



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 en Mines

Option : Exploitation Minière

Présenté par

M^{elle} SADEK Kahina.

M^{elle} CHAOUCH Ibtissem.

Thème

*Caractérisation et classification du massif
rocheux du Djebel de Boukhadra -Tébessa-*

Soutenu le 29 / 06 /2016 devant le jury composé de:

Président: Mr. SAADOUN Abderrazak MAB U.A.M.BEJAIA.
Promotrice: Mme. KAMLI Ouarda MAA U.A.M.BEJAIA.
Examineur: Mr. BOULKRAM Riadh MAB U.A.M.BEJAIA.

Année Universitaire: 2015-2016

Remerciement

Nous tenons avant tout à remercier le bon Dieu pour nous avoir animé 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 promotrice M^{me} KAMLI Ouarda pour son encadrement, son soutien, pour tous ses précieux conseils qui ont été de grande utilité pour nous.

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

Monsieur BOULKRAM Riadh d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Au personnel de la mine de Boukhadra.

Tout le personnel du laboratoire SNC LTNC & CIE.

Au personnel du Laboratoire des Travaux Publics de l'Est (LTPE, Bejaïa).

Nos vifs remerciements s'adressent à l'ensemble du staff du département des mines.

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;

Ma sœur;

Tous les membres de ma famille, petits et grands;

Touts mes ami(e)s;

*Tous ceux qui de loin ou de près n'ont cessé de m'apporter
leur soutien pendant mes années d'études.*

Ibtissem

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents,

*A mes frères et ma sœur Hanane qui
j'adore,*

*A toutes ma famille et mes ami(e)s et
mes camarades,*

*Tous ceux qui de loin ou de près n'ont cessé de m'apporter
leur soutien pendant mes années d'études.*

Kahina

Sommaire

Liste des tableaux	I
Liste des figures	IV
Liste des abréviations	VII
Notations	VIII

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : structure et comportement d'un massif rocheux.

I.1. Introduction.....	3
I.2. Distinction sol/ roche.....	3
I.3. Classification géologique des roches	4
I.4. Structure géométrique des massifs rocheux.....	5
I.4.1. Description des massifs rocheux	5
I.4.2. Aspect géologique	6
I.4.3. Description des discontinuités.....	8
I.4.3.1. Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux	8
I.4.3.2. Les familles des discontinuités.....	9
I.4.3.3. Les caractéristiques géométriques des discontinuités	12
I.5. Conclusion	20

Chapitre II : Les Propriétés physico-mécaniques des roches.

II.1. Introduction	21
II.2. Les propriétés physiques des roches.....	21
II.2.1. La porosité	21
II.2.2. La masse volumique	21
II.2.3. La teneur en eau	22
II.2.4. Le degré de saturation.....	22
II.2.5. Le degré de fissuration des roches	22
II.2.6. La dureté	23
II.2.7. l'abrasivité	23
II.2.8. L'altérabilité.....	24
II.3. Les propriétés mécaniques des roches.....	25
II.3.1. Définition de la rupture.....	25
II.3.2. Critère de Mohr Coulomb et le module de Young	26
II.3.3. Le Critère de Hoek et Brown	27
II.3.4. La résistance à la compression.....	29
II.3.5. La résistance à la traction.....	30
II.3.5.1. Traction directe	30

II.3.5.2. Traction indirecte (Essai brésilien)	31
II.3.6. La résistance au cisaillement	32
II.3.6.1. Cisaillement simple.....	32
II.3.6.2. Cisaillement par torsion	35
II.3.6.3. Cisaillement par compression	35
II.3.7. La cohésion et l'angle de frottement interne.....	37
II.3.7.1. la cohésion (c)	37
II.3.7.2. L'angle de frottement interne (Φ).....	37
II.4. Conclusion	37

Chapitre III : Les systèmes de classification des massifs rocheux.

III.1. Introduction	38
III.2. Les buts des systèmes de classification des massifs rocheux.....	38
III.3. Les différents systèmes de classification	38
III.3.1. Système du RQD (Rock Quality Designation).....	39
III.3.2. Système RMR (Rock Mass Rating)	40
III.3.2.1. Estimation des caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR	44
III.3.2.2. Limitations du système RMR	44
III.3.3. Système Q.....	45
III.3.4. Système du GSI (Geological Strength Index)	47
III.3.5. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)	50
III.4. Commentaires sur les systèmes de classification	52
III.5. Conclusion.....	53

Chapitre IV : Conditions géologiques et minières de gisement.

