HAL
open science

Caractérisation mécanique d'un grand versant rocheux instable au moyen d'un système RMR- Cas de la Clapière (Alpes Françaises)

Yann Gunzburger, Véronique Merrien-Soukatchoff

To cite this version:

Yann Gunzburger, Véronique Merrien-Soukatchoff. Caractérisation mécanique d'un grand versant rocheux instable au moyen d'un système RMR- Cas de la Clapière (Alpes Françaises). Symposium International PARAM 2002, Sep 2002, Paris, France. pp.541-548. ineris-00972375

HAL Id: ineris-00972375

https://ineris.hal.science/ineris-00972375v1

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE D'UN GRAND VERSANT ROCHEUX INSTABLE AU MOYEN DU SYSTÈME RMR - CAS DE LA CLAPIÈRE (ALPES FRANÇAISES)

MECHANICAL CHARACTERISATION OF A LARGE INSTABLE ROCK SLOPE USING THE ROCK MASS RATING SYTEM - CASE OF "LA CLAPIÈRE" (FRENCH ALPS)

Y. Gunzburger, V. Merrien-Soukatchoff
LAEGO-INERIS, Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt, 54042 Nancy cedex, France

RÉSUMÉ - L'étude des mécanismes de déformation des grands versants rocheux par modélisation numérique suppose la connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux impliqués à l'échelle des mailles de calcul. Ces caractéristiques ne peuvent être mesurées en laboratoire. On propose donc ici une méthodologie reposant sur le Système RMR et on montre comment elle a pu être mise en œuvre sur le versant de la Clapière (Alpes françaises).

ABSTRACT - The study of large rock slopes deformation mechanisms by mean of numerical modelling cannot be undertaken without having determined the mechanical characteristics of the involved materials at the scale of the mesh elements. Theses characteristics cannot be measured by laboratory tests. Here we propose a methodology to determine them using the RMR System. This methodology has been tested on the "La Clapière" slope instability (French Alps).

1. Introduction

L'expérience accumulée depuis de très nombreuses années sur les problèmes de stabilité des talus anthropiques (carrières et mines à ciel ouvert, déblais et remblais routiers, etc.) a permis l'élaboration d'une méthodologie cohérente pour la prévision des ruptures et le choix de mesures confortatives adaptées. Cette méthodologie repose essentiellement sur la modélisation numérique, les paramètres mécaniques utilisés étant souvent déterminés par des essais de laboratoire. Cette démarche est rendue possible par la taille réduite des objets étudiés. Elle n'est donc *a priori* pas applicable dans le cas des grands mouvements de versant puisque :

- les matériaux constitutifs peuvent être très hétérogènes (présence de lithologies variées) et leurs caractéristiques mécaniques ne peuvent être mesurées en laboratoire à l'échelle des mailles du calcul numérique. Les appareillages de laboratoires ne sont pas de taille suffisante ;
- les discontinuités sont trop nombreuses pour pouvoir faire l'objet d'un relevé exhaustif et ne peuvent être toutes introduites explicitement dans le calcul. De ce fait, on est obligé de recourir à une homogénéisation (au moins partielle), mais les caractéristiques du matériau homogénéisé restent inconnues.

Malgré cela, la modélisation numérique est un outil d'investigation essentiel pour l'étude des instabilités de grands versants puisqu'elle permet de *déterminer quantitativement les mécanismes de déformation et de rupture.* Comment, dans les conditions précitées, déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux concernés ?

La présente communication propose une méthode simple de *quantification de l'état mécanique (altération et fracturation) d'un grand versant rocheux instable* en vue de la modélisation numérique de son comportement. Cette méthode repose sur l'utilisation du système de classification géotechnique RMR. On montre comment son application au versant de La Clapière (Alpes-Maritimes, France) a permis, non seulement de dresser une « carte mécanique » du versant, mais également de déterminer indirectement les paramètres mécaniques utilisés pour le calcul.

2. Les classifications géotechniques

Pour les besoins du génie civil et minier, les mécaniciens des roches et les ingénieurs ont élaboré au cours des dernières décennies différentes méthodes de hiérarchisation des massifs rocheux

fracturés selon leur « qualité géotechnique », caractérisée de manière simple et reproductible au moyen d'un ou de plusieurs facteurs quantitatifs (Hoek, 1999). Ces méthodes sont appelées « *classifications géotechniques* ». Parmi les plus courantes d'entre-elles, recensées par Bieniawski (1989), la plupart sont clairement destinées à être appliquées lors de la réalisation de travaux souterrains et ne pouvaient être utilisées pour l'étude des instabilités de versants. C'est pourquoi on ne présentera ici que les quatre classifications qui pouvaient *a priori* être mises en œuvre.

