



Utilisation des classifications de massifs rocheux pour l'analyse du comportement de pentes. Présentation de deux cas d'application

Véronique Merrien-Soukatchoff, Yann Gunzburger

► To cite this version:

Véronique Merrien-Soukatchoff, Yann Gunzburger. Utilisation des classifications de massifs rocheux pour l'analyse du comportement de pentes. Présentation de deux cas d'application. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2002), Oct 2002, Nancy, France. ineris-00972391

HAL Id: ineris-00972391

<https://ineris.hal.science/ineris-00972391>

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.

UTILISATION DES CLASSIFICATIONS DE MASSIFS ROCHEUX POUR L'ANALYSE DU COMPORTEMENT DE PENTES. PRESENTATION DE DEUX CAS D'APPLICATION

MERRIEN-SOUKATCHOFF Véronique¹, GUNZBURGER Yann¹

¹Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages, Ecole des Mines de Nancy, Parc Saurupt, 54042 Nancy Cedex, www.laego.org, Veronique.Merrien@mines.inpl-nancy.fr, Yann.Gunzburger@mines.inpl-nancy.fr.

RESUME : Les méthodes quantitatives d'analyse des pentes rocheuses nécessitent d'évaluer les propriétés du massif à l'échelle du versant. Deux cas d'application des classifications de massifs rocheux à l'évaluation des propriétés à l'échelle décimétrique à pluridécimétrique sont présentés. Dans le premier cas, les facteurs de réduction du critère de Hoek et Brown sont utilisés pour établir ce critère à l'échelle du massif et en déduire une cohésion et un angle de frottement équivalents. Dans le second cas, l'application du système RMR et de relations empiriques basées sur la note RMR ont permis d'estimer les propriétés du massif. Des calculs de stabilité, d'une part, et des calculs en contrainte-déformation, d'autre part, ont été mis en œuvre à partir des propriétés équivalentes.

MOTS-CLEFS : Classification, massifs rocheux, pentes, calcul, stabilité.

ABSTRACT: Quantitative methods of analysis of rock slopes require evaluating the properties of the rock mass at the scale of the slope. Two example of use of rock mass classifications are presented. In the first case, Hoek and Brown criteria for a rock mass is applied and equivalent cohesion and friction angle are deduced. In the second case, the estimation of RMR and the use of empirical relationships based on RMR, lead to estimate the properties of the rock mass. Stability analysis, in the first case, and stress-strain computation, in the second case, were undertaken with the equivalent characteristics.

KEY-WORDS: Classification, Rock mass, slopes, computation, stability.

1. Introduction

L'analyse quantitative de la stabilité des pentes rocheuses conduit à réaliser des calculs. Pour effectuer ces calculs il est nécessaire d'introduire des paramètres caractéristiques de l'ensemble de la pente que l'on étudie et les essais de laboratoire ne sont pas directement utilisables. Les classifications des massifs rocheux sont largement utilisées pour la conception d'ouvrages souterrains et des relations ont été proposées par différents auteurs pour évaluer les paramètres quantitatifs nécessaires à la modélisation à partir des informations qualitatives. Bien que des variantes de ces classifications (Romana, 1988) aient été proposées pour évaluer la stabilité des pentes rocheuses, les applications numériques sont beaucoup plus rares.

Nous présentons dans les paragraphes suivants deux tentatives d'application de ces méthodes à la détermination des paramètres "en grand" de massifs rocheux (échelle décimétrique à pluridécimétrique). Les caractéristiques estimées sont utilisées d'une part dans un calcul de stabilité, d'autre part dans un calcul en contrainte-déformation (éléments distincts). Une revue plus complète des méthodes de classifications et de leur application possible aux pentes est présentée par Gunzburger et Merrien-Soukatchoff (2002).

Le premier cas présenté est celui d'une carrière à ciel ouvert de marnes et calcaire. Des essais de laboratoire ont permis de déterminer les caractéristiques de la matrice rocheuse à l'échelle de l'échantillon. L'utilisation des facteurs de réduction proposés par Hoek & Brown, conduit à déterminer un critère de rupture à l'échelle du massif. Pour pouvoir utiliser un code de calcul de stabilité à l'équilibre limite, le critère de Hoek & Brown a été assimilé à une droite dans la gamme de contraintes susceptibles d'affecter le massif : une cohésion et un angle de frottement global ont donc été estimés et utilisés dans un calcul à l'équilibre limite.