IV.1. Introduction	54
IV.2. Historique de la mine	54
IV.3. Situation géographique	55
IV.4. Aperçu géologique du gisement de Boukhadra	56
IV.4.1. Géologie régionale	56
IV.4.2. Géologie du site.....	58
IV.4.3. Stratigraphie	58
IV.4.4. Tectonique	60
IV.4.5. Géomorphologie.....	61
IV.5. Aperçu Hydrologie et hydrogéologique de gisement de Boukhadra	61
IV.5.1. Données climatologiques	62
IV.6. Aperçu sur l'exploitation du gisement de Boukhadra.....	62
IV.6.1. Les réserves géologiques.....	62
IV.6.2. Méthodes et paramètres d'exploitation	65

IV.6.2.1. Exploitation à ciel ouvert.....	65
IV.6.2.2. Exploitation souterraine.....	68
IV.6.2.3. Ouverture du gisement de Boukhadra	69
IV.7. Conclusion	71

Chapitre V : caractérisation et classification géomécaniques du massif de Boukhadra.

V.1. Introduction.....	72
V.2. Les propriétés physico-mécaniques des terrains	72
V.2.1. La résistance à la compression	73
V.2.2. La résistance à la traction	76
V.3. Classification géomécaniques du massif rocheux de Boukhadra.....	77
V.3.1. Classification RQD.....	77
V.3.2. Classification RMR	78
V.3.3. Classification GSI.....	81
V.3.4. Classification Q-système	82
V.4. Conclusion.....	83
Conclusion générale	84

Bibliographie

Annexes.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Description de l'espace des discontinuités	15
Tableau I.2. Classification des discontinuités selon leur extension.....	18
Tableau I.3. Classification d'ouverture des discontinuités	19
Tableau II.1. Classification des discontinuités selon les valeurs d'ID.....	23
Tableau II.2. Echelle de dureté de Mohs	23
Tableau II.3. Durée de vie (mesurée en mètre foré) d'un taillant de forage en fonction de l'abrasivité des roches	24
Tableau II.4. Classification des roches en fonction de la résistance à la compression.....	30
Tableau II.5. Classification des roches en fonction de la résistance à la traction.....	32
Tableau III.1. Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux	40
Tableau III.2. Classification RMR (Bieniawski).....	43
Tableau III.3. Classe de rocher suivant la classification de Z. BIENIAWSKI après application de la note d'ajustement.....	44
Tableau III.4. Relations entre RMR_{sec} et la résistance à la compression simple.....	44
Tableau III.5. Classification de massif en fonction de la valeur Q	46
Tableau III.6. Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI	48
Tableau III.7. Notes des paramètres du SMR	51
Tableau III.8. Description des classes SMR.....	52

Tableau IV.1. Les éléments chimiques constitutifs de la minéralisation du gisement de Boukhadra	65
Tableau IV.2. Les principaux paramètres de l'exploitation à ciel ouvert	67
Tableau IV.3. Profondeurs moyennes et angles de pendages du gîte exploité en souterrain .	68
Tableau IV.4. Les dimensions de la galerie principale du niveau 1105	69
Tableau V.1. Les propriétés physico-mécaniques des différentes couches du Djebel de Boukhadra	72
Tableau V.2. Résistance à la compression de la marne grise.....	73
Tableau V.3. Résistance à la compression de la marne jaune.....	74
Tableau V.4. Résistance à la compression de la marne minéralisée	74
Tableau V.5. Résistance à la compression de minerai de fer.....	75
Tableau V.6. Résistance à la compression du calcaire.....	75
Tableau V.7. Classification du massif rocheux du Djebel de Boukhadra en fonction de la résistance à la compression	76
Tableau V.8. Classification du massif rocheux du Djebel de Boukhadra en fonction de la résistance à la traction	77
Tableau V.9. RQD des différentes couches	77
Tableau V.10. Classification RMR de la couche de la marne jaune.....	78
Tableau V.11. Classification RMR de la couche de la marne grise.....	79
Tableau V.12. Classification RMR de la couche de la marne minéralisé.....	79
Tableau V.13. Classification RMR de la couche de minerai de fer.....	80
Tableau V.14. Classification RMR de la couche du calcaire.....	80
Tableau V.15. Classification RMR du massif rocheux du Djebel de Boukhadra.....	81