2.1. L'indice RQD (Deere et al. , 1967)

L'indice RQD (Rock Quality Designation) permet de quantifier simplement l'état de fracturation de la roche. Sa détermination repose sur la réalisation d'un carottage de longueur L et sur la mesure de la longueur totale des segments intacts de la carotte (c'est-à-dire non traversés par une discontinuité qui les sépare en plusieurs morceaux) de plus de 10 cm de long (1).

$$RQD = (\text{somme des longueurs des segments intacts de plus de } 10\text{ cm}) / L \qquad (1)$$

2.2. Le Système RMR (Bieniawski, 1989)

Développé par Bieniawski au cours des années 1972-1973, le Système RMR (Rock Mass Rating System), a bénéficié de nombreuses modifications et extensions de la part de l'auteur lui-même, mais aussi grâce aux contributions apportées par d'autres. Il a été appliqué à des domaines de plus en plus variés, depuis l'exploitation minière et le creusement de tunnels jusqu'au calcul de fondations de barrages, en passant par l'étude de la stabilité des pentes, etc. Il repose sur l'évaluation de 6 paramètres qualitatifs ou quantitatifs :

1- la résistance à la compression simple de la roche saine σ_c,
2- l'indice RQD du massif rocheux,
3- l'espacement moyen des discontinuités,
4- l'état général des discontinuités (ouverture, persistance, rugosité...),
5- les conditions hydrogéologiques du massif rocheux,
6- l'orientation des discontinuités par rapport aux directions représentatives du problème traité.

Alors que les cinq premiers paramètres sont extrêmement généraux, le sixième paramètre rappelle la vocation pratique du Système RMR et son utilisation dans les domaines du génie civil et minier. Ce paramètre permet en effet de moduler l'évaluation qui est faite des paramètres précédents en fonction de l'impact des discontinuités sur « l'ouvrage >> qui va être réalisé. L'évaluation du paramètre 6 dépend donc fortement du type de problème traité.

À chaque valeur de l'un des six paramètres est associée une note. On dispose ainsi pour un massif rocheux donné de 6 notes R_1, R_2 ... et R_6. Les paramètres 1, 2 et 5 sont évalués pour l'ensemble du massif rocheux alors que les paramètres 3, 4 et 6 sont évalués séparément pour chaque famille de discontinuités. D'après Priest (1983), dans le cas général où le massif rocheux est traversé par plusieurs familles de discontinuités, il faut retenir pour R_3, R_4 et R_6 les moyennes des notes attribuées séparément à chacune de ces familles.

On peut en fait calculer trois indices RMR qualifiés respectivement de « RMR à l'état sec », « RMR de base » et de « RMR modifié » (2).

$$RMR_{sec} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \; ; \; RMR_{base} = RMR_{sec} + R_5 \; ; \; RMR_{modifié} = RMR_{base} + R_6 \qquad (2)$$

$$\text{avec} \quad 8 < RMR_{sec} < 85 \qquad 8 < RMR_{base} < 100 \qquad -42 < RMR_{modifié} < 100$$

Signalons que si l'un des paramètres 2 et 3 ne peut être évalué, il est possible d'estimer la valeur de celui qui fait défaut à partir de l'autre paramètre uniquement, avec une certaine marge d'erreur bien entendu. Quant au paramètre 4, il se décompose en cinq sous-paramètres qui peuvent être évalués séparément : la persistance des discontinuités, leur ouverture, leur rugosité, la nature (et l'épaisseur) du remplissage éventuel, l'intensité de l'altération. On obtient alors la note globale R_4 en sommant les cinq notes partielles correspondant aux cinq sous-paramètres.