Le deuxième cas exposé est celui du mouvement de terrain de la Clapière. Des relevés de fracturation, et l'estimation, à partir de mesures au scléromètre, de la résistance à la compression ont permis d'évaluer le RMR au niveau de 15 stations de mesures réparties dans la partie sud du versant. L'indice de qualité géotechnique montre une dispersion importante, mais il existe un zonage des valeurs par rapport à la distance à la zone de mouvement rapide. Une modélisation par éléments distincts de ce versant a été entreprise. Les caractéristiques nécessaires à la modélisation ont été déduites de corrélations avec le RMR proposées dans la littérature.

2. Evaluation de propriétés équivalentes à partir du critère de Hoek et Brown

2.1. Le Critère de Hoek et Brown

Hoek et Brown (1980) ont proposé un critère de rupture empirique pour les massifs rocheux fracturés. L'expression de ce critère généralisé (Hoek, 1999) est la suivante :

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

ou :

- σ_1' est la contrainte effective maximum à la rupture ;
- σ_3' est la contrainte effective minimum à la rupture ;
- σ_{ci} est la résistance à la compression de la matrice rocheuse intacte ;
- m_b est la valeur de la constante m de Hoek et Brown pour le massif rocheux ;
- s et a sont des constantes adimensionnelles qui dépendent de l'état et du degré de fracturation du massif rocheux (pour la roche intacte $s = 1$)

Ce critère peut également s'écrire sous la forme :

$$\tau = A \cdot \sigma_{ci} \left(\frac{\sigma_n' - \sigma_{tm}'}{\sigma_{ci}} \right)^B \quad (2)$$

ou :

- τ est la contrainte de cisaillement sur le plan de rupture ;
- σ_n' est la contrainte normale effective sur le plan de rupture ;
- σ_{tm}' est la résistance à la traction de la matrice rocheuse intacte ;
- A et B sont des constantes dépendant du matériau.

La résistance à la traction s'écrit sous la forme :

$$\sigma_{im}' = \frac{\sigma_{ci}}{2} \left(m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \quad (3)$$

L'utilisation du critère de Hoek et Brown pour estimer la résistance et la déformabilité d'un massif fracturé, nécessite donc d'estimer trois propriétés du massif rocheux :

1. La résistance à la compression de la roche intacte σ_{ci} ;
2. La valeur de la constante m de Hoek et Brown pour la roche intacte m_i ;
3. La qualité du massif rocheux, déduite soit des tableaux établis par Hoek et Brown avant 1995, soit de la valeur du *Geological Strength Index* GSI pour le massif rocheux.

Pour la matrice rocheuse intacte l'équation (1) devient :

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (4)$$

- m_i est la valeur de la constante m de Hoek et Brown pour la matrice rocheuse ;

2.2. Estimation de la "qualité" du massif rocheux

Pour utiliser le critère de Hoek et Brown, il est nécessaire d'évaluer la qualité du massif rocheux. Jusqu'en 1995 des tableaux proposaient directement des valeurs des paramètres s , m , A et B (Hoek et Brown, 1980, Hoek et Bray 1981) en fonction de la nature pétrographique de la roche et de son degré de fracturation. Ces valeurs permettaient d'estimer le cisaillement à la rupture par la relation (2).

En 1995, Hoek et al. ont introduit le *Geological Strength Index* (GSI) dont la valeur est également appréciée en fonction de la nature pétrographique de la roche et de son degré de fracturation. Des tableaux proposés par Hoek (1995, 1999) permettent de déterminer le GSI. Les paramètres m_b et s peuvent alors être calculés à partir du GSI par les relations :

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad (5)$$

Pour $GSI > 25$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad (6)$$

et

$$a = 0.5 \quad (7)$$

Pour $GSI < 25$

$$s = 0 \quad (8)$$

et

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (9)$$

L'étude présentée a été réalisée avant 1995, nous proposerons donc dans un premier temps des paramètres directement issus des tableaux proposés dans Hoek et Bray (1981), puis nous comparerons ces valeurs à celles calculées à partir d'une estimation du GSI.

2.3. Application à des terrains carbonatés

Dans le cadre de l'extension de carrières extrayant du matériau destiné à une cimenterie, nous avons examiné la stabilité des talus ultimes projetés. Le site d'exploitation comporte deux carrières

correspondant à l'exploitation de deux types de terrain : des calcaires du Jurassique et des alternances marno-calcaires sénoniennes. Nous avons utilisé le critère de Hoek et Brown pour déterminer les propriétés du massif calcaire d'une part, et des bancs calcaires des alternances marno-calcaires, d'autre part. La démarche est détaillée pour la carrière marno-calcaire.

