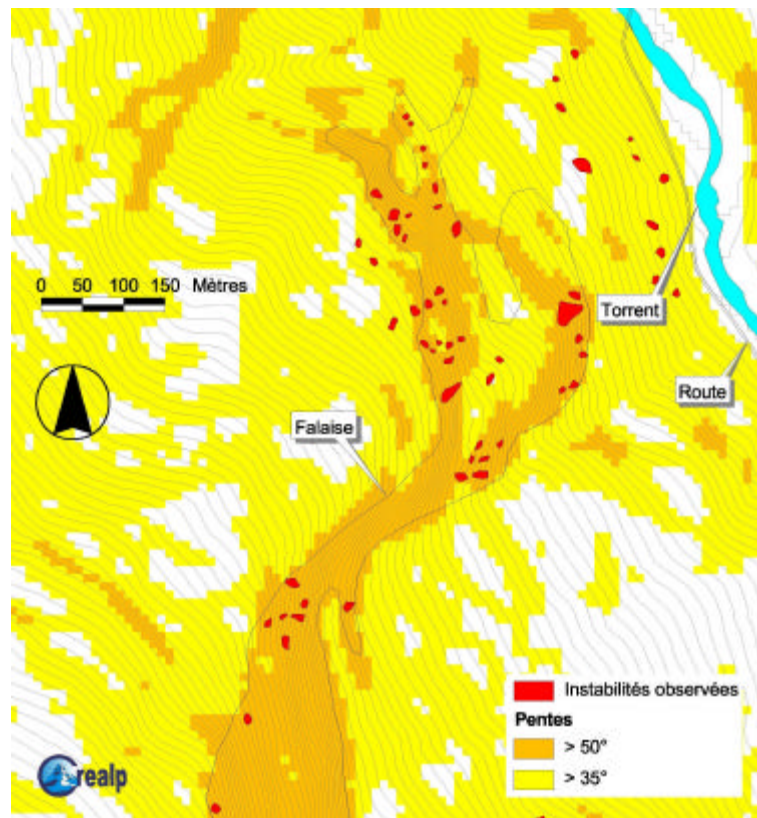


Figure 4: Carte des pentes et comparaison avec les instabilités observées.

- **Comptage des intersections discontinuités - topographie**

A 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 ($S/\sin q$, où q est l'angle entre le pôle de la discontinuité et celui de la surface topographique), puis le nombre moyen de discontinuités d'une famille recoupant une facette topographique ($S_i \sin q / S$).

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. 5] pour le plan de glissement J6 (105/80, persistance 10 mètres, espacement 1 mètre). Les zones où la famille J6 recoupe la topographie avec une densité maximale correspondent aux zones où la famille de discontinuités considérée peut générer des instabilités.

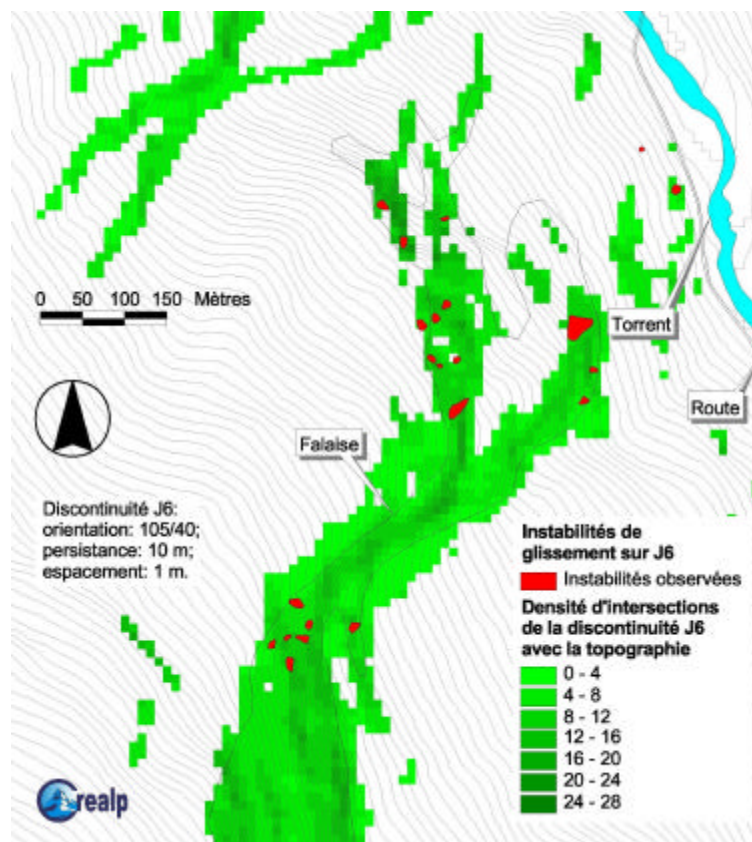


Figure 5: Carte de densité d'intersection des discontinuités J6 et de la topographie et comparaison avec les instabilités observées.

