



Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département des Mines et géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Génie Minière

Option : Exploitation des mines

Présenté par

- M. Kharfallah Abdessamed
- M. Kherrat Abdallah

Thème

Classification géomécanique des massifs rocheux et
application au cas du tunnel d'Ait Yahia Moussa

Soutenu le 13/10 /2020 devant le jury composé de :

Président :	M. Saadoun Abderrazak	M.C.B	U.A.M.Bejaïa
Promoteur :	M. Boukarm Riadh	M.A.A	U.A.M.Bejaïa
Examineur:	M. Fredj Mohamed	M.C.B	U.A.M.Bejaïa

Année Universitaire : 2019-2020

REMERCIEMENT

Nous tenons avant tout à remercier le bon Dieu pour nous avoir animés de volonté, de force et de santé à fin que nous puissions réussir notre travail.

Nos plus sincères et intenses remerciement s'adressent à :

Notre monsieur BOUKARM RIADH pour son encadrement, son soutien, pour tous ses précieux conseils qui ont été de grande utilité pour moi.

Monsieur SAADOUN ABDERRAZAK qui nous a fait l'honneur de Présider le jury.

Monsieur FREDJ MOHAMED d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons à remercier également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

DÉDICACE

Ce modeste travail est dédié à :

Mon cher père et ma chère mère,

Mon frère et ma sœur,

A toute la famille,

A tous mes amis,

A toute la promotion d'EXPLOITATION MINIÈRE.

Abdallah

DÉDICACE

Ce modeste travail est dédié à :

Mon cher père et ma chère mère,

Mes sœurs.

A toute la famille,

A tous mes amis,

A toute la promotion d'EXPLOITATION MINIÈRE.

ABDESSAMED

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale1

Chapitre I : La classification géomécanique

I.1. Introduction.....2

I.2. Système du RQD (Rock Quality Designation)2

 I.2.1. Limitation du système RQD.....5

I.3. Système RMR (Rock Mass Rating)5

 I.3.1. Estimation des caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR.....10

 I.3.2. Limitations du système RMR.....11

I.4. Système Q Barton12

 I.4.1. Limitations du système Q Barton19

I.5. Système du GSI (Geological Strength Index)20

I.6. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)22

I.7. Commentaires sur les systèmes de classification25

I.8. Conclusion27

Chapitre II : Classification géomécanique du tunnel Ait Yahia Moussa

II.1. Introduction28

II.2. Situation géographique28

II.3. Situation Géologique29

II.4. Données relevées du site30

II.5. Classification du site selon la méthode de Bieniawski (RMR)31

II.5.1. Calcule RMR	31
II.5.2. Conclusion	32
II.6. Classification du site selon la méthode de Barton	32
II.6.1. Calcule de l'indice de qualité Q Barton	32
II.6.2. Conclusion	34
II.7. Comparaison des résultats obtenus	34
Conclusion générale	35
Bibliographie	

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1. Illustration d'une carotte obtenue par un forage [6].</i>	3
<i>Figure 2. Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR [2].</i>	7
<i>Figure 3. Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse [3].</i> ..	21
<i>Figure 4. Image satellite de la zone du projet.</i>	28
<i>Figure 5. Emplacement du tunnel AIT YAHIA MOUSSA sur la carte DRAA EL MIZAN (Chmiguirilov et al, 1986) A l'échelle 1 :50.000.</i>	29

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1. Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux [5].</i>	3
<i>Tableau 2. Classification RMR (Bieniawski) [3].</i>	8
<i>Tableau 3. Classe de rocher suivant la classification de Z. BIENIAWSKI</i>	10
<i>Tableau 4. Relations entre RMRsec et la résistance à la compression simple</i>	10
<i>Tableau 5. RQD Rock Quality Désignation</i>	12
<i>Tableau 6. Paramètre de J_n (nombre de famille de discontinuités), (Barton et al., 1974) [17]</i>	12
<i>Tableau 7. Paramètre J_r (paramètre de rugosité des joints), (Barton et al. 1974) [17]</i>	13
<i>Tableau 8. Paramètre J_a (paramètre d'altération des joints), (Barton et al 1974) [17]</i>	14
<i>Tableau 9. Paramètre J_w (paramètre hydraulique), (Barton et al, 1974) [17]</i>	15
<i>Tableau 10. Paramètre de SRF (paramètre de réduction relatif aux contraintes), (Barton et Al, 1974) [17]</i>	16
<i>Tableau 11. Plages de variation des paramètres pris en compte pour le calcul de f indice. [3]</i>	18
<i>Tableau 12. Classification de massif en fonction de la valeur Q [5].</i>	19
<i>Tableau 13. Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI [2].</i>	20
<i>Tableau 14. Notes des paramètres du SMR (Romana, 1985) [7].</i>	23
<i>Tableau 15. Description des classes SMR (Romana, 1985) [7].</i>	24
<i>Tableau 16. Comparaisons des utilisations du RMR et du Q-system dans le domaine des travaux souterrains [3].</i>	26
<i>Tableau 17. Classification de RMR pour l'unité constatée au niveau du Tunnel.</i>	31
<i>Tableau 18. Paramètres relatifs au système de classification Q pour l'unité constatée au niveau du tunnel.</i>	33

LISTE DES ABREVIATIONS

AFTES : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain.

RQD : Rock Quality Designation.

RMR : Rock Mass Rating.

GSI : Geological Strength Index.

SMR : Slope Mass Rating.

SACSIR : South African Council of Scientific and Industrial Research.

NGI : Norwegian Geotechnical Institute.

SRF : Stress Reduction Factor

ISRM : Société internationale de mécanique des roches

Introduction générale

Introduction générale

La classification d'un massif rocheux est le processus consistant à placer une masse rocheuse en groupes ou classes sur des relations définies et à lui attribuer une description unique sur la base des caractéristiques similaires telles que le comportement de la masse rocheuse qui peut être prévue. Les systèmes de classification ne conviennent pas pour une utilisation dans la conception élaborée et finale, en particulier pour les ouvertures souterraines complexes. Une telle utilisation de la classification nécessite un développement supplémentaire de ces systèmes. Les systèmes de classification des massifs rocheux ont été conçus pour servir d'aide à la conception technique et n'ont pas été conçus pour se substituer aux observations sur le terrain, aux considérations analytiques, aux mesures et au jugement technique.

Ces systèmes constituent une partie essentielle des principales approches de conception (les méthodes de conception empiriques et numériques) et sont de plus en plus utilisés dans les deux approches de conception à mesure que la puissance de calcul s'améliore. Il devrait être utilisé en conjonction avec d'autres schémas de conception pour concevoir une justification globale compatible avec les objectifs de conception et la géologie du site. Dans la pratique, les systèmes de classification des massifs rocheux ont fourni une aide à la conception systématique précieuse pour de nombreux projets d'ingénierie, en particulier sur les constructions souterraines, les tunnels et les projets miniers.

La classification des masses rocheuses se produit dans la planification des Projets hydroélectriques, tunnels, cavernes, ponts, routes de montagne, tunnels ferroviaires, et ainsi de suite, elle permet une meilleure communication entre les planificateurs, les géologues, les concepteurs, les entrepreneurs et les ingénieurs, aussi elle permet de placer l'objet étudié dans une classe appropriée. En outre, les ingénieurs préfèrent les nombres à la place des descriptions, d'où une classification technique du système a une application considérable dans une évaluation globale de la qualité de la roche.

Notre travail consiste à faire un aperçu sur les méthodes de classification notamment celles de Q Barton, et RMR. Et les appliquer sur le site d'Ait Yahya Moussa.

Chapitre I : Classification géomécanique

Chapitre I : Classification géomécanique

I.1. Introduction

La classification des massifs rocheux est la méthode la plus utilisée, les classifications les plus connues sont probablement le système RMR et le système Q. Ces systèmes de classification sont présentés par plusieurs auteurs comme Hoek et al. (1995), Singh et Goel (1999), AFTES (2003). Initialement élaborées pour déterminer le soutènement des tunnels, ces classifications ont été développées sur la base des cas pratiques, de données des propriétés géologiques et de performance des soutènements utilisés dans différents projets souterrains de référence. Des informations telles que la résistance de la roche intacte, l'écoulement souterrain, la contrainte in situ et le nombre, l'espacement, l'inclinaison et les propriétés des interfaces des discontinuités sont données dans la classification. Ces méthodes sont utilisées au niveau des études préliminaires pour déterminer provisoirement le soutènement approprié. Cependant, l'utilisation des systèmes de classification nécessite également des informations détaillées relativement à la contrainte in situ et aux propriétés du massif, alors qu'en général elles ne sont pas disponibles au stade préliminaire du projet. Pour que ces informations soient disponibles, les systèmes de classification devraient être utilisés en conjonction avec des études spécifiques du site.

Des méthodes empiriques, basées sur une classification géotechnique du rocher, ont été mise au point et servent aux recommandations du soutènement :

- ❖ RQD (Rock Quality Désignation).
- ❖ RMR (Rock Mass Rating).
- ❖ Q-system.
- ❖ GSI (Geological Strength Index).
- ❖ SMR (Slop Mass Rating).

I.2. Système du RQD (Rock Quality Designation)

Le Rock Quality Designation (RQD) a été développé par Deere et al. (1967) [8] afin de donner une estimation quantitative de la fracturation influence le comportement de la masse rocheuse à partir de l'examen de carottes obtenues par les forages.