Dans les bancs calcaires sénoniens, deux faciès peuvent être distingués : un faciès de couleur grise correspondant à des bancs plus "tendres", un faciès de couleur beige correspondant à des bancs plus "durs". Ces qualificatifs ont été confirmés par les essais de laboratoires (cf. Tableau 1). Les essais ont été effectués sur des échantillons ayant "supporté" le carottage, donc a priori sur du matériau non fracturé.

Tableau 1. Résultats des essais de laboratoire sur les faciès calcaires

	Résistance à la compression simple R_c			Résistance à la traction R_t
	R_c moyenne (5 valeurs)	Ecart type	Intervalle de variation	R_t moyenne (2 valeurs)
Echantillons prélevés dans les bancs les plus "durs"	235 MPa	13 MPa	232 – 264 MPa	18 MPa
Echantillons prélevés dans les bancs les plus "tendres"	105 MPa	39 MPa	50 – 142 MPa	8 MPa

Ces calcaires sont affectés de plusieurs familles de discontinuités espacées de 0,3 à 1 mètre. Selon les tableaux proposés par Hoek et Bray (1981), si on considère que le massif est d'une qualité médiocre ("*Fair Quality Rock Mass*"), les valeurs des paramètres m et s de Hoek et Brown sont de 0,14 et 0,0001 (cf. Tableau 2)

Tableau 2. Constantes du critère de Hoek et Brown d'après Hoek et Bray 1981.

	Roche carbonatée intacte	Roche carbonatée avec plusieurs familles de joints espacés de 0,3 à 1 mètre
m	7	0,14
s	1	0,0001
A	0,816	0,198
B	0,658	0,662

Les valeurs de m et s permettent d'écrire le critère de Hoek et Brown, cependant les codes de calculs de stabilité de pentes utilisent couramment un calcul à l'équilibre limite par méthode de tranches en se basant sur un critère de rupture linéaire de type Mohr-Coulomb. A partir du critère non linéaire de Hoek et Brown, nous avons donc déterminé une valeur de cohésion "équivalente" et un angle de frottement en assimilant la courbe à une droite pour des valeurs de σ_1 inférieures à 3 MPa (ordre de grandeur de la valeur maximale de la contrainte principale dans le talus). Le critère de Hoek et Brown étant parabolique (pour des GSI supérieurs à 25), le calcul des valeurs de c et ϕ équivalents est très sensible à la gamme de contraintes sur laquelle est effectuée la linéarisation ; l'angle de frottement est très important si la linéarisation est effectuée sur des valeurs faibles de contraintes.

Le critère de Hoek et Brown déterminé pour le massif rocheux est conditionné par la valeur de la résistance à la compression adoptée. Comme le calcul prévu pour ce talus consistait en une vérification de stabilité, nous avons choisi de nous placer dans des cas défavorables et nous avons sélectionné pour l'ensemble du matériau calcaire deux valeurs de résistances prises dans le matériau tendre, à savoir la valeur moyenne : 105 MPa et la résistance ayant 90% de chances d'être dépassée (si on tient compte des quelques informations statistiques dont nous disposons), c'est à dire 55 MPa. A partir du critère de Hoek & Brown et en considérant que les joints de stratification ont un espacement moyen de 30 cm à 1 m, la résistance à la compression moyenne conduit à des caractéristiques "équivalentes" : $c = 170 \text{ kPa}$, $\phi = 35^\circ$, la résistance de 55 MPa à $c = 90 \text{ kPa}$, $\phi = 35^\circ$.

Remarque : En utilisant une valeur de GSI de 45 qui correspond à un massif de médiocre qualité et très fracturé (*very blocky*), la cohésion et l'angle de frottement équivalents sont bien plus importants (de l'ordre de 500 kPa et 50° pour une résistance à la compression de 105 MPa et une valeur du paramètre m de la roche m_i de 8). Pour retrouver des ordres de grandeur comparables à l'utilisation directe des tableaux, le GSI doit être pris très faible (de l'ordre de 5). Cette observation supplémentaire confirme que les valeurs de caractéristiques équivalentes adoptées sont incontestablement défavorables.

Dans les bancs marneux, des essais de cisaillement avec des contraintes normales de 100, 200 et 400 kPa ont conduit à estimer la cohésion à 29 kPa et l'angle de frottement de ces matériaux à 33° .