2.3. Le Système SMR (Romana, 1985)

Les travaux de Romana ont essentiellement eu pour but d'éclaircir l'évaluation de la note R_6 du Système RMR dans le cas de l'étude de la stabilité des talus rocheux. Quoique pouvant prendre des valeurs très élevées (et pouvant donc intervenir de manière prépondérante dans la valeur finale du RMR), ce paramètre n'avait en effet pas fait l'objet d'une définition quantitative de la part de Bieniawski dans ce cas, contrairement à ce qui a été fait, par exemple, pour les tunnels. Romana propose ainsi de définir pour lès talus un indice SMR (Slope Mass Rating) calculé comme indiqué par (3).

$$SMR = RMR_{base} - (F_1.F_2.F_3) + F_4 \qquad (3)$$

Le produit $F_1.F_2.F_3$ est destiné à remplacer efficacement R_6 et le terme supplémentaire F_4 permet de tenir compte, pour l'évaluation de la stabilité d'un talus, de son origine naturelle ou anthropique et éventuellement de son mode d'excavation.

2.4. Le Q-System (Barton et al. , 1974)

Cette classification, a été développée par Barton, Lien et Lunde au Norwegian Geotechnical Institute comme une aide à la décision pour le choix de la méthode de soutènement des tunnels. L'estimation de la qualité Q du massif rocheux ($0,01 < Q < 1000$) se fait via l'estimation de six paramètres :

1- l'indice RQD,
2- un indice relatif au nombre de familles de discontinuités, soit J_n (Joint set number),
3- un indice relatif à la rugosité de la discontinuité la plus défavorable à l'ouvrage, soit J_r (Joint roughness number),
4- un indice relatif au degré d'altération et la nature du remplissage des discontinuités les plus fragiles, soit J_a (Joint alteration number),
5- un indice relatif à l'intensité des venues d'eau, soit J_w (Joint water reduction number),
6- un indice relatif à l'état de contrainte, soit SRF (Stress Reduction Factor).

L'indice Q se calcule simplement par la relation (4) :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \qquad (4)$$

2.5. Choix d'un système de classification géotechnique

Il est clair qu'aucune des classifications exposées ci-dessus n'est vraiment adaptée à l'étude de la « qualité géotechnique » d'un versant. Toutes présentent des difficultés. En particulier, certains paramètres des systèmes SMR et Q sont totalement inadaptés et ne peuvent pas être estimés. C'est le cas notamment du SRF de Barton ,qui est prévu pour les travaux souterrains, et des coefficients F_1, F_2 et F_3 de Romana, qui sont définis uniquement pour des instabilités structurales de petite taille (glissements plans et basculements). Comme, par ailleurs, l'indice RQD est plutôt rudimentaire et basé sur une mesure réalisée en forage, nous avons choisi d'utiliser le système RMR. Par ailleurs le RMR est le système le plus cité dans la littérature (par exemple par Agliardi, 2001) et il permet d'évaluer indirectement les paramètres nécessaires à une modélisation (§ 6.2).

Notre étude s'est limitée à l'évaluation du « RMR sec ». Les paramètres qui doivent être évalués sont donc :

- pour le massif rocheux dans son ensemble : la résistance à la compression simple de la matrice,
- pour chaque famille de discontinuités : des valeurs moyennes d'espacement, de persistance, d'ouverture, de rugosité, de remplissage et d'altération.

3. Le versant instable de La Clapière : présentation succincte

Dans les années 1970, des déformations manifestes (apparition de crevasses et d'escarpements, chutes répétées de blocs, etc.) d'une pente montagneuse située en rive gauche de la vallée de la Tinée, juste en aval du village de Saint-Étienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes, France), ont fait prendre conscience de l'existence à cet endroit d'une instabilité de grande ampleur connue par la suite sous le nom de *mouvement de versant de La Clapière* (Follacci, 1987). Cette instabilité occasionne encore actuellement des déplacements de l'ordre de 1m/an en moyenne sur une extension de 1,5 km et un dénivelé de 700 m environ dans les para- et orthogneiss migmatitiques du socle hercynien de l'Argentera-Mercantour (Formations d'Anelle et d'Iglière, respectivement).

Si les risques d'une rupture d'ensemble de la masse mobile semblent aujourd'hui écartés, les recherches n'en demeurent pas moins nombreuses et variées dans l'objectif de mieux comprendre les causes de l'instabilité et les mécanismes de déformation du massif rocheux. Ces études sont d'autant plus pertinentes que les désordres ne se limitent pas à la zone précédemment décrite, mais affectent une surface beaucoup plus étendue, comme l'ont montré les investigations récentes (description de morphostructures caractéristiques sur le terrain et sur des photographies du versant).