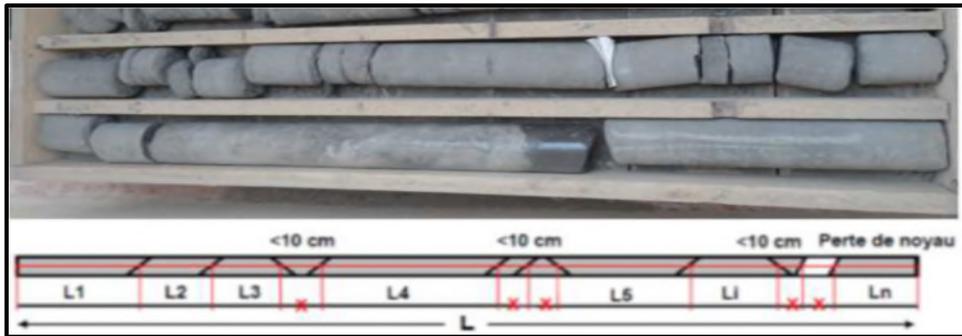


Figure 1. Illustration d'une carotte obtenue par un forage [6].

Le RQD est défini comme le pourcentage de morceaux intacts de longueur supérieure à 10cm sur la longueur totale du forage

$$RQD = \left(\frac{\sum \text{longueur des morceaux} > 10\text{cm}}{\text{longueur de forage}} \right) \times 100$$

La relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif peut être établie selon la proposition de Deere (1968) [9] et elle est présentée au tableau ci-dessous.

Tableau 1. Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux [5].

RQD (%)	Qualité du massif rocheux
<25	Très pauvre
25 – 50	Pauvre
50 – 75	Moyenne
75 – 90	Bonne
90 – 100	Excellente

Initialement, la longueur de course pour évaluer l'indice RQD présentait une ambiguïté supplémentaire. Lors de la commission sur la standardisation de test de laboratoire et sur le terrain (ISRM, 1981b), une première recommandation est apparue : tout calcul du RQD doit être réalisé selon différentes longueurs de course de carotte de forage afin de séparer les différents plans de sédimentations, zones de faiblesse, des structures locales, etc. Cette méthode permet de produire une meilleure représentation des emplacements et dimensions de zones locales en éliminant la symétrie qui peut se créer lors de l'application d'une même longueur de course. Selon Deere (1988) [10], afin de déterminer correctement l'indice RQD, une longueur totale de course d'au plus de 1,5 m doit être utilisée. Cette recommandation est basée sur des

observations sur le terrain où la longueur de forage réel effectué est emboîtée selon cette longueur.

Originellement conçu pour des carottes de forages géologiques de diamètre NX, la société internationale de mécanique des roches (ISRM) révisé un diamètre de carotte de diamètre d'au moins NX (\varnothing 54,7 mm) acceptable seulement pour des forages avec un équipement de forage à double-paroi. Cette restriction sur le diamètre de carotte provient du fait que l'indice vise à décrire l'état de fracturation du massif rocheux, donc seules les fractures naturelles doivent être considérées dans l'évaluation. Une grande attention doit être portée lors de l'évaluation de celui-ci afin d'exclure les brisures mécaniques induites par le forage. Deere et Deere. W (1988) [10] affirment que l'indice fonctionne adéquatement pour différentes techniques de forage ou différentes grandeurs de diamètre de forage, à moins que cette technique de forage cause une perte considérable du taux de récupération de la carotte ou cause des brisures mécaniques excessives [5].

Palmstrom (1982) [11] a suggéré que le RQD puisse être lié et déduit du nombre de discontinuités par unité de volume. Il a proposé la relation suivante, qui serait valable pour des roches sans argile et utilisable lorsqu'aucun forage n'est disponible mais que des traces de discontinuités sont visibles en surface

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

Où J_v est la densité volumique des joints, c'est-à-dire la somme du nombre de joints par m^3 , pour toutes les familles de discontinuités présentes, Ce paramètre permet de déterminer les dimensions des blocs dans un système rocheux fracturé [2].

Le système de classification RQD se base sur des forages géologiques standard et sa plus grande force retombe sur sa simplicité, la vitesse d'acquisition et aussi qu'il est peu coûteux. Le RQD doit être interprété comme un indice de qualité du massif lorsque la roche présente des caractéristiques problématiques comme un haut degré de détérioration et se présente par un comportement ductile, une zone de cisaillement ou un massif fracturé (Deere.W1988) [10]. Ceci signifie que l'indice RQD est seulement capable d'évaluer la partie intacte du massif rocheux.

I.2.1. Limitation du système RQD

La simplicité du système RQD a non seulement promu son utilisation importante comme outil, mais aussi l'apport de plusieurs critiques. Voici une série de limites trouvées dans la littérature [5] :

- Le RQD peut donner des résultats différents en fonction de l'orientation du trou de forage géologique par rapport au massif rocheux.
- Le RQD est insensible à l'effet d'échelle de ses excavations. Pour un certain indice RQD déterminé, il est impossible d'appliquer ce même paramètre de design pour un tunnel de petite dimension que pour une grande excavation souterraine.
- Le système RQD fait défaut lorsque l'espacement des joints ou fractures du massif est d'environ 100 mm. Ainsi, sur une longueur de course de 1000 mm il y a seulement des espacements de fractures naturelles de 110 mm pour un indice final de 100 %. Par contre, si l'espacement constant enregistré est de 90mm le nouvel indice RQD est de 0 %.
- La résistance du RQD est directement affectée par la résistance de la roche intacte et de la grosseur du diamètre des carottes. Lorsqu'elle est effectuée sur une carotte de forage, cette classification est en outre limitée par la qualité du forage.

I.3. Système RMR (Rock Mass Rating)

Le RMR publié par la SACSIR (*South African Council of Scientific and Industrial Research*), Bieniawski (1973) [12] présente une classification générale du terrain rocheux quantifié sur 100 points. La Classification Géomécanique ou Rock Mass Rating (RMR) est basée sur l'expérience professionnelle de l'auteur dans des tunnels de faible profondeur pour des massifs sédimentaires.

Initialement, environ 49 études de cas inédites ont été impliquées dans le processus de création du RMR. En raison de sa simplicité, l'indice RMR est un outil de design pour la nécessité de soutènement en galerie et en chantier, et l'évaluation du temps maximal de tenue sans soutènement. Il est aussi un paramètre de base d'extrapolation des propriétés mécaniques de laboratoire, roche intacte, au massif rocheux. Depuis sa publication, le RMR a été modifié par Bieniawski en 1974, 1976, 1979 et dernièrement en 1989. Il est ainsi important de spécifier

par un indice la version du RMR utilisé. Les versions les plus référées étant celle de 1976 et 1989.

Bieniawski (1974) [13] présente la première modification qui est un réarrangement des paramètres de la classification. Ainsi le système passe de 8 à 6 paramètres en plus de subir une calibration des notes attribuables. Bieniawski (1976) [14] effectue des modifications par rapport au design de support de terrain, réduit le nombre de classes de roche à 5 groupes dominants de 20 points chacun et introduit le concept de rugosité. Lors de chaque modification, il y a eu une redistribution des valeurs pour les différents paramètres. Pour cette raison, l'utilisateur du système doit mentionner quelle version est utilisée afin de bien classer le terrain. Bieniawski (1979) [15] réajuste pour la dernière fois la valeur du coefficient pour l'eau, la condition et l'espacement de joints.

Lors de la dernière modification du RMR (Bieniawski, 1989) [16], l'auteur a joint des directives de sélection du patron du support de terrain pour une combinaison de boulons mécanique, béton projeté et arche d'acier selon la qualité du massif rocheux. Ces directives sont basées pour une excavation de 10 m de largeur de type standard de fer à cheval selon des méthodes d'excavation standardisées de forage - sautage dans un massif rocheux de faibles contraintes verticales inférieures à 25 MPa (1000 m pour une roche de densité standard). Dans le domaine minier, plusieurs facteurs influencent ces directives de support de terrain dont la forme, la grandeur, profondeur de l'excavation ainsi que la technique utilisée. Beaucoup de précautions doivent être apportées lors de l'application du RMR pour le design de support dans le domaine minier.

Actuellement, la version la plus récente incorpore plus de 356 études de cas englobant plusieurs applications de différents domaines comme des tunnels, design de fondations et excavations de cavernes en roc massif pour le génie civil, ainsi que quelques exemples d'exploitations à ciel ouvert et en souterrain à de grandes profondeurs pour le domaine minier.

L'auteur réussit à incorporer des graphiques continus de type "paramètre — cote" afin d'augmenter la sensibilité des paramètres quantifiables comme la résistance mécanique, le RQD et l'espacement des discontinuités [5].

Le RMR résulte de la somme de cinq notes de caractérisation (d'A1 à A5) et d'une note d'ajustement. Ces paramètres sont illustrés sur la (Figure2).

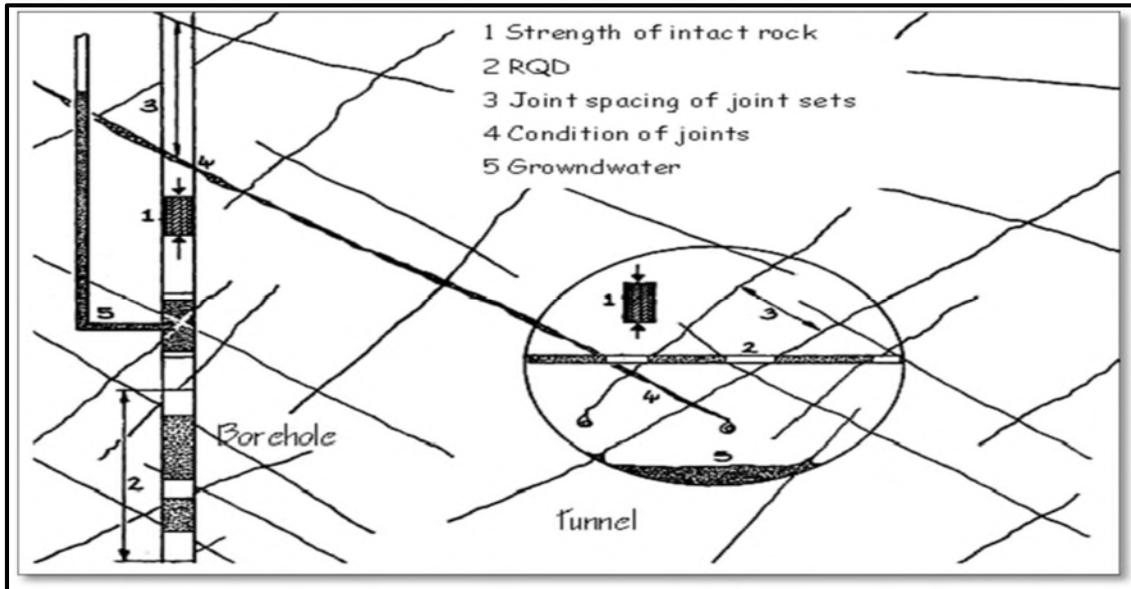


Figure 2. Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR [2].