2.4. Utilisation des caractéristiques équivalentes

Des calculs de stabilité ont été effectués pour deux types de talus pentés à 45° : des talus présentant un pendage favorable de la stratification (alternance marno-calcaire à pendage vers l'intérieur du talus) et des talus présentant un pendage défavorable de la stratification.

Pour la structure favorable, les résultats du calcul à l'équilibre limite pour différentes valeurs de cohésion et d'angle de frottement sont reportés dans le Tableau 3. Les calculs effectués avec les valeurs défavorables adoptées au paragraphe précédent donnent donc un coefficient de sécurité de 1,2 acceptable pour un talus d'exploitation en carrière.

Tableau 3. Coefficient de sécurité pour un pendage favorable.

	$\phi = 30^\circ$.	$\phi = 35^\circ$.
$c = 90 \text{ kPa}$	1,05	1,20
$c = 140 \text{ kPa}$	1,20	

Les calculs effectués pour une structure défavorable ont examiné les coefficients de sécurité vis à vis d'un glissement plan. Ils ont conduit à réduire les pentes de 45 à 39° , du fait de la cohésion et de l'angle de frottement des terrains marneux. Les caractéristiques adoptées pour les terrains calcaires, n'ont pas d'influence sur ce calcul.

La méthodologie proposée a donc permis de vérifier que pour les pentes projetées les caractéristiques des massifs calcaires étaient suffisantes, mais l'estimation du coefficient de sécurité pour un pendage favorable des couches est pessimiste et certainement peu significatif.

3. Application du RMR sur un versant

3.1. Le système RMR

Le RMR (*Rock Mass Rating System*) a été développé par Beniaowski dans les années 1970. Le système initial a reçu de nombreuses modifications et extensions depuis. Ce système repose sur l'attribution d'une note à 6 paramètres :

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.

Les notes R_1 , R_2 et R_5 correspondant aux paramètres 1, 2 et 5 sont établies pour l'ensemble du massif rocheux, alors que R_3 , R_4 et R_6 sont évaluées pour chaque famille de discontinuités. A partir de ces 6 notes, 3 Indices RMR peuvent être calculés :

$$RMR_{sec} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (10)$$

$$RMR_{base} = RMR_{sec} + R_5 \quad (11)$$

$$RMR_{modifié} = RMR_{base} + R_6 \quad (12)$$

3.2. Estimation des caractéristiques mécaniques à partir du RMR

Plusieurs auteurs ont proposé des relations entre les paramètres mécaniques du massif rocheux et la valeur du RMR. Nous avons retenu les relations suivantes qui permettent d'estimer une cohésion et un angle de frottement, ainsi qu'un module d'Young :

$$C_{eq} \text{ (kPa)} \approx 5 \text{ RMR (Beniaowski, 1979, cité par Beniaowski, 1989)} \quad (13)$$

$$\Phi_{eq} \text{ (}^\circ\text{)} \approx 0,5 \text{ RMR} + 8,3 \pm 7,2 \text{ (Trunck \& Hönish, 1989, cité par Beniaowski, 1989)} \quad (14)$$

$$E_{eq} \text{ (GPa)} \approx 10^{(RMR-10)/40} \text{ (Serafim \& Pereira, 1983, cité par Beniaowski, 1989)} \quad (15)$$

Stille et al. (1982, cité par Beniaowski 1989) ont proposé d'utiliser les équivalences du Tableau 4 pour estimer la résistance à la compression simple du massif rocheux.

Tableau 4. Relations entre RMR et résistance à la compression simple d'après Stille et al. (1982).

RMR _{sec}	<21	21 – 40	41 – 60	61 – 80	>80
Rc	0,5 MPa	2,5 MPa	5 MPa	12 MPa	30 MPa

Remarque : La cohérence de ces différentes relations empiriques n'est pas assurée. Par exemple, si on estime la cohésion et l'angle de frottement par les équations 13 et 14 et donc un critère de rupture linéaire, la résistance à la traction peut être évaluée par la relation :

$$R_c = \frac{2 \cdot c \cdot \cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \quad (16)$$

L'ordre de grandeur de la résistance à la compression ainsi estimée est 4 à 11 fois moins importantes que celle du Tableau 4 proposé par Stille.

3.3. Application au versant de la Clapière.

Le mouvement de terrain de la Clapière situé en rive gauche de la vallée de la Tinée, 1 km en aval du village de Saint-Etienne-de-Tinée affecte, entre 1100 et 1800 mètres d'altitude, un versant qui culmine à 3000 mètres d'altitude (Follacci, 1987).