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. 6].



Figure 6: Photo d'une instabilité de glissement superficiel sur une discontinuité J6.

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. 1]:

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

Tableau 1: 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.

Elaboration 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. 7]. 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.

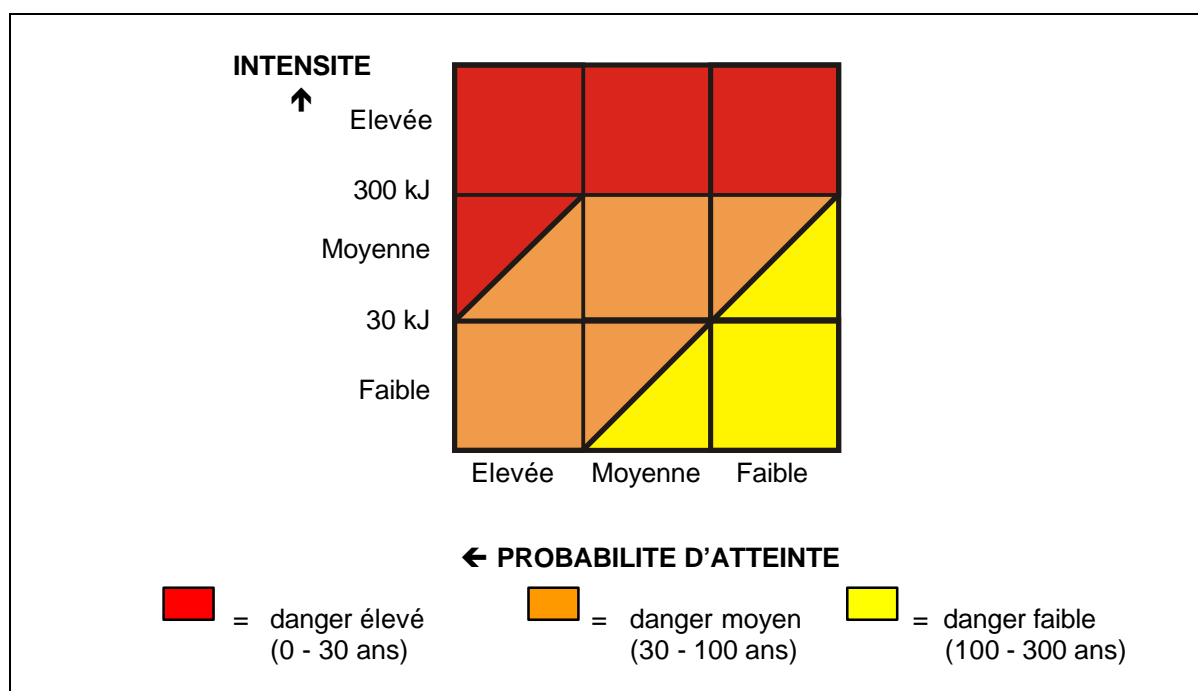


Figure 7: Diagramme d'estimation du degré de "danger" en un point donné de l'espace à étudier.

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. 2]:

- 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).

| | | <i>Probabilité de rupture</i> | | |
|-----------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|---------------|
| | | <i>élevée</i> | <i>moyenne</i> | <i>faible</i> |
| <i>Probabilité de propagation</i> | <i>élevée</i> | élevée | moyenne | faible |
| | <i>moyenne</i> | moyenne | faible | - |
| | <i>faible</i> | faible | - | - |

Tableau 2: Estimation de la probabilité d'atteinte à l'aide de la probabilité de rupture et la probabilité de propagation.

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:

- **élevée (> 300 kJ):** destruction partielle ou totale des bâtiments atteints, les personnes atteintes peuvent être tuées;
- **moyenne (30-300 kJ):** dégâts aux bâtiments atteints, les personnes atteintes peuvent être tuées. Une énergie de 300 kJ correspond à la résistance standard d'un mur en béton armé;
- **faible (< 30 kJ):** les bâtiments atteints sont faiblement endommagés, les personnes atteintes peuvent être tuées ou blessées. Une énergie de 30 kJ correspond à la résistance standard d'une barrière en bois de chêne d'environ 30 cm d'épaisseur.

La modélisation de la chute des blocs (simulation trajectographique) permet d'évaluer l'intensité le long de leur trajectoire. A défaut, l'observation des blocs éboulés (taille, répartition dans la pente, traces d'impact, etc.) permet d'estimer sommairement cette intensité.

Exemple de Cogne

La carte de "danger" de la zone 1 de la route de Cogne a été réalisée en utilisant les résultats du cadastre des phénomènes, des cartes des phénomènes, géomorphologique et de l'utilisation du sol, ainsi que de deux simulations trajectographiques en 2D.