La somme de ces notes attribue une valeur comprise entre 0 et 100 au massif. Cette valeur utilise à plus de 70% la fracturation et elle accorde 15% d'influence aux propriétés de la matrice rocheuse et 15% à la présence d'eau [3].

La signification des indices du RMR, ils sont définis comme suit :

- A1 (Strength of intact rock material) : la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse est obtenue, soit par procédure d'écrasement d'un échantillon, soit par procédure de chargement ponctuel (note : de 0 à 15).
- A2 (Rock Quality Designation RQD) : il caractérise la qualité des carottes de sondage en calculant le rapport entre la longueur cumulée des carottes supérieures à dix centimètres et la longueur totale considérée (note : de 3 à 20).
- A3 (Spacing of discontinuities) : dans le cas de plusieurs familles de fractures le minimum des notes attribuées à l'espacement des fractures est considéré (note : de 5 à 20).
- A4 (Conditions of discontinuities) : cet indice caractérise l'extension, l'ouverture, la rugosité, le matériau de remplissage et l'altération des épontes des discontinuités (Note : de 0 à 30).
- A5 (Groundwater conditions) : Il est en rapport avec les conditions hydrogéologiques et consiste à réaliser des mesures de flux d'eau ou de pressions interstitielles des joints (note : de 0 à 15).

- B (Adjustement for joint orientation) : c'est un facteur correctif qui est en rapport avec l'effet de l'azimut et du pendage des familles de discontinuités sur la stabilité de l'ouvrage (note : de -12 à 12 pour les tunnels, de -25 à 0 pour les fondations et de -60 à 0 pour les talus).

La somme des cinq premiers indices caractérise le RMR de base. Quant aux travaux souterrains, il faut ajouter l'effet du facteur correctif (Bieniawski 1989) [16].

Le RMR₈₉ s'écrit alors :

$$RMR_{89} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + B$$

Chacun des paramètres précédents aura une note, la somme des notes, après avoir été ajustée par une note relative à l'orientation (Tableau 2), nous donne une appréciation générale de la qualité du rocher (Tableau 3).

Tableau 2. Classification RMR (Bieniawski) [3].

A. PARAMETRES DE CLASSIFICATION ET NOTATIONS CORRESPONDANTES									
Paramètres		Plages de valeurs							
1	Résistance de la roche (matrice)	Indice Franklin Is	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Pour les faibles valeurs de Is utiliser la résistance en compression uniaxiale		
		Résist. compr. uniax. σ_c	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
Notation			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90 %	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
		Notation	20	17	13	8	3		
3	Espacement des discontinuités		> 2 m	0,6 m - 2 m	200 mm - 600 mm	60 mm - 200 mm	< 60 mm		
		Notation	20	15	10	8	5		
4	Nature des discontinuités (voir E)		Surfaces très rugueuses Non continues Epontes en contact Epontes non altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Epontes faiblement altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Epontes fortement altérées	Surfaces lustrées ou Remplissage < 5 mm ou Epaisseur de 1 à 5 mm Joint continu	Remplissage mou > 5 mm ou Epaisseur > 5 mm Joint continu		
		Notation	30	25	20	10	0		
5	Eau	Débit sur 10 m de longueur de tunnel (l/min)	Aucun	< 10 l/min	10 à 25 l/min	25 à 125 l/min	> 125 l/min		
		Ratio - pression em / contr. princ. σ_3	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Conditions générales	Complètement sec	Humide	Mouillé	Suivant	Débitant		
		Notation	15	10	7	4	0		
RMR = Somme des notations des paramètres 1 à 5									
B. AJUSTEMENT DE LA VALEUR DE RMR EN FONCTION DE L'ORIENTATION DES DISCONTINUITES (voir F)									
Direction et pendage		Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable			
Notation	Tunnels	0	- 2	- 5	- 10	- 12			
	Fondations	0	- 2	- 7	- 15	- 25			
	Talus	0	- 5	- 25	- 50	- 60			
C. CLASSES DE MASSIF ROCHEUX DETERMINEES PAR LE RMR									
Valeur du RMR		100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21			
Classe		I	II	III	IV	V			
Description		Très bon rocher	Bon rocher	Rocher moyen	Rocher médiocre	Rocher très médiocre			
D. PROPRIETES GLOBALES ATTRIBUEES AU MASSIF ROCHEUX EN FONCTION DES CLASSES									
Classe		I	II	III	IV	V			
Temps de tenue sans soutènement		20 ans pour une portée de 15 m	1 an pour une portée de 10 m	1 semaine pour une portée de 5 m	10 h pour une portée de 2,5 m	30 mn pour une portée de 1 m			
Cohésion du massif rocheux (kPa)		> 400 kPa	300 à 400 kPa	200 à 300 kPa	100 à 200 kPa	< 100 kPa			
Angle de frottement du massif rocheux (°)		> 45°	35° à 45°	25° à 35°	15° à 25°	< 15°			

Suite de tableaux 2

E. INDICATIONS POUR LA NOTATION "NATURE DES DISCONTINUITES"					
Longueur des discontinuités	< 1 m	de 1 à 3 m	de 3 à 10 m	de 10 à 20 m	> 20 m
Notation	6	4	2	1	0
Ouverture des discontinuités	aucune	< 0,1 mm	de 0,1 à 1 mm	de 1 à 5 mm	> 5 mm
Notation	6	5	4	1	0
Rugosité des épontes des discontinuités	Très rugueuse	Rugueuse	Légèrement rugueuse	Lisse	Lustrée
Notation	6	5	3	1	0
Altération des épontes	Non altéré	Légèrement altéré	Moyennement altéré	Très altéré	Décomposé
Notation	6	5	3	1	0
Matériau de remplissage des discontinuités	Aucun	Remplissage dur < 5 mm	Remplissage dur > 5 mm	Remplissage mou < 5 mm	Remplissage mou > 5 mm
Notation	6	4	2	2	0

Nota : Certaines conditions sont mutuellement exclusives. Par exemple, si du matériau de remplissage est présent, il n'est plus pertinent de considérer la rugosité dans la mesure où son effet sera effacé par celui du remplissage. Dans ce cas utiliser directement la notation du tableau A 4.

F. INFLUENCE DE L'ORIENTATION ET DU PENDAGE DES DISCONTINUITES POUR LA STABILITE DES TUNNELS			
Horizontale du plan de discontinuité perpendiculaire à l'axe longitudinal du tunnel (creusement en travers bancs)		Horizontale du plan de discontinuité parallèle à l'axe longitudinal du tunnel (creusement en direction)	
Creusement dans le sens du pendage		Pendage 45° à 90° : très défavorable	Pendage 20° à 45° : moyen
Pendage 45° à 90° : très favorable	Pendage 20° à 45° : favorable		
Creusement contre le sens du pendage		Pendage 0° à 20° et orientation quelconque : moyen	
Pendage 45° à 90° : moyen	Pendage 20° à 45° : défavorable		

Tableau 3. Classe de rocher suivant la classification de Z. BIENIAWSKI

Note globale	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Classe de rocher et description	I Très bon rocher	II Bon rocher	III Rocher moyen	IV Rocher médiocre	V Rocher très médiocre
Temps de tenue Moyen	10 ans pour 5m de portée	6 mois pour 4m de portée	1 semaine pour 3m de portée	5 heures pour 1.5m de portée	10mn pour 0.5 m de Portée

I.3.1. Estimation des caractéristiques mécaniques des massifs rocheux 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 [4] :

A) la cohésion

$C_{\text{éq}} \text{ (kPa)} \approx 5 \text{ RMR}$ (Beniawski, 1979, cité par Beniawski, 1989) [16]

B) l'angle de frottement

$\Phi_{\text{éq}} \text{ (}^\circ\text{)} \approx 0,5 \text{ RMR} + 8,3 \pm 7,2$ (cité par Beniawski, 1989) [16]

C) le module de Young

$E_{\text{éq}} \text{ (GPa)} \approx 10^{\frac{(RMR-10)}{40}}$ (cité par Beniawski 1989) [16]

On peut estimer la résistance à la compression simple du massif rocheux à partir de la valeur du RMR_{basic} , le tableau suivant représente la relation entre eux :

Tableau 4. Relations entre RMR_{sec} et la résistance à la compression simple

RMR_{basic}	$RMR_{\text{basic}} = A1 + A2 + A3 + A4$				
	<21	21-40	41-60	61-80	>80
$R_c \text{ (MPa)}$	0,5	2,5	5	2	30

I.3.2. Limitations du système RMR

Étant donné que le système de classification RMR est initialement développé pour le domaine civil. Dans le domaine minier voici quelques limitations pertinentes où l'ingénieur doit questionner la validité lors de l'évaluation d'un massif rocheux :

- Le paramètre de l'orientation des discontinuités (B) est ignoré. Le système conservé redevient le RMR_{de base}. Cette correction est apportée principalement pour ignorer les conditions environnementales résultant en une classification dépendante du massif rocheux uniquement.
- Les contraintes sont ignorées comme paramètre du système RMR. Estime le système RMR adéquat pour un projet civil jusqu'à une contrainte verticale de 25 MPa. Souvent dans le domaine minier, les mines souterraines exploitent à des niveaux de contraintes supérieurs.
- Cette classification ne prend pas en considération l'état de contrainte in-situ ni la rugosité des fractures et l'angle de frottement du matériau de remplissage ; les roches gonflantes n'y sont pas non plus traitées.
- L'application de cette classification est limitée aux cas de massifs dont la matrice a une bonne résistance et dont le comportement est régi par les discontinuités. Néanmoins, le RMR reste un outil puissant, lorsque bien utilisé. Ce système a réussi à identifier des paramètres géologiques quasi universels permettant d'enregistrer rapidement et simplement toute expérience d'excavations dans la masse rocheuse. De la sorte, l'application du système de classification RMR s'étend avec succès à la conception de fondation, de stabilité de talus, l'évaluation du décapage, ainsi que de nombreuses applications minières [5].