Pour tenter de comprendre les mécanismes de déformation de ce massif et les causes d'instabilités, des modélisations numériques ont été entreprises (Merrien-Soukatchoff et al., 2001, Gunzburger et al., 2002). Nous avons choisi d'effectuer des modélisations à l'aide d'un code discontinu (UDEC), mais le nombre considérable de discontinuités observées sur le terrain ne permet pas de les introduire toutes explicitement dans les modèles. Nous avons donc choisi d'attribuer des propriétés équivalentes à l'échelle de l'affleurement (zone d'extension métrique à pluridécamétrique) et d'introduire explicitement les discontinuités majeures de très grande extension, cartographiables à l'échelle du versant (Gunzburger, 2001).

Pour déterminer des caractéristiques équivalentes à l'échelle pluridécamétrique, la valeur du RMR_{sec} a été déterminée au niveau de 15 stations de mesures situées à l'Est du glissement. La valeur de la résistance à la compression simple (R_1) de la roche saine a été évaluée à partir de mesures au scléromètre ou marteau de Schmidt (Figure 1). Les valeurs obtenues sont en accord avec les seules valeurs d'essais de laboratoire disponibles sur le site (Tableau 5). Les paramètres R_2 à R_4 ont été déduits des relevés structuraux et des relevés de rugosité des fractures (Figure 2 à 4). Les terrains du massif de la Clapière présentant une foliation bien marquée, nous avons déterminé les paramètres parallèlement et perpendiculairement à la foliation (Tableau 5). La différence moyenne, entre les valeurs de RMR ainsi calculées sur une station, est de l'ordre de 1 point RMR et est au maximum de 3. Une note globale a donc été attribuée à la station en faisant la moyenne des deux valeurs ($R_{//}$ et $R_{\perp}$).



Figure 1. Mesure au scléromètre

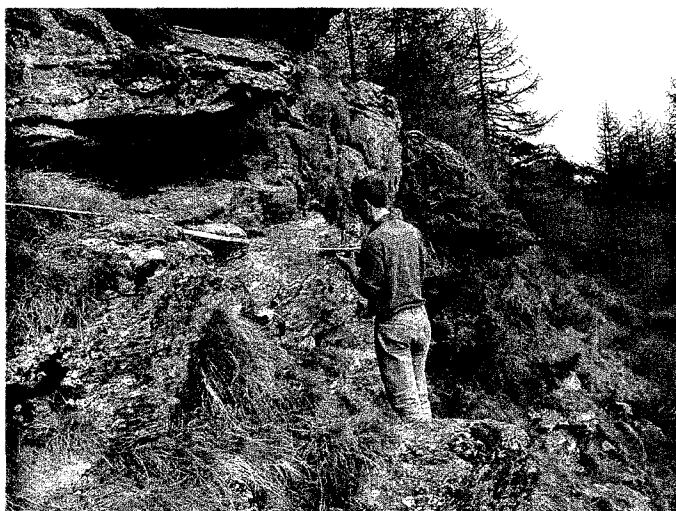


Figure 2. Relevés structuraux le long d'une ligne de mesure



Figure 3. Levé d'un profil de rugosité
au moyen d'un conformateur

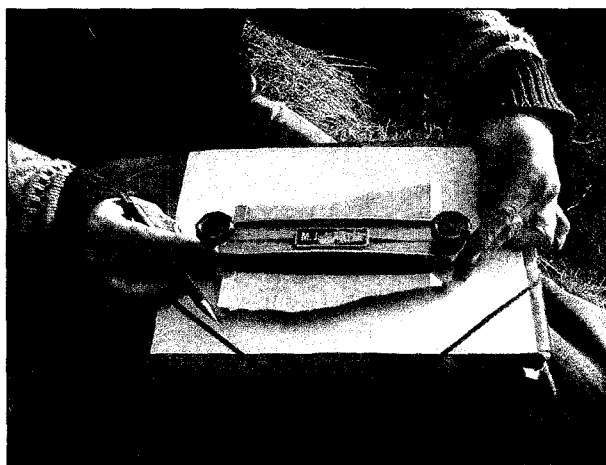


Figure 4. Report d'un profil de rugosité

Tableau 5. Caractéristiques de laboratoire (d'après Serratrice cité par Interreg1997).