Parmi les approches utilisées, on peut citer une modélisation numérique réalisée avec le code de calcul UDEC (Gunzburger, 2001 ; Gunzburger *et al.*, 2002) et dont les paramètres ont été déterminés au moyen du Système RMR, comme décrit ci-après.

4. Protocole des relevés de terrain

Un indice de classification, quel qu'il soit, n'est pas une donnée ponctuelle : il est calculé pour une zone qui doit être à la fois suffisamment petite pour être relativement homogène et suffisamment grande pour que chaque paramètre puisse y être estimé correctement. En particulier, la réalisation d'une estimation juste des caractéristiques moyennes des familles de discontinuités suppose d'avoir sous les yeux un certain nombre de discontinuités de chaque famille. La taille d'une telle zone de travail est une question ouverte. Comme dans le cas de La Clapière, les dimensions très importantes du versant excluent *a priori* toute étude exhaustive, une contrainte supplémentaire s'ajoute : la nécessité de se consacrer, au moins dans un premier temps, uniquement à l'étude de quelques zones supposées suffisamment représentatives pour permettre l'extrapolation à des zones voisines non traitées.

Nous avons choisi de travailler à l'échelle de l'affleurement (quelques mètres carrés de surface). Les points de relevé ont été déterminés de manière à échantillonner au mieux l'ensemble du versant. En pratique, des affleurements bien dégagés et au niveau desquels la fracturation est bien visible ont été sélectionnés. Les zones terreuses ou les fronts rocheux couverts de mousse ont, en particulier, été évités, afin d'avoir facilement accès à l'information. Ces affleurements, qualifiés de « stations », ont été localisés précisément sur une carte du versant de La Clapière et ont été photographiés. Deux types de mesures ont été effectuées : les mesures au scléromètre et les relevés structuraux.

4.1. Mesures au scléromètre

Le scléromètre (ou Marteau de Schmidt) est un petit dispositif portable permettant d'estimer la part d'énergie élastique restituée par un bloc rocheux lors d'une percussion d'énergie donnée. Cette grandeur est caractérisée par le « nombre de rebonds », variant de 0 (pas d'énergie restituée) à 100 (toute l'énergie du choc est restituée) que l'on peut lire directement sur l'appareil au niveau d'une réglette graduée. D'emploi courant pour vérifier le bon séchage du béton, le scléromètre est également utilisé en mécanique des roches pour réaliser une estimation aisée et rapide de la résistance à la compression simple des géomatériaux. On utilise pour ce faire un

abaque sur lequel on peut lire la valeur de ce paramètre en fonction du nombre de rebonds, du poids volumique du matériau en question et de l'orientation du scléromètre par rapport à la verticale.

Au niveau de chaque station de terrain, les mesures sclérométriques ont été réalisées, conformément aux recommandations habituelles, sur des blocs suffisamment volumineux pour ne pas bouger lors de la percussion. Nous avons choisi des surfaces lisses, propres et non micro-fracturées. Pour chaque point, il a été réalisé 10 mesures perpendiculairement aux plans de foliation et 10 mesures parallèlement à ces derniers, le scléromètre étant toujours normal à la surface d'impact.

4.2. Relevés de fracturation

Pour chaque station, les discontinuités ont été repérées le long d'une ou de plusieurs lignes de mesure matérialisées par un décamètre à ruban. Afin d'éviter d'introduire un biais d'échantillonnage, on a essayé de faire varier l'orientation de ces dernières pour avoir une image tridimensionnelle de la fracturation. Pour chaque ligne de mesure, chaque fracture a été caractérisée par :

- sa position sur la ligne de mesure (distance à l'origine),
- son orientation (azimut et pendage),
- son extension approximative,
- son ouverture moyenne et la nature du remplissage éventuel,
- sa rugosité (profil relevé au moyen d'un conformateur),
- l'état d'altération de ses épontes.

Toutes ces données ont été reportées sur des bordereaux qui ont permis de conserver la totalité des informations jusqu'à leur traitement.

5- Exploitation des données

5.1. Traitement des mesures sclérométriques

Malgré l'attention portée au choix des surfaces d'impact du scléromètre, il est arrivé bien souvent que celles-ci présentent des défauts cachés et fournissent des valeurs excessivement faibles du nombre de rebonds. Pour cette raison, les 5 valeurs les plus faibles de chaque série de 10 mesures ont systématiquement été supprimées. La moyenne des 5 valeurs les plus élevées a servi de donnée d'entrée pour la lecture de l'abaque. L'évaluation de la résistance à la compression, à partir de la mesure sclérométrique, étant très sensible à la densité du matériau, celle-ci a été mesurée en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur le terrain.