I.4. Système Q

Développée par le Norvégien Geotechnical Institute (NGI), cette classification a été établie pour prévoir le soutènement des excavations exécutées dans des terrains à contrainte horizontale élevée (Barton et al.1974) [17]. Elle est caractérisée par un indice de qualité Q variant entre 0.001 pour un massif très mauvais et 1000 pour un massif très bon. Dans la pratique, cet indice est réduit entre 0.005 et 50.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{j_r}{j_a} \cdot \frac{j_w}{SRF}$$

L'obtention des valeurs des paramètres de Q Barton se fait par les tableaux suivants :

- ❖ RQD (Rock Quality Designation) caractérise la qualité des carottes de sondage.

Tableau 5. RQD Rock Quality Désignation

Très médiocre	RQD = 0 – 25%
Médiocre	25-50
Moyen	50-75
Bon	75-90
Excellent	90-100
Notes :	
(i) Quand la valeur du RQD est < 10 (y compris 0), on utilise une valeur nominale de 10 pour évaluer Q	
(ii) Les intervalles RQD de 5, i.e. 100, 95, 90, etc ... sont suffisamment précis	

- ❖ J_n (Joint set number) représente le nombre de familles de discontinuités.

Tableau 6. Paramètre de J_n (nombre de famille de discontinuités), (Barton et al., 1974) [17]

Nombre de famille de diaclases	J _n
Massif, peu ou pas de diaclases	0,5-1
Une famille de diaclases	2
Une famille et diaclases aléatoires	3
Deux familles de diaclases	4

Deux familles et diaclases aléatoires	6
Trois familles de diaclases	9
Trois familles et diaclases aléatoires	12
Quatre familles et plus, diaclases aléatoires très nombreuses	15
Roche concassée, semblable à un sol	20
<p>Note :</p> <p>(f) Pour une intersection, utilisez 3 x Jn</p> <p>(g) Pour un portail, utilisez 2 x Jn</p>	

- ❖ Jr (Joint roughness number) représente la rugosité des épontes de la famille de discontinuité la plus défavorable en terme d'orientation.

Tableau 7. Paramètre Jr (paramètre de rugosité des joints), (Barton et al. 1974) [17]

(a) Épontes en contact (b) Épontes en contact après cisaillement de moins de 10 cm	Jr	(c) Épontes hors contact après cisaillement	Jr
Joint discontinu	4	Zone argileuse d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact Zone sableuse, graveleuse ou broyée d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact	1,0
Joint ondulés, rugueux ou irréguliers	3		
Joint ondulés, lisses	2		
Joint ondulés, striés (lisses, luisants, Polis)	1,5		
Joint plans, rugueux ou irréguliers	1,5		
Joint plans, lisses	1,0		
Joint plans, striés	0,5		
<p>Note : (i) Les descriptions se réfèrent à des éléments de petites ou moyennes dimensions dans cet ordre.</p>		<p>Note : (i) Majorer la valeur de 1,0 si l'espacement moyen des joints de la famille principale est supérieur à 3m.</p> <p>(ii) Jr = 0,5 si les joints plans et striés comportent des linéations orientées de telle sorte qu'elles peuvent amorcer une rupture.</p>	

❖ Ja (Joint alteration number) caractérise l'état d'altération des discontinuités

Tableau 8. Paramètre Ja (paramètre d'altération des joints), (Barton et al 1974) [17]

Épentes en contact	Caractère du joint		Conditions	Ja
	Joints propres	Joint serré, recimenté	Remplissage de quartz, épidote, etc.	0,75
	Épentes non altérées	Pas d'enduit.	1	
	Épentes légèrement altérées	Enduit minéral non radoucissant, grains sans argile	2	
Enduits ou remplissage	Enduits à frottement	Sable, silt, calcite, etc. (non radoucissant)	3	
	Enduits à cohésion, épaisseur < 1-2 mm	Argile, chlorite, talc, etc. (radoucissant)	4	
Épentes en contact	Remplissage	Type	Ja	
	Matériaux frottant	Sable, silt, calcite, etc.	4	
	Remplissage fortement sur-consolidé épaisseur < 5 mm	Remplissage compact d'argile, chlorite, talc...etc.	6	
	Remplissage légèrement sur consolidé, Épaisseur < 5 mm	Sur-consolidation légère ou moyenne d'argile, de chlorite, talc...etc.	8	
	Remplissage d'argiles gonflantes, Épaisseur < 5 mm	Matériaux gonflants (ex montmorillonite)	8-12	
Épentes séparées	Condition d'épente	Ja		
	Zones de roche concassée	6		
	Roche et argile	8-12		
	Zones silteuses, sableuses, Avec une faible fraction d'argile	5		
	Zones ou bandes épaisses d'argile	10-13		

- ❖ J_w (Joint water reduction) est un facteur de réduction dû à la présence de l'eau dans les joints.

Tableau 9. Paramètre J_w (paramètre hydraulique), (Barton et al, 1974) [17]

Influence de l'eau en charge	J_w	Pression d'eau approximative (kgf/cm²)
- Excavation à sec ou faibles venues d'eau (< 5 l/mn Localement)	1,00	< 1,0
- Venues d'eau ou pressions faibles, débouillage occasionnel au droit d'un Joint	0,66	1,0-2,5
- Fortes venues d'eau ou pression importante dans rocher de bonne tenue à joints sans remplissage	0,5	2,5-10,0
- Fortes venues d'eau ou pression importante, débouillages fréquents	0,3	2,5-10,0
- Très fortes venues d'eau lors des tirs, diminuant ensuite avec le temps	0,2 - 0,1	> 10,0
- Très fortes venues d'eau ou pressions très importantes sans réduction notable le temps	0,1 -0,05	> 10,0

Note :

(d) Les 4 derniers indices sont des estimations grossières. Augmenter la valeur de J_w en cas de mise en place d'un dispositif de drainage.

(e) Les problèmes particuliers liés à la formation de glace ne sont pas pris en compte.

❖ SRF (Stress Reduction Factor) est un facteur de réduction des contraintes dans le massif.

Tableau 10. Paramètre de SRF (paramètre de réduction relatif aux contraintes), (Barton et al, 1974) [17]

Ouvrage recoupant des zones de faiblesse provoquant la décompression de la roche lors du percement	Zones de faiblesse fréquentes, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement, rocher environnant très décomprimé (toutes profondeurs).	SFR=10		
	Zones de faiblesse individuelles, contenant de l'argile ou rocher décomposer chimiquement (profondeur de l'excavation <50m)	5		
	Zones de faiblesse individuelles, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement (profondeur de l'excavation >50m)	2,5		
	Nombreuses de zones de cisaillement en rocher sain, sans argile (toutes profondeurs)	7,5		
	Zones de cisaillement individuelles en rocher sain, sans argile (profondeur de l'excavation <50 m)	5		
	Zones de cisaillement individuelles en rocher rigide, sans argile (profondeur de l'excavation >50 m)	2,5		
	Jointes ouverts, rocher très fracturé et décomprimé, "morceaux de sucre", etc. (toutes profondeurs)	5		
Note :				
(i) Réduire l'indice SFR de 25% à 50 % si les zones de cisaillement influent sur l'excavation mais ne la traversent pas.				
		S_c/σ_c	σ_q/σ_c	SFR
Roche sain, problèmes de contraintes in situ	Contrainte faible, excavation peu profonde	>200	<0,01	2,5
	Contraintes moyennes	200-10	0,01-0,3	1
	Contrainte importante, structure très serré (condition normalement favorable à la stabilité mais peut être défavorable à la tenue des piédroits)	10-5	0,3-0,4	0,5-2
	Mouvement de toit modérer (rocher massif)	5-3	0,5-0,65	5-50
	Quelque chute de toit (rocher massif)	3-2	0,65-1	50-200
	Chutes de toit importantes (rocher massif)	<2	>1	200-400
Notes :				
(h) Si l'état de contraintes est fortement anisotrope : pour $5 < \sigma_1/\sigma_3 < 10$, réduire σ_c à $0,75 \sigma_c$ Pour $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, réduire σ_c à $0,5 \sigma_c$				
(i) Il est rare que la hauteur de couverture au-dessus du toit soit plus faible que la largeur de l'ouvrage. Si c'est le cas, il est suggéré de porter l'indice de SFR de 2,5 à 5.				
			σ_θ/σ_c	SFR
Rocher poussant	Déformation plastique du rocher sous l'action de fortes contraintes naturelles	Moyennes pressions	1-5	5-10
		Fortes pressions	>5	10-20
Rocher gonflant	Action chimique en fonction de la présence d'eau	Moyennes pressions		5-10
		Fortes pressions		10-15

Le premier rapport (RQD / J_n) représente la taille potentielle des blocs rocheux et est une mesure de la taille des blocs / taille de coin. Puisque le RQD augmente généralement avec le nombre décroissant d'ensembles de discontinuité, le numérateur et le dénominateur du quotient se renforcent mutuellement l'un l'autre.

Le deuxième quotient (J_r / J_a) concerne la qualité mécanique des contacts entre Blocs, il représente la rugosité et les caractéristiques de frottement des parois de joint ou des matériaux de remplissage (Singh et Géol.1999) [18]. Ce quotient est pondéré en faveur de joints rugueux et inchangés en contact direct. Des valeurs élevées de ce quotient représentent une meilleure « qualité mécanique » de la masse rocheuse.