Orientation du chargement par rapport à la foliation	Normale $\perp$	Parallèle //	Oblique
Gneiss d'Anelle			
Résistance à la compression : R_c	58,7 MPa	46,9 MPa	23,8 MPa
Résistance à la traction : R_t	8,7 MPa	4,4 MPa	5,0 MPa
Migmatites d'Iglière			
Résistance à la compression : R_c	110,6 MPa	82,5 MPa	74,2 MPa
Résistance à la traction : R_t	11,7 MPa		6,8 MPa

Les valeurs de RMR sont assez variables, de 37 à 59,25 et montrent une certaine spatialisation de la qualité du massif rocheux (Gunzburger et Merrien-Soukatchoff, 2002). Le Tableau 6 présente les valeurs de RMR moyennes pour les deux principaux faciès présents à la Clapière. Le faciès Anelle est le plus fréquent dans le versant, le faciès Iglière est localisé au niveau d'un banc situé en milieu de versant. La valeur du RMR pour la station C, la plus proche du glissement ($RMR = 42$), a été retenue comme valeur caractéristique pour les calculs ultérieurs. Les propriétés estimées à partir de cette valeur sont reportées dans le Tableau 7.

Tableau 6. RMR calculé sur 2 matériaux différents du versant de la Clapière.
 σ_c^* : Résistance en compression estimée à partir de mesures au marteau de Schmidt
 // : mesure parallèle à la foliation $\perp$: mesures perpendiculaires à la foliation

		σ_c^*	R_1	R_2	R_3	R_4	RMR_{sec}
Stations (2-3)	//	106 MPa	10	18	12	12	52
Facies Iglière (paragneiss)	$\perp$	107,5 MPa	10				52
Station 4	//	35 MPa	4.5	13	10.8	14	42.3
Anelle (orthogneiss)	$\perp$	35 MPa	4.5				42.3

Tableau 7. Caractéristiques déduites des informations de terrains (pour la station C ou RMR = 42).

	Caractéristiques estimées
$R_{c\text{-matrice}}$ Résistance à la compression simple de la matrice rocheuse (moyenne des valeurs déduites des mesures au scléromètre)	35 MPa
$R_{c\text{-massif}}$ Résistance à la compression simple du massif rocheux (interpolation des valeurs de Stille, Tableau 4)	4 MPa
$C_{\text{équivalent}}$ d'après (13)	210 kPa
$\Phi_{\text{équivalent}}$ d'après (14)	29°
$E_{\text{équivalent}}$ d'après (15)	6,3 GPa

3.4. Utilisation des caractéristiques équivalentes dans un calcul en contrainte déformation

Un calcul en quatre phases (Figure 5) simulant l'évolution temporelle du versant a été réalisé avec le code UDEC. Les phases correspondent à la mise en place du dernier glacier dans la vallée de la Tinée (fin du Würm), sa fonte puis le dépôt d'alluvions. Les caractéristiques équivalentes obtenues à partir du RMR ont été introduites dans le calcul. La coupe modélisée est parallèle à la ligne de plus grande pente du talus et orientée N20. Cette direction correspond également à celle des principales failles majeures du site, ce qui conduit à ne pas les prendre en compte dans la modélisation. Cet aspect a été présenté de manière plus détaillée par Gunzburger et al. (2002).

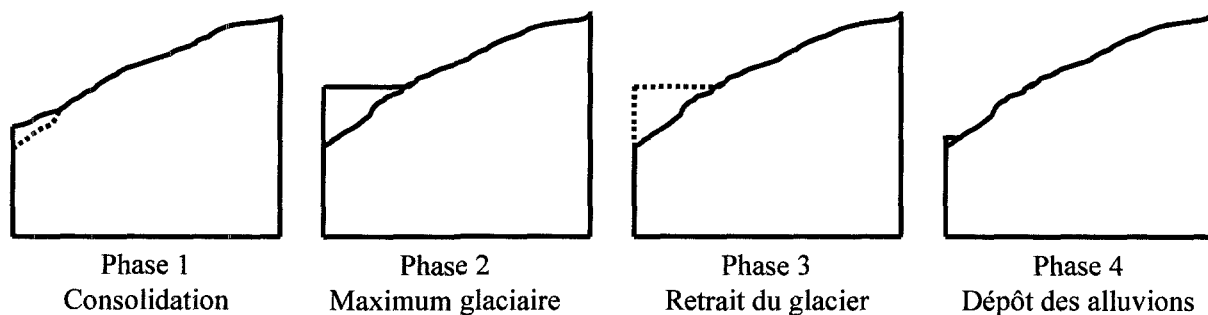


Figure 5. Différentes phases de modélisation de l'évolution de la Clapière

Le modèle réalisé a montré le développement d'une zone plastique en pied de versant à la fin de la phase de retrait du glacier (phase 3). Ceci a permis de conforter l'hypothèse que les désordres ont pu s'initier en pied avant de se propager vers l'amont, comme le suggérait l'étude détaillée des photographies aériennes depuis 1970.