Les mesures sclérométriques ont été effectuées à la fois parallèlement et perpendiculairement à la foliation. Deux valeurs de la résistance à la compression simple et donc deux valeurs de la note R_1 ont donc été attribuées.

5.2. Relevés de fracturation

Le traitement des relevés de fracturation est une tâche assez fastidieuse qu'il faut pourtant veiller à ne pas négliger car elle est d'une grande importance dans la détermination de l'indice RMR. La première opération a consisté à repérer, pour chaque secteur, les différentes familles de discontinuités en fonction de la répartition de leurs orientations en utilisant une représentation stéréographique ainsi que des informations concernant l'histoire géologique du site. Pour chaque famille, les caractéristiques moyennes : orientation, espacement, extension, ouverture, rugosité, état d'altération et remplissage éventuel ont été déterminées. Il s'agissait d'un simple calcul pour des paramètres mesurables tels que l'extension ou l'ouverture. En revanche, cette opération n'a

pas pu être réalisée pour les variables qualitatives telles que la rugosité, l'altération et le remplissage.

L'espacement moyen a été calculé à partir des distances entre fractures repérées le long des lignes de mesure. Un coefficient de correction a été appliqué aux mesures puisque les lignes n'étaient pas orientées perpendiculairement aux plans de fractures (moyens), sauf cas exceptionnel.

Finalement, on disposait, au niveau d'une station donnée, des renseignements structuraux suivants pour chaque famille de discontinuités : orientation moyenne, espacement moyen (réel), extension moyenne et ouverture moyenne. Les notes du RMR ont été obtenues de la manière suivantes :

- R1 est la moyenne des notes $R_{1//}$ et $R_{1\perp}$ calculées à partir des valeurs moyennes de $\sigma_{c\perp}$ et $\sigma_{c//}$ estimées pour le faciès de la station au moyen du scléromètre ;
- l'espacement moyen de chaque famille donne directement accès au R_3 de celle-ci. La moyenne des R_3 de toutes les familles d'une même station constitue le R_3 de cette station ;
- l'espacement moyen de chaque famille permettait également d'en estimer le RQD. Le produit des RQD des familles d'une station était supposé constituer le RQD de la station à partir duquel on calcule son R_2 ;
- comme il n'était pas possible de calculer une valeur moyenne de rugosité, d'altération ou de remplissage, une note identique a été affectée arbitrairement aux sous-paramètres correspondants. La moyenne des R_4 des familles a donné le R_4 de la station.

Le RMR est finalement calculé par la relation (5).

$$RMR_{sec} = (R_{1//} + R_{1\perp})/2 + R_2 + R_3 + R_4 \qquad (5)$$

6. Résultats et discussion

Quinze stations de mesures ont été étudiées en deux campagnes de terrain successives. Les résultats des mesures sclérométriques ont été considérés comme satisfaisants dans la mesure où ils sont en accord avec les seuls valeurs issues d'essais en laboratoire disponibles sur ce site. On a, en particulier, retrouvé l'antagonisme entre la formation d'Anelle, peu résistante, et la formation d'Iglière, nettement plus compétente. L'utilisation du Marteau de Schmidt pour une évaluation rapide de la résistance à la compression simple des roches est donc concluante.

6.1. « Cartographie mécanique du versant »

Les indices RMR constituent la véritable synthèse de toutes les informations. Les résultats sont reportés sur la figure 1, qui reproduit une carte topographique du versant de La Clapière.

On peut noter que les valeurs du RMR sont assez variables, de 37 à 59,25. (On rappelle que la gamme de variation maximale du RMR sec est : $8 < RMR_{sec} < 85$) Les orthogneiss d'Iglière font partie des roches bien cotées (RMR = 52, par exemple), comme on pouvait s'y attendre étant donné leur très faible état de fracturation. En revanche, certains affleurements des paragneiss d'Anelle sont encore mieux notés, ce qui est plus surprenant. Ce phénomène peut être lié à l'échantillonnage : il est fort possible en effet que le RMR de certains secteurs ait été surestimé à cause de lacunes dans les relevés de fracturation. Pour permettre une évaluation équitable, il aurait fallu pouvoir effectuer des relevés aussi détaillés à chaque fois, ce que les conditions particulières du terrain (taille et orientation des affleurements) ne permettent pas nécessairement. Malgré cette restriction sur la validité des résultats, on peut noter que l'indice RMR diminue globalement lorsqu'on s'approche de la limite des désordres. Cependant, certaines stations éloignées des désordres sont particulièrement mal notées, sans doute parce qu'elles se situent dans une zone d'intense fracturation (zone de faille, par exemple) et des stations proches des

désordres sont particulièrement bien notées, soit parce que le faciès y est différent, soit parce que les relevés structuraux y sont incomplets.