Le troisième quotient (J_w / SRF) est un facteur empirique représentant la contrainte active intégrant les pressions et les écoulements de l'eau, la présence de zones de cisaillement et de roches argileuses, les roches comprimées et gonflées et l'état de contrainte in situ. Selon Singh et Géol. (1999) [18], la charge de relâchement dans le cas d'une excavation à travers des zones de cisaillement et de la roche argileuse) la contrainte de la roche dans la roche compétente et 3, la compression des charges dans les roches en plastique incompétentes. Le quotient augmente avec la diminution de la pression de l'eau et des rapports de contraintes in situ favorables.

Déterminer une plage de variation de Q en faisant un calcul avec les valeurs les plus défavorables puis avec les plus favorables peut conduire à des écarts très importants, si le calcul est fait pour des sous-ensembles aux caractéristiques très hétérogènes.

Le tableau 11. Récapitule les plages de variations des différents paramètres et permet d'apprécier leur poids respectif au sein de la valorisation globale de l'indice Q. [3]

Tableau 11. Plages de variation des paramètres pris en compte pour le calcul de l'indice Q. [3]

PARAMETRES	CONDITIONS LES PLUS DEFAVORABLES	CONDITIONS LES PLUS FAVORABLES	PLAGES DE VARIATION (rapport maximal)
RQD	10	100	10
Jn	20	0,5	40
Jr	0,5	4	8
Ja	20	0,75	27
Jw	0,05	1	20
SRF	20 ⁽⁶⁾	0,5	40

Le poids du paramètre SRF dans le 3e coefficient Jw / SRF est particulièrement important, ce qui fait l'originalité de l'indice Q qui prend en compte :

- ❖ La présence éventuelle de zones cisillées, broyées ou à forte teneur argileuse.
- ❖ Le niveau de contrainte dans les roches à comportement fragile.
- ❖ Les efforts potentiels de fluage et de gonflement dans les roches déformables.

L'indice Q dépend donc fortement de données non intrinsèques du matériau rocheux et notamment de l'état de contrainte auquel est soumis le massif. La formulation de Q présente cependant le désavantage de ne pas faire apparaître directement de paramètre caractéristique de la résistance mécanique du matériau rocheux [3].

Bieniawski [1976] [14] a été le premier à proposer des corrélations empiriques entre le RMR et le Q système :

$$\text{RMR} = 9 \log Q' + 44$$

Cette expression a été modifiée par plusieurs autres chercheurs. Toutefois ces corrélations ne sont pas très fiables et doivent être utilisées avec beaucoup de précaution, le RMR et le Q-system ne prennent pas en considération les mêmes paramètres et donc, elles ne sont pas équivalentes [2].

Outre que les recommandations sur le besoin de support de terrain, le Q-system permet d'évaluer qualitativement la masse rocheuse selon neuf catégories de qualité.

Le tableau (12) présente cette qualification :

Tableau 12. Classification de massif en fonction de la valeur Q [5].

Indice Q	Qualité de la masse rocheuse
0,001 – 0,01	Exceptionnellement médiocre
0,01 – 0,1	Extrêmement médiocre
0,1 – 1	Très médiocre
1 – 4	Médiocre
4 – 10	Moyenne
10 – 40	Bonne
40 – 100	Très bonne
100 – 400	Extrêmement bonne
400 – 1000	Exceptionnellement bonne

I.4.1. Limitations du système Q

- L'utilisation de l'indice Q est spécifiquement développée pour des tunnels et des excavations en forme de voute, principalement pour le domaine du génie civil. En conséquence, il se présente quelques limitations lors de l'application à un massif rocheux dévoilant un comportement mécanique anisotrope.
- Étant donné que la cote Q a été développée presque exclusivement avec moins de 3 séries de discontinuité, l'indice Q semble diminuer la compétence de la roche quand le massif présente 4 discontinuités espacées. Ces derniers déconseillent donc d'utiliser la cartographie géologique pour risque de compter plusieurs familles de discontinuités.
- Lors du développement du système, seulement neuf études de cas ont des conditions de terrain problématique (gonflement ou convergence). Une conséquence indirecte souvent attribuable au massif rocheux anisotrope.

Dans cette classification, l'évaluation de Q dépend de l'état des contraintes dans le massif et des paramètres non intrinsèques de la matrice rocheuse. La contribution directe de la résistance mécanique de la matrice rocheuse est absente. En outre l'orientation des joints n'apparaît pas dans cette classification [5].

I.5. Système du GSI (Geological Strength Index)

Introduit par Hoek et al. [1995] [19] puis amélioré en 1997, le Geological Strength Index ne présente pas une classification géomécanique en soi. Cependant, il constitue un lien entre le RMR (Q-system) et la détermination des paramètres de déformabilité et de résistance des massifs rocheux.

Afin d'estimer le GSI, il est nécessaire de calculer le RMR' et le Q' qui sont des valeurs modifiées de RMR et de Q. Le RMR' est calculé en retenant une valeur 15 pour le coefficient relatif à l'eau (A5) et une valeur nulle pour le coefficient de correction relatif à l'orientation des discontinuités (B).

$$RMR' = A1 + A2 + A3 + A4 + 15$$

De même, Q' se calcule en ne tenant pas compte de l'état initial du massif par rapport à l'eau et aux contraintes (Jw/SRF).

$$Q' = \frac{RQD}{Jn} \cdot \frac{Jr}{Ja}$$

Ayant calculé RMR' et Q' le GSI se détermine comme suit :

$$GSI = RMR'_{89} - 5 \quad \text{si } RMR'_{89} > 23$$

$$GSI = 9 (\log Q' + 44) \quad \text{si } RMR'_{89} \leq 23$$

L'estimation du GSI s'appuie sur une observation directe de la structure du massif rocheux à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in situ.

Cet indice varie entre 5 et 85. Par définition, les valeurs proches de 5 correspondent à des matériaux de très mauvaise qualité. Tandis que les valeurs proches de 85 décrivent des matériaux d'excellente qualité [2].

Tableau 13. Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI [2].

Valeur du GSI	76-95	56-75	41-55	21-40	<20
Qualité du Massif	Très Bonne	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très Mauvaise

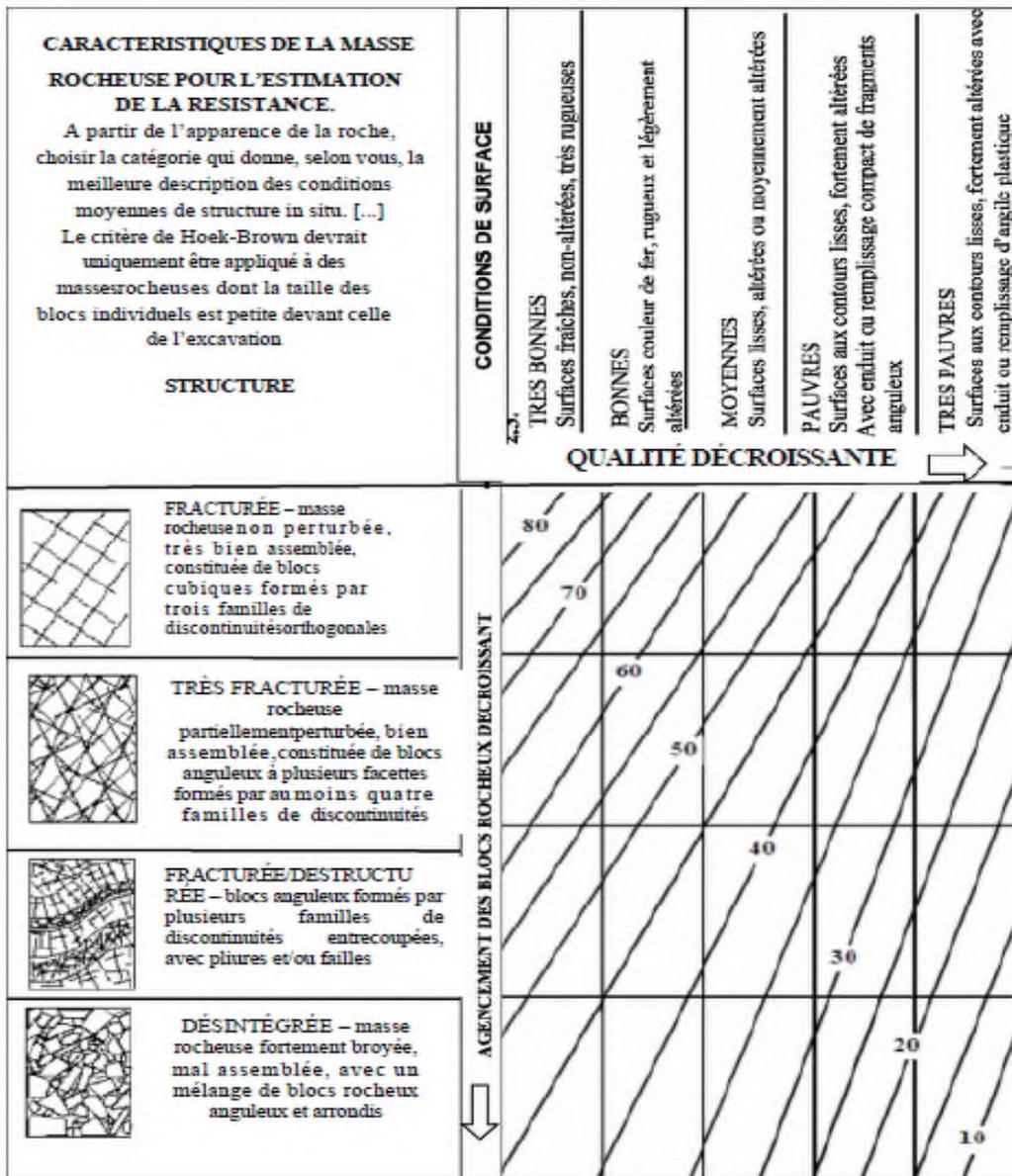


Figure 3. Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse [3]

La Figure 3, présente les 20 codes qui permettent d'identifier chaque catégorie de masses rocheuses, et d'estimer la valeur du *GSI* à partir des conditions de surface des discontinuités et de leur structure.