3.5. Evaluation du GSI et du critère de Hoek et Brown

Pour ce versant il est possible d'estimer les propriétés du massif avec le critère de Hoek et Brown et une estimation du GSI. Les gneiss de la Clapière peuvent être considérés comme "blocky/disturbed" et la qualité de la surface comme "médiocre" ("fair") à "pauvre" ("poor") ce qui conduit à un GSI variant de 25 à 45 et en moyenne de 35. Pour un Gneiss le paramètre m_i de la roche est de 33 (Table 11.3 dans Hoek, 1999).

Pour un GSI de 35 et un paramètre m_i de 33, les équations 5 et 6 donnent une valeur de m_b de 3,23 et de s de $7,3 \cdot 10^{-4}$. La résistance à la compression du massif calculée à partir du critère de Hoek et Brown est alors de 0,9 MPa et la résistance en traction de 7,9 kPa.

Comme nous l'avons signalé au paragraphe 2.3, une cohésion et un angle de frottement équivalents calculés en linéarisant le critère de Hoek et Brown dépendent très fortement de la gamme des contraintes considérées. En linéarisant le critère pour des valeurs de σ_3 comprises entre 0 et 0,42 MPa, les valeurs correspondantes de σ_1 sont comprises entre 0,9 et 7,4 MPa d'après l'équation (1) et la cohésion et l'angle de frottement équivalents sont alors de l'ordre de 210 kPa et 61°. En linéarisant le critère pour des valeurs de σ_3 comprises entre 0 et 10,5 MPa, les valeurs correspondantes de σ_1 sont comprises entre 0,9 et 45 MPa (ce qui correspondrait à environ 2000 m de profondeur pour une densité de 2,2), la cohésion et l'angle de frottement équivalents sont alors de l'ordre de 1530 kPa et 37°.

La gamme de variations possibles de cohésion et d'angle de frottement équivalents, montrent le caractère rudimentaire de ce type d'approche et sans doute un certain manque de cohérence. Il est également difficile de comparer directement les deux types d'approches (GSI et RMR) puisqu'elles ne conduisent pas aux mêmes estimations.

L'utilisation du critère de Hoek et Brown pourrait permettre d'effectuer une modélisation numérique en utilisant directement ce critère : la méthodologie proposée par Hoek, a pour but d'estimer ce critère. L'approche RMR ne conduit pas initialement à un critère de rupture et les formulations empiriques que nous avons utilisées n'ont pas forcément vocation à être appliquées à tout type d'ouvrage et tout type de roche. L'utilisation du RMR nous a par contre permis une hiérarchisation dans le versant, difficilement réalisable à partir du GSI.

Remarques : Hoek (1999) propose une relation entre le RMR et le GSI (pour $GSI > 25$) :

$$GSI = RMR - 5 \quad (17)$$

Les valeurs de RMR estimées sur le versant varient entre 37 et 59, ce qui correspondrait à un GSI compris entre 32 et 54 d'après l'équation (17). Nous avons adopté pour les estimations de paramètres un RMR de 42, donc une valeur GSI de 37 d'après l'équation (17), qui est cohérente avec l'estimation directe du GSI.

4. Conclusion

Nous avons présenté deux exemples d'estimation de caractéristiques de pentes rocheuses à l'échelle décimétrique à pluridécimétrique qui ont conduit à modéliser des versants. Le premier se base sur l'estimation de facteurs de réduction du critère de Hoek et Brown, évalués soit directement, soit par l'intermédiaire du *Geological Strength Index* (GSI), et a conduit à déterminer une cohésion et un angle de frottement équivalents en linéarisant le critère obtenu. Le deuxième repose sur l'attribution d'une note RMR (*Rock Mass Rating System*), puis l'évaluation de propriétés équivalentes à partir de formules empiriques. Dans le premier cas, nous ne disposons pas des informations permettant de déterminer en parallèle le RMR, par contre dans le second cas nous avons pu également calculer le GSI, mais les deux méthodes ne conduisent pas à l'estimation des mêmes paramètres et sont difficilement comparables. La méthodologie RMR est plus complète et paraît plus pertinente pour comparer entre elles différentes zones du versant, mais les caractéristiques équivalentes déterminées à partir de la valeur du RMR ne doivent pas être considérées comme des valeurs absolues. La détermination d'un critère de rupture à partir du GSI peut paraître plus pertinente, puisque la GSI a cette vocation initiale. L'évaluation du GSI à partir du RMR est cohérente dans notre cas et peut permettre d'introduire les variations distinguées par le RMR dans le GSI.