Ce découpage constitue un premier élément de la « cartographie mécanique » du versant de La Clapière. Elle doit être complétée non seulement par d'autres relevés de terrain, mais également par une réflexion théorique sur les intervalles de confiance des estimations de RMR. Pour l'heure, on ne peut que s'interroger sur la signification de la « ceinture » de matériaux de faible RMR qui entoure la zone mobile : est-ce une conséquence des désordres affectant le versant ou bien préexistait-elle et a-t-elle favorisée leur apparition ? Dans ce dernier cas, est-elle liée au grand accident tectonique qui borde le secteur en mouvement au SE ?

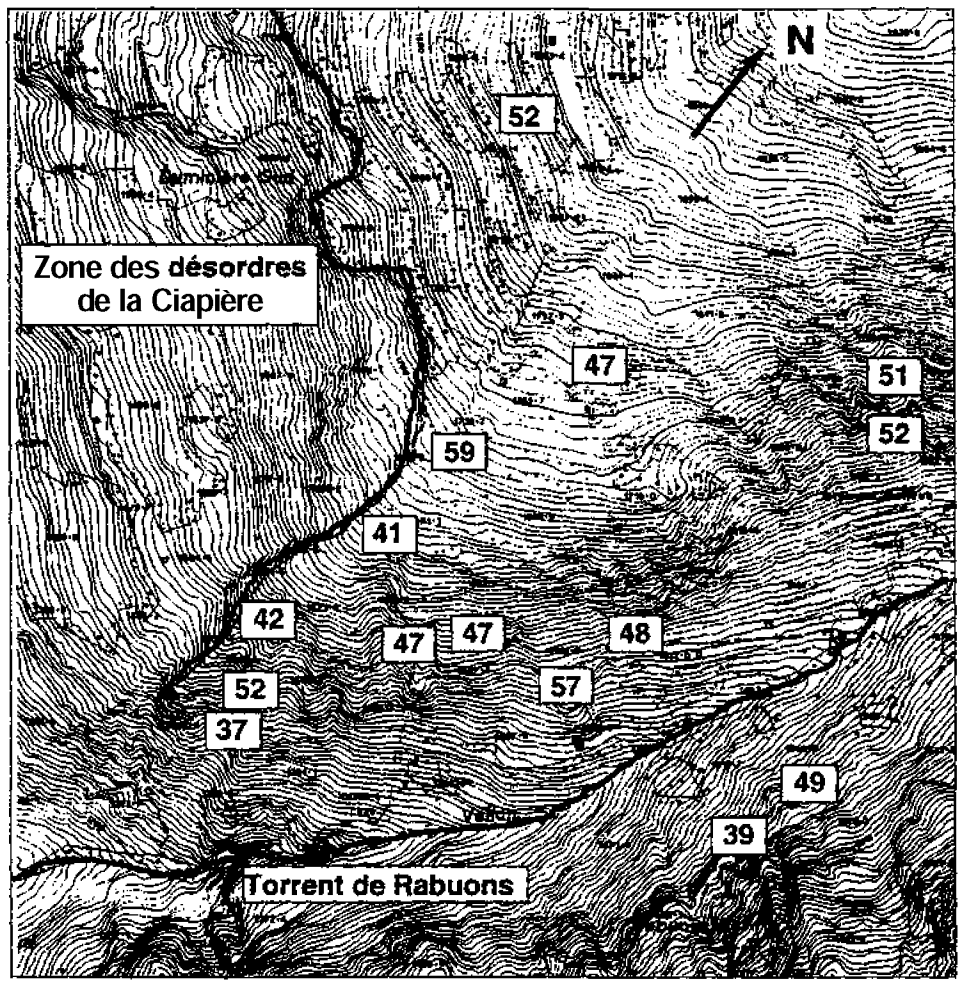

Figure 1. Valeurs de l'indice RMR affecté aux différents stations du versant de La Clapière