Par définition, les valeurs proches de 5 correspondent à des matériaux de très mauvaise qualité, tandis que les valeurs proches de 85 décrivent des matériaux d'excellente qualité (pour lesquels la résistance de la masse est égale à celle de la matrice rocheuse).

Cependant, en raison du manque de paramètres mesurables plus représentatifs, et de la largeur des intervalles permettant de décrire les conditions de surface des discontinuités, seules des gammes de valeurs peuvent être estimées à partir de la classification *GSI*.

Par exemple, pour une roche fracturée avec des discontinuités ayant des conditions de surface très bonnes, les valeurs du *GSI* obtenues à partir de la Figure 3. Varient entre 63 et 85. L'imprécision apparente peut susciter des interrogations, mais Hoek indique que la géologie n'aspire pas à une telle précision et qu'il serait simplement irréaliste d'assigner une valeur unique. Il ajoute que pour des études préliminaires il peut être prudent de considérer des déviations plus importantes pour les paramètres d'entrée.

I.6. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)

Introduit par Romana en 1985[20], Le SMR est davantage orienté vers la stabilité des pentes rocheuses. Il est obtenu à partir du RMR en lui ajoutant un produit de facteurs d'ajustement dépendant de la relation joints – talus et en lui additionnant un facteur dépendant de la méthode d'excavation [7] :

$$SMR = RMR_{de\ base} + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4$$

F1, F2 et F3 : facteurs d'ajustement.

- F1 établi empiriquement, il dépend du parallélisme entre les directions des joints et des talus. Ce facteur peut varier de 1 (quand les deux sont presque parallèles) à 0,15 (quand l'angle entre les deux est plus grand que 30° et que la probabilité de rupture est très faible

$$F1 = (1 - \sin A)^2$$

A est l'angle entre les directions des joints et du talus.

- F2 dépend du pendage des joints pour le mode de rupture plan. Les valeurs varient de 1 (pour les joints de plus de 45° de pendage) à 0,15 (pour les joints de moins de 20° de pendage). Dans le cas du toppling, le facteur reste égal à 1. Il a également été établi empiriquement par l'équation suivante :

$$F2 = \tan^2 \beta_j$$

β_j est le pendage des joints

- F3 est lié à la relation entre la pente du talus et le pendage des joints. Pour ce paramètre, il y a également lieu de faire la différence entre une rupture plane et une rupture par toppling.

- F4 prend en compte la méthode d'excavation. Il est fixé empiriquement sur les bases suivantes :

- Les talus naturels sont plus stables à cause de l'érosion à long terme et des protections naturelles telle la végétation.
- La roche prédécoupée augmente également la stabilité.
- L'abattage à l'explosif augmente, ne change pas ou diminue la stabilité du talus selon qu'il est léger, normal ou déficient (trop d'explosifs par exemple).
- L'excavation mécanique par arrachage dans les roches très fracturée n'augmente, ni ne diminue la stabilité du talus.

Les valeurs des paramètres figurent dans le tableau (14) :

Tableau 14. Notes des paramètres du SMR (Romana, 1985) [7].

SMR= RMR_{de base} + (F1*F2*F3) + F4							
Facteurs d'ajustement liés aux joints (F1, F2, F3).		α_j =Direction du pendage des joints β_j =Pendage du joint α_s =Direction du pendage du talus β_s =Pendage du talus					
		Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable	
Rupture Plane	$ \alpha_j - \alpha_s =$	>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°	
Basculement	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ =$						
Valeur de F1		0,15	0,4	0,7	0,85	1	
Relation		$F1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s)^2$					
$ \beta_j =$		<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°	
La valeur	Rupture plane	0,15	0,4	0,7	0,85	1	
	Basculement	1					
Relation		$F2 = \text{tg}^2 \beta_j$					
Rupture plane		$\beta_j - \beta_s =$	>10°	10-0°	0°	0°-(-10°)	< (-10°)
Basculement		$\beta_j + \beta_s =$	<110°	110°-120°	>120°	-	-
Valeur de F3		0	-6	-25	-50	-60	

Relation	F3 = Ajustement de BIENIAWSKI pour l'orientation des joints, 1976				
F4 : Facteur d'ajustement pour la méthode d'ajustement	F4=Valeur empirique de la méthode d'excavation.				
	Talus naturels	Prespliting	Smooth blasting	Explosif ou mécanique	Déficient blasting
Valeur de F4	15	10	8	0	-8

Une valeur de SMR est calculée pour chaque couche de discontinuités. Finalement la plus petite valeur est retenue pour quantifier la globalité du talus.

La description des classes SMR figure dans le tableau 15

Tableau 15. Description des classes SMR (Romana, 1985) [7].

Description des classes SMR										
Classe	Va	Vb	Iva	IVb	IIIa	IIIb	IIa	IIb	Ia	Ib
Description	Très mauvais		Mauvais		Moyen		Bien		Très bien	
Stabilité	Complètement instable		Instable		Partiellement stable		Stable		Complètement stable	
Rupture	Grand plan		Plan Ou grand dièdre		Quelques joints ou beaucoup de Dièdres		Quelques blocs		Aucune	
Support	Réexcavassions		Importante corrective		Systématique		Occasionnel		Aucun	

A partir du SMR, il est alors possible d'estimer la stabilité du talus et de préconiser les méthodes de confortement (ancrages, boulons, béton projeté, etc...).

I.7. Commentaires sur les systèmes de classification

Les classifications quantitatives des massifs rocheux fracturés sont utilisées de puis plusieurs dizaines d'années pour la conception et la construction des ouvrages réalisés dans les massifs rocheux. Elles sont basées sur la connaissance des paramètres décrivant la qualité du massif rocheux et font la combinaison des différents paramètres mesurés sur le site pour arriver à mettre une note concernant la qualité du massif rocheux.

Ces méthodes sont facilement utilisées au stade de l'avant-projet. Cependant elles présentent certaines limites que nous résumons ci-dessous [2] :

- Les paramètres de classification sont utilisés universellement sur tous les types de massifs rocheux, sans tenir compte de leurs caractéristiques spécifiques et du projet considéré.
- Les propriétés complexes du massif rocheux, en particulier son anisotropie et son comportement différé (dépendant du temps) ne sont pas pris en compte.
- En général, ces méthodes empiriques simplifiées ne prennent pas en compte le mécanisme de rupture, de déformation et de l'interaction du support avec la roche.
- Le *RMR* et le *Q-system* ne sont pas adaptés au cas de roches tendres.

- Les paramètres de déformabilité et de résistance qui en résultent sont relatifs à un milieu isotrope.

Dans le domaine minier où le dimensionnement des chantiers et le temps de soutient nécessaire jouent un rôle important, les systèmes de classification classiques se sont avérés

Inaptes principalement dû à leur grande imprécision pour la description du massif rocheux et pour leurs suggestions en support de terrain [5].

Le tableau 16 représente la comparaison des utilisations du *RMR* et *Q* Barton dans le domaine des travaux souterraines

Tableau 16. Comparaisons des utilisations du RMR et du Q-system dans le domaine des travaux souterrains [3]

	<i>RMR</i>	<i>Q-system</i>
Caractérisation globale du massif rocheux	(a) Bonne prise en compte de l'organisation de la fracturation, sauf pour les massifs rocheux anisotropes (schistes, ardoises...).	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne prise en compte des propriétés mécaniques des discontinuités. • Prise en compte des contraintes naturelles.
Évaluation des caractéristiques mécaniques à l'échelle du massif	<ul style="list-style-type: none"> • Existence de relations empiriques liant <i>RMR</i> aux paramètres de déformabilité et de résistance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Existence des relations empiriques liant <i>Q</i> et paramètres physiques et mécaniques (vitesse des ondes longitudinales, déformabilité).
	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation nécessitant une très grande prudence, en particulier pour les paramètres de résistance : <p style="margin-left: 20px;">Proscrire les corrélations en cascade $Q \rightarrow RMR \rightarrow (m, s)^* \rightarrow (C, \phi)$</p>	
Utilisation pour les ouvrages	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte de l'orientation des discontinuités par rapport à l'ouvrage. • Définition raide de la longueur de volée. • Définition du temps de tenue sans soutènement (approche conservative). • Ne prend pas en compte la méthode d'excavation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Non prise en compte de l'orientation des discontinuités par rapport à l'ouvrage. • Définition rapide des soutènements à mettre en œuvre (voûtes, parement et intersections) mais fausse impression de précision concernant la longueur des boulons. • Utilisation en phase amont (projet) et aval (suivi de creusement). • Prise en compte de l'évolution des techniques de soutènement.
Paramètres du critère de résistance généralisé de Hoek et Brown [1997]		

I.8. Conclusion

Nous distinguons cinq types de méthodes de classification des massifs rocheux, en l'occurrence, RMR, RQD, Q BARTON, GSI et SMR. Ces systèmes de classifications constituent autant de méthodes de nature empirique qui définissent les propriétés du massif étudié, en prenant en compte plusieurs facteurs qui affectent sa stabilité.

En effet, le rôle du système de classifications des massifs rocheux résulte de la combinaison des informations, de manière structurée, découlant des observations de mesure ou de l'expérience, permet de fournir des données quantitative et qualitative sur la situation du massif étudié et sur le type de soutènement qui convient.