Les exemples exposés sont à des échelles différentes et présentent des enjeux différents. Dans le premier cas, il s'agit d'un talus de carrière d'une centaine de mètres de hauteur, dont on a cherché à vérifier la stabilité, une appréciation pessimiste des caractéristiques a permis de conforter cette

vérification. Dans le second cas le versant instable a plusieurs centaines de mètres de hauteur, et on cherche à analyser les mécanismes d'initiation de la déformation irréversible.

Dans les deux cas, l'utilisation des classifications de massif rocheux a permis de proposer une méthodologie pour estimer les caractéristiques du massif à l'échelle du versant, puis effectuer une modélisation numérique à partir de ces paramètres, mais la qualification des méthodes est difficile à réaliser (Merrien-Soukatchoff et Riou, 1999). Dans le premier cas, les talus de carrière n'ont pas montré de signes d'instabilités au cours des dix dernières années ; les caractéristiques proposées sont donc bien une borne inférieure des caractéristiques réelles. Dans le second cas, le modèle réalisé à partir des caractéristiques équivalentes ne montre pas de contradiction avec le modèle conceptuel d'évolution du versant, mais des comparaisons plus quantitatives ne peuvent pas être réalisées. Dans les deux cas, on ne peut donc pas conclure que les caractéristiques évaluées soient réalistes, elles ne sont, simplement, pas en contradiction avec les observations.

Nous avons vu que l'utilisation des classifications est discutable et que leur application aux pentes rocheuses soulève de nombreuses interrogations, cependant c'est une des voies possibles, en l'absence de mesure in situ, pour rendre plus quantitatives les appréciations portées sur la qualité du massif rocheux et sur la stabilité des pentes.

5. Bibliographie

Bieniawski Z.T. *Engineering Rock Mass Classifications*. J. Wiley, New York, 1989.

Follacci J.P. *Les mouvements du versant de La Clapière à Saint-Etienne de Tinée (Alpes-Maritimes)*. Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées. 150/151. pp. 107-109, 1987

Gunzburger Y. *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, 2001.

Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V. *Caractérisation mécanique d'un versant rocheux instable au moyen du système RMR – Cas de la Clapière (Alpes Maritimes)*. Symposium International Param2002, Identification et détermination des paramètres des sols et des roches pour les calculs géotechniques, 2/3 septembre 2002, Paris, France, 2002.

Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Guglielmi Y. *Mechanical influence of the last deglaciation on the initiation of the "La Clapière" slope instability (southern French Alps)*. 5th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE) 2002, 4/6 September 2002, Paris, France, 2002.

Hoek E. *Practical Rock Engineering*. Course notes. Site Web <http://www.rockeng.utoronto.ca/roc/Hoek/Hoek.htm>, 1999.

Hoek E., Bray J.W. *Rock Slope Engineering, Revised Third edition*. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1981.

Hoek E., Brown E.T. *Underground Excavations in Rock*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.

Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden. W.F. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: Balkema, 1995.

- Interreg I. *Risques générés par les grands mouvements de versant. Etude comparative de 4 sites des Alpes franco-italiennes*. Edité par le Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherches pour la prévention des Risques Naturels (Grenoble), 1997.
- Merrien-Soukatchoff V., Quenot X., Guglielmi Y. *Apports de méthodes géomécaniques quantitatives à l'investigation de grands versants instables : application au glissement de la Clapière (Saint-Etienne-de-Tinée, Alpes Maritimes)*. XVème Congrès Français de Mécanique, Nancy, 3–7 Septembre 2001.
- Merrien-Soukatchoff V., Riou Y. *Terminologie de la qualité pour la modélisation numérique en géotechnique : discussion*. Revue Française de Génie Civil. Volume 3- n° 7-8, pp. 481-494, 1999.
- Romana M. *Practice of SMR classification for slope appraisal*. Cinquième Symposium international sur les glissements de terrain, Lausanne, 1988.