Deux types de phénomènes ont été distingués sur cette carte [fig. 8]:

- **La chute de blocs.** Chaque instabilité génère son propre périmètre de "danger". La carte de "danger" finale correspond au "lissage" de l'ensemble des zones de "danger". La plus grande partie de la route se trouve en "danger" élevé de chutes de blocs (nombreuses

traces d'impact, fréquents événements signalés, proximité de la falaise très disloquée, probabilité de propagation élevée) [fig. 8]. Le tronçon situé entre les km 8+600 à 9+040 est particulièrement menacé (présence de nombreuses instabilités dont la probabilité de rupture a été qualifiée comme élevée, situées à une faible distance de la route). Le tronçon situé entre les km 9+040 à 9+200 est menacé par un danger moyen de chutes de blocs (falaise plus éloignée, moins de traces d'impact, probabilité de propagation moyenne)

- Les **éboulements**, pour lesquels l'intensité est toujours élevée. Dans ces cas, seules les limites d'atteinte ont été dessinées [fig. 8]. Les traits sont fonction de la probabilité de rupture de l'instabilité générant le "danger". De nombreuses instabilités susceptibles de provoquer des éboulements ont été détectées (la falaise est très disloquée). Seul le tronçon situé entre les km 9+050 à 9+400 est moins menacé.

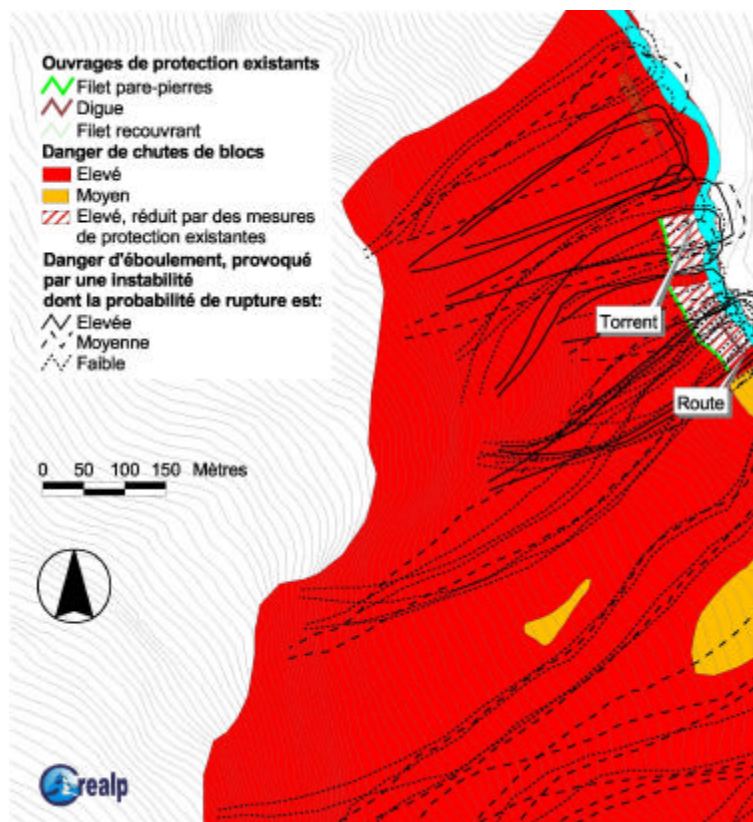


Figure 8: Carte de "danger"

Conclusions

L'analyse structurale et géomécanique est indispensable pour évaluer le "danger" lié aux instabilités rocheuses. La méthode Matterock implique la détermination de l'agencement structural du massif rocheux étudié, pour permettre la détection des secteurs potentiellement instables. La probabilité de rupture des instabilités est ensuite estimée. La carte de "danger", indispensable à l'aménagement du territoire en région de montagne, est produite à l'aide d'informations complémentaires telles que simulations trajectographiques ou observation directe des blocs éboulés.

Cette méthode est appelée à évoluer avec le temps, notamment par le développement des traitements informatisés, principalement liés à la topographie. Malgré une certaine automatisation, cette méthode ne peut pourtant s'affranchir de l'expérience de celui qui l'applique. Quelques orientations pour de futurs développements peuvent être mentionnés:

- une synthèse des données structurales (stéréogramme et caractéristiques géomécaniques des discontinuités) à l'échelle régionale devrait permettre de dégager de larges périmètres caractérisés par les mêmes agencements structuraux;
- le développement des outils informatiques de confrontation agencement structural-topographie devra être entrepris afin de confronter non seulement un plan ou un dièdre de glissement, mais aussi des agencements structuraux dangereux complets;
- l'évaluation de la probabilité de rupture des instabilités devra être améliorée, notamment par un suivi à long terme de la déstabilisation de massifs rocheux.

Bibliographie

Crosta, G., *Evaluating rock mass geometry from photographic images*, in "Rock Mechanics and Rock Engineering", 30(1), 35-58, 1997

Descoedres, 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: méthodologie 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., Schafer, 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