Chapitre II : Classification géomécanique du Tunnel Ait Yahia Moussa

Chapitre II : Classification géomécanique du Tunnel Ait Yahia Moussa

II.1. Introduction

Le chantier pharaonique du siècle, l'autoroute Est-Ouest algérienne qui avait pour fin de renforcer le réseau routier national, ne passent pas, en effet, par toutes les grandes villes algériennes telles que Tizi-Ouzou. Dans le but de remédier à cet isolement, des routes pénétrantes ont été prévues, telle que celle reliant la ville Tizi-Ouzou à l'autoroute Est-Ouest ont été prévues et réalisées. La commune d'Ait Yahia Moussa est concernée par la réalisation de la pénétrante Tizi Ouzou afin de lier les différentes communes et localités de la wilaya du même nom à la grande autoroute nationale l'autoroute est-ouest.

II.2. Situation géographique

Une campagne d'investigations in situ a été réalisée au niveau de la commune d'Ait Yahia Moussa, cette commune (anciennement Oued Ksari) est située dans la daïra de Drâa El Mizan. Elle se trouve à 30 km au Sud-ouest de chef lieu de la wilaya de Tizi Ouzou, entourée de l'Est par les communes de Drâa ben Khedda et Tirmatine, de l'Ouest par les communes de Draa El Mizan et de Mkira, de sud par les communes de Mâatkas et de Ain Zaouia et par le Nord les communes de Tadmait et de Timezrit (Boumerdes).

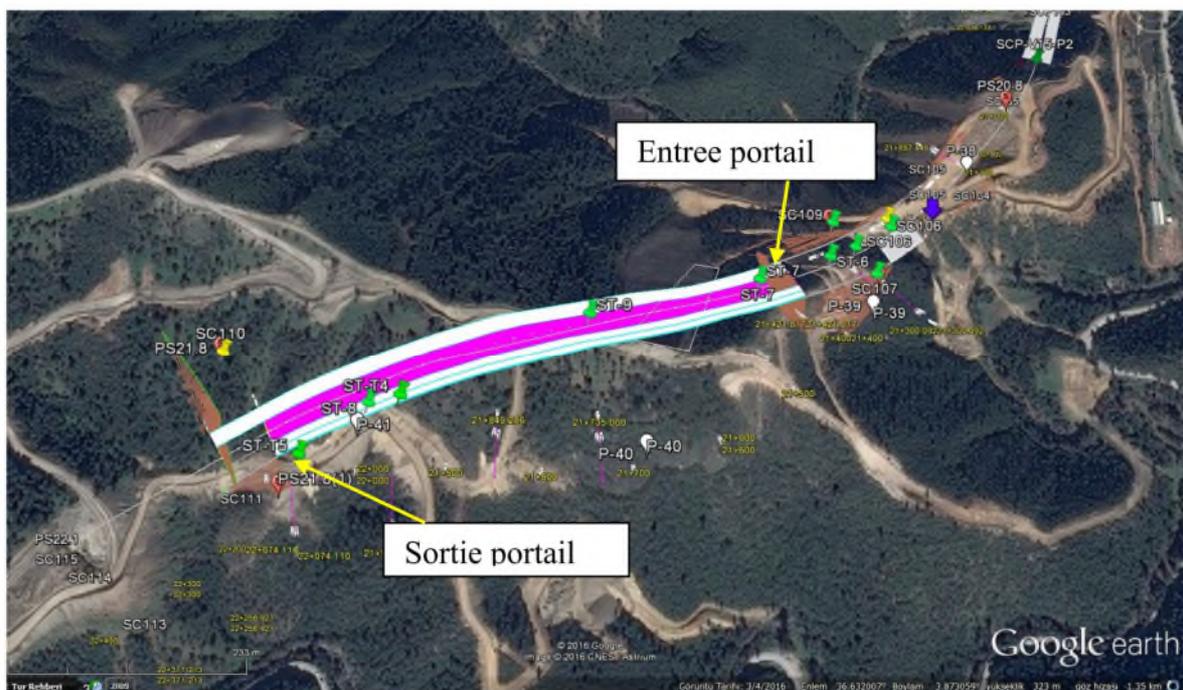


Figure 4. Image satellite de la zone du projet.

II.3. Situation Géologique

La zone d'étude se situe dans la chaîne Nord-centre Atlasienne, plus précisément dans le tell septentrional qui présente une structure particulièrement complexe et diversifiée. Les différentes formations sédimentaires ont subi des déformations techniques dues aux mouvements orogéniques alpins de la fin de l'ère tertiaire et du quaternaire. Cette tectonique cassante est particulièrement marquée par la présence d'importantes failles dans la partie sud de la zone, qui correspond à la terminaison occidentale de la chaîne de Djurdjura.

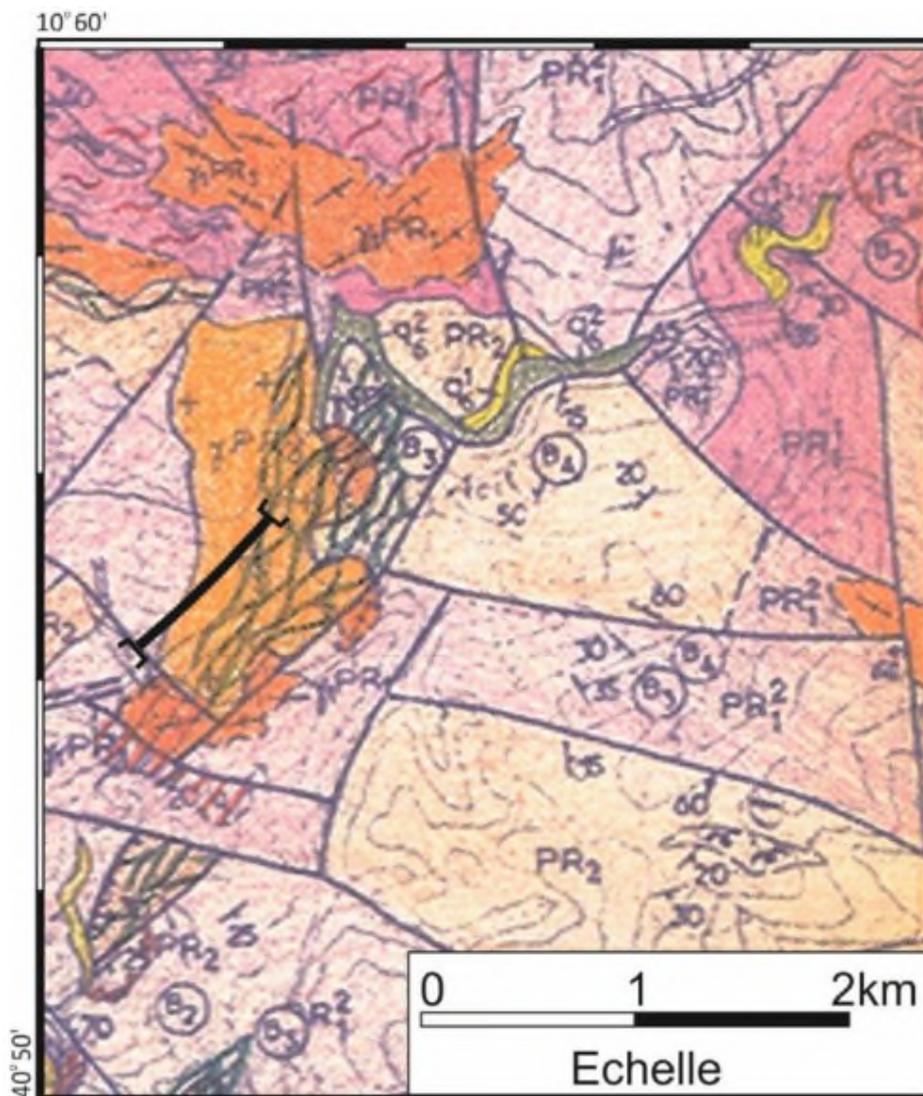


Figure 5. Emplacement du tunnel AIT YAHIA MOUSSA sur la carte DRAA EL MIZAN (Chmiguirilov et autres, 1986)

La définition du rocher métaclastique donné par (Chmiguirilov et al, 1986) [21] est exactement utilisée de notre part dans cette étude. Cependant on a préféré d'utiliser l'expression de rocher métagranite au lieu de gneiss.

II.4. Données relevées du site

Les études de terrain sont réalisées en mai 2016 sur le site de projet. Lors de ces travaux, les caractéristiques techniques des unités de rochers et de sol qui seront rencontrés sur le trajet du tunnel sont déterminés avec des recherches géologiques superficielles basées sur des observations de terrain et transférés sur la carte géologique technique établies en mesurant les éléments structurels comportés par les unités de rocher. La distribution en vertical des unités lithologique dont la distribution superficielle est déterminée dans ces cartes est examinée avec 13 sondages ouverts sur le trajet du tunnel pendant la période de janvier-mars 2016. Lors des études de terrain, des mesures détaillées de discontinuité ont été accompli, et l'index de résistance géologique des unités constatés ont été déterminé grâce aux données géologiques, afin de constituer la base des paramètres géotechniques. A l'issue de ces études, le modèle géologique du site est établi, les structures telles que les contacts lithologiques, les éléments structurels sont inséré en détail dans le plan de profil géologique.

Les essais in situ et au laboratoire ont donné les résultats suivants :

- Résistance à la compression UCS d'une valeur de 15 MPa.
- Un RQD de 20%
- Sur les affleurements on a observé l'existence de 03 familles de discontinuités. Le tunnel sera creusé à une profondeur de 100m par rapport au terrain de couverture.
- L'espacement moyen des discontinuités est de 300mm. L'extension est de 0.8m.
- L'ouverture des épontes est de 0.8mm, elles sont faiblement rugueuses, faiblement altérées.
- Les conditions du terrain sont globalement humides.

Notre objectif est de classifier le massif rocheux selon la méthode de Bieniawski (RMR) et l'indice de Q Barton.

II.5. Classification du site selon la méthode de Bieniawski (RMR)

Le tableau suivant les paramètres, les valeurs et les notes d'après la méthode de Bieniawski :

Tableau 17. Classification de RMR pour l'unité constatée au niveau du Tunnel.