6.2. Paramètres mécaniques pour la modélisation numérique

La modélisation numérique a été réalisée avec le code de calcul UDEC en utilisant un milieu continu équivalent (MCE) supposé reproduire le comportement de la matrice rocheuse et des discontinuités de faible extension qu'elle comporte (Les discontinuités à l'échelle du versant ont été prises en compte explicitement.) Les indices RMR donnent une image assez fidèle du comportement du MCE, exception faite des remarques indiquées plus haut. On trouve d'ailleurs dans la littérature plusieurs relations empiriques entre les indices RMR et les caractéristiques mécaniques du MCE, que l'on qualifiera désormais de « caractéristiques équivalentes ». On retiendra surtout les expressions (6), (7) et (8) du module d'Young, de la cohésion et de l'angle de frottement interne de Mohr-Coulomb équivalents.

$E_{éq}$ (GPa) « $10^{(RMR-10)/40}$ (Serafim & Pereira, 1983) (6)

$C_{éq}$ (kPa) ≈ 5 RMR (Bieniawski, 1979) (7)

$\Phi_{éq}$ (deg) ≈ 0,5 RMR + 8,3 ± 7,2 (Trunck & Hônisch, 1989) (8)

En considérant une station particulièrement représentative, on a obtenu les caractéristiques du MCE données par les égalités (9).

$$E = 8{,}9 \text{ MPa} \qquad c = 240 \text{ kPa} \qquad \varphi = 32 \text{ degrés} \qquad \sigma_c = 4{,}8 \text{ MPa} \tag{9}$$

7. Conclusions et perspectives

L'application du Système RMR au versant de La Clapière a mis en lumière un double problème d'échantillonnage. En premier lieu, le faible nombre de stations de relevés structuraux ne permet pas de couvrir l'ensemble de la zone étudiée. Le choix même des stations n'est d'ailleurs pas quelconque puisque nous avons sélectionné des affleurements de bonne qualité pour faire les relevés, ce qui introduit un biais dans l'étude. En second lieu, le relevé même des discontinuités au niveau d'une station donnée n'est jamais exhaustif (ne serait-ce que parce que les stations n'ont pas toutes la même taille et la même accessibilité), ce qui conduit sans doute souvent à sur-estimer la « qualité géotechnique » des affleurements. Pour passer outre ces difficultés intrinsèques à la méthodologie mise en œuvre, il est envisageable d'avoir recours à la caractérisation géophysique du massif rocheux, par exemple au moyen de dispositifs électromagnétiques ou sismo-acoustiques.

Les problèmes rencontrés lors de l'investigation du versant de La Clapière sont le reflet des difficultés liées à la caractérisation « en grand » de tout massif rocheux. La démarche proposée, basée sur la méthodologie RMR, présente l'avantage d'être reproductible. Elle n'est cependant pas facile à mettre en œuvre et de nombreuses campagnes de mesures seraient nécessaires pour évaluer la variabilité des estimations. L'évaluation du RMR nous a également conduit à proposer une estimation des paramètres mécaniques pour la modélisation numérique. La hiérarchisation des zones à partir de ces estimations nous semble plus importante que la valeur absolue des paramètres. L'estimation des paramètres par cette méthode nécessiterait un calage.

8. Remerciements

Les auteurs remercient le LCPC et le Programme National Risques Naturels pour leur soutien technique et financier à ces recherches.

9. Références bibliographiques

Agliardi F., Crosta G., Zanchi A. (2001) Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology, vol. 59*

Bieniawski Z.T. (1989) *Engineering Rock Mass Classifications.* J. Wiley

Follacci J.-P. (1987) Les mouvements du versant de la Clapière à Saint-Étienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes). *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°150/151.*

Gunzburger Y. (2001) Apports de l'analyse de la fracturation et de la modélisation numérique à l'étude du versant instable de la Clapière (Saint-Étienne-de-Tinée, Alpes-Maritimes). *DEA, LAEGO - Ecole des Mines de Nancy*

Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Guglielmi Y. (2002) Mechanical influence of the last déglaciation on the initiation of the "La Clapière" slope instability (Southern French Alps). *Proceedings, 5th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE2002), Mestat ed., Presses de l'ENPC/LCPC, Paris.*

Hoek E. (1999) Practical Rock Engineering. Course notes. Site Web : http://www.rockeng.utoronto.ca/roc/Hoek/Hoek.htm.