A	Paramètre	Valeur	Note
1	Résistance à la compression unie axiale (MPa)	15	2
2	Indicateur de qualité de roche (RQD %)	20	3
3	Espacement des discontinuités (mm)	200-600	10
4	Nature des discontinuités		
	Longueur de discontinuité	<1 m	6
	Ouverture	0.1-1.0 mm	4
	Rugosité	Faible rugueux	3
	Remplissage	Non	6
	Degré d'altération	Faiblement altérée	5
5	Condition du terrain	Humide	10
RMR de base = 49			
B	Orientation et pendage des discontinuités	Très défavorable	-12
RMR₈₉ = 37			

II.5.1. Calcul le RMR

Pour parvenir au calcul du RMR₈₉, nous devons tout d'abord déduire les cinq notations ainsi que l'ajustement B d'après le (Tableau 2) :

- On a la résistance à la compression = 15 Mpa, donc
A1 = 2
- On a l'indicateur de qualité de roche RQD = 20%, alors
A2 = 3
- On a l'espacement des discontinuités = 300 mm, donc
A3 = 10
- Et pour calculer le A4 lié à la nature des discontinuités on détermine les 4 indications suivantes :
 - Longueur de discontinuité qui égale 0.8 m donc sa note = 6

- L'ouverture des épontes est de 0.8 mm donc sa note = 4
- Les épontes sont faiblement rugueuses donc la rugosité = 3
- On a aucuns matériaux de remplissage donc sa notation est 6
- Les épontes sont Faiblement altérées donc la notation d'altération = 5

D'après ces indications on conclut le résultat de A4, donc

$$A4 = 24$$

- Les conditions du terrain sont globalement humides, donc
- Et pour le pendage des discontinuités est entre $45^\circ - 90^\circ$, donc

$$B = -12$$

$$RMR_{89} = A1+A2+A3+A4+A5+B$$

$$RMR_{89} = 2+3+10+24+10-12$$

$$RMR_{89} = 37$$

II.5.2. Conclusion

Suivant les résultats que nous avons obtenus avec la méthode du RMR, la masse rocheuse est de la classe IV et sa qualité est médiocre. Le temp de tenu moyen sans soutènement est 10h pour 2.5 mètres de portée.

II.6. Classification du site selon la méthode de Q Barton

Dans cette partie nous allons classifier le massif rocheux suivant la méthode de Q Barton.

II.6.1. Calcul de l'indice de qualité

La valeur de ce coefficient Q est déterminée par 6 paramètres de la façon suivante :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{j_r}{j_a} \cdot \frac{j_w}{SRF}$$

- RQD : Rock Quality Designation.
On a RQD = 20
- Jn : indice de familles principales de discontinuités.
On a 3 familles de discontinuités donc, Jn = 9

- Jr : caractérise la rugosité des faces des joints.
On a la discontinuité et plane rugueuse, donc Jr = 1.5
- Ja : définit le degré d'altération des joints (épaisseur du joint et nature du matériau de Remplissage).
On a les Épontes légèrement altérés, donc Ja = 1
- Jw : spécifie les conditions hydrogéologiques : importance des venues d'eau et pression.
On a un terrain globalement humide alors, le débit d'eau est très faible, donc Jw = 1
- SRF : (Stress Reduction Factor) précise l'état des contraintes dans le massif.

On a $\sigma_v = \gamma \cdot g \cdot H = 2.7 \cdot 10 \cdot 100 = 2700 \text{ KN}/m^2 = 2700 \text{ Kpa}$

$$\sigma_c = 15 \text{ Mpa} = 15 \cdot 10^3 \text{ Kpa, donc } \frac{\sigma_v}{\sigma_c} = \frac{2700}{15 \cdot 10^3} = 0.18$$

D'après le tableau 10. On a contraintes moyennes, donc SRF = 1

Tableau 18. Paramètres relatifs au système de classification Q pour l'unité constatée au niveau du tunnel.

Paramètre	Valeur/Définition	Note
RQD : Indicateur de Qualité de Roche	Très faible	20
Jn : Nombre de famille de joints	3 familles de discontinuités	9
Jr : Valeur de rugosité de joint	Planaire rugueux ou irrégulier	1.5
Ja : Valeur d'altération de joint	Éponte légèrement altérée	1
Jw : Facteur de réduction d'eau du joint	Excavation hors d'eau ou faible pression d'eau	1
SRF : Facteur de réduction de pression	Conditions de tension moyenne	1

Voici le résultat auquel nous sommes parvenus :

$$Q = \frac{20}{9} \cdot \frac{1.5}{1} \cdot \frac{1}{1} = 3.33$$

II.6.2. Conclusion

Suivant les résultats que nous avons obtenus avec la méthode du Q Barton, la masse rocheuse est de la classe IV et sa qualité est médiocre.

II.7. Comparaison des résultats obtenus

Les deux méthodes RMR et Q Barton ont donné le même résultat, en l'occurrence un massif rocheux de médiocre qualité. Ce qui nous mène à déduire qu'effectivement, le massif rocheux est de médiocre qualité.

Conclusion générale

Afin de réaliser des projets souterrains, cela nécessite des travaux d'excavations dans le massif rocheux, excavations qui induisent des modifications sur l'état initial des contraintes, ce qui oblige de faire une bonne étude de stabilité pour assurer la sécurité des travaux et la stabilité des terrains à long terme.

D'une part, notre travail est une synthèse des différentes méthodes de classification du massif rocheux et d'autre part il constitue une vérification de la stabilité lors du creusement du tunnel d'Ait Yahia Moussa dans le cadre du projet de liaison autoroutière reliant Tizi-Ouzou à l'autoroute est-ouest, en appliquant les deux méthodes RMR et Q Barton. Cette étude nous a permis de comprendre que les deux méthodes ont indiqué que le massif rocheux traversé par le tunnel est de médiocre qualité.

Cela nous a permis de déterminer les recommandations exigées pour assurer la stabilité du terrain après avoir fait une comparaison entre les deux résultats obtenus malgré les conditions difficiles du site.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Bhawani Singh, R. K. Goel « Engineering Rock Mass Classification 2011 Elsevier », Page 1.
- [2] Chalhoub M., [2006], « Apport des méthodes d'homogénéisation numérique à la classification des massifs rocheux fracturés », Thèse de doctorat 2006, École Nationale des Mines de Paris, 206 pages.
- [3] AFTES., [2003], « Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et la réalisation des Ouvrages souterrains » 206 Pages.
- [4] Duffaut P. et Homand F., [2000], « Manuel de mécanique des roches » Tome 1 : fondements, Comité français de mécanique des roches, 88 pages.
- [5] Maciej A., [2012], « Modification des classifications mécaniques pour les massifs rocheux schisteux », Thèse de maîtrise des sciences appliquées de l'université de Montréal, Spécialité génie minier, 180 pages.
- [6] Zhao J., [2008], « Propriétés des discontinuités », part 3, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [7] Schroeder Ch., [2010], « Étude de stabilité des parois rocheuses », Revenue de société Belge de géologie de l'ingénieur et de mécanique des roches (SBGIMR), 90 pages.
- [8] Deere, D. U., A. J. Hendron, et al. (1967). Design of surface and near surface constructions in rock. Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mechanics. C. Fairhurst, New York
- [9] Deere, D. U. (1968). Geological considerations. Rock Mechanics in Engineering Practice. R. G. Stagg and D. C. Zienkiewicz. Wiley, New York
- [10] Deere, D. U. and D. W. Deere (1988). The Rock Quality Designation (RQD) index in practice. Proc. Symp. Rock Class. Engineering Purposes. ASTM Special Technical Publications
- [11] Palmstrom, A. (1982). The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of jointing. Proceedings of the 4th International Congress IAEG. New Delhi, India.
- [12] Bieniawski, Z. T. (1973). "Engineering classification of jointed rock masses." Trans. S. Afr. Instn. Civil Engrs.
- [13] Bieniawski, Z. T. (1974). Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling. Proc. Of the 3rd Int. Congress on Rock Mechanics. Denver.

- [14] Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. Proc. Of the Symposium on Exploration for Rock Engineering. Johannesburg, Balkema A.A.
- [15] Bieniawski, Z. T. (1979). The geomechanics classifications in rock engineering applications. Proc. Of the 4th Congress on Rock Mechanics (ISRM). Montreux, Balkema A.A. and Swiss Society for Soil and Rock Mechanics.
- [16] Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications : a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. New York John Wiley and Sons.
- [17] Barton, N., R. Lien, et al. (1974). "Engineering classification of rock masses for the design of rock support." Rock Mechanics
- [18] Singh, B. and R. K. Goel (1999). Rock mass classification : a practical approach in Civil Engineering. Oxford, Elsevier Science Ltd.
- [19] Hoek, E., P. K. Kaiser, et al. (1995). Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam.
- [20] Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Proc. Int. Symp. Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works, Mexico City, ISRM.
- [21] Chmiguirilov et al, (1986)

Résumé

La stabilité du massif rocheux joue un rôle très important pour la réalisation d'un projet dans des différents domaines tels que le domaine minier et celui du génie civil. Ce thème a pour objectif de déterminer les paramètres géomécaniques du massif rocheux du tunnel d'AIT YAHIA MOUSSA, ensuite de le classier et déterminer sa qualité.

Abstract

The stability of the rock mass have a very important role for the realization of a project in various fields such as mining and civil engineering, this topic aims to determine the geomechanical parameters of the rock mass of the tunnel of AIT YAHIA MOUSSA, then classify it.

ملخص

استقرار الكتلة الصخرية يساهم بشكل كبير لإنجاز مشروع في مختلف القطاعات مثل قطاع المناجم والهندسة المدنية، يهدف هذا العمل لتحديد الخصائص الجيوميكانيكية للكتلة الصخرية لنفق ايت يحيى موسى وتصنيفها لتحديد جودتها.