Tableau V.16. Classification GSI du massif rocheux du Djebel de Boukhadra 82

Tableau V.17. Classification Q-système du massif rocheux du Djebel de Boukhadra..... 82

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols	4
Figure I.2. Structure géométrique d'un massif rocheux de calcaire au Nord du Liban	5
Figure I.3. Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés	6
Figure I.4. Types de structures des massifs rocheux.....	8
Figure I.5. Les joints stratigraphiques.....	9
Figure I.6. Les diaclases.....	9
Figure I.7. Les failles	10
Figure I.8. Les plis	11
Figure I.9. La schistosité	11
Figure I.10. Orientation d'un plan de discontinuité	12
Figure I.11. Représentation stéréographique	13
Figure I.12. Projection stéréographique d'une faille inverse	14
Figure I.13. Mesure de l'espacement	15
Figure I.14. Mesure de la fréquence des discontinuités	16
Figure I.15. Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC)	17
Figure I.16. Persistance de différents ensembles de fractures.....	18
Figure I.17. Fissure ouverte et remplie	19
Figure II.1. Rupture d'un sol.....	24
Figure II.2. Les contraintes provoquant la rupture	25

Figure II.3. Représentation de la droite de Mohr-Coulomb.....	26
Figure II.4. Diagramme contrainte-déformation.....	27
Figure II.5. Ajustement du critère linéaire de Mohr-Coulomb au critère non-linéaire de Hoek-Brown, d'après Hoek et Brown.....	29
Figure II.6. Dispositif expérimental.....	30
Figure II.7. Schéma de la compression uniaxiale	30
Figure II.8. Traction directe	31
Figure II.9. Dispositif expérimental (Essai Brésilien)	31
Figure II.10. Traction indirect (Essai Brésilien)	32
Figure II.11. Cisaillement simple avec une surface de cisaillement.....	33
Figure II.12. Cisaillement simple avec deux surfaces de cisaillement	34
Figure II.13. Cisaillement simple avec une surface cylindrique.....	34
Figure II.14. Cisaillement par torsion	35
Figure II.15. Cisaillement par compression	36
Figure II.16. Courbe représentative de τ en fonction de σ_n	36
Figure III.1. Une carotte	39
Figure III.2. Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR	41
Figure III.3. Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse (Hoek et Brown, 1995).....	49
Figure IV.1. Carte de situation géographique de la mine de Boukhadra (Tébessa).....	56
Figure IV.2. Carte géologique régionale.....	57

Figure IV.3. Carte géologique de Boukhadra	58
Figure IV.4. Colonne stratigraphique de la région de Boukhadra	60
Figure IV.5. Carte des réserves géologiques de gisement de Boukhadra	64
Figure IV.6. Modélisation en 3D du gisement de Boukhadra.....	64
Figure IV.7. L'opération de chargement et de transport	68
Figure IV.8. Coupe schématique du mode d'ouverture en souterrain	69
Figure IV.9. L'opération de chargement et de transport dans le fonds.....	70

LISTE DES ABREVIATIONS

SONAREM : Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minières.

FERPHOS : Entreprise nationale du fer et du phosphate.

C.F.M.R : Comité Français de Mécanique des Roches.

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

JRC: Joint Roughness Coefficient.

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.

D.E.D : Division d'Etude et Développement.

NOTATIONS

E : Module de Young	[KN /m ²]
C : La cohésion	[KN/m ²]
ν : coefficient de poisson.	
W : La teneur en eau.	
S _r : Le degré de saturation.	
I _d : Le degré de fissuration.	
f : La dureté.	
τ : Contrainte de cisaillement.	
σ_N : Contrainte normale.	
R _C : La résistance à la compression	[Kgf /cm ²]
R _t : La résistance à la traction	[Kgf/cm ²]
Φ : Angle de frottement interne.	
J _v : La densité volumique des joints.	
J _n : Nombre de famille de discontinuités.	
J _r : Paramètre de rugosité des joints.	
J _a : Paramètre d'altération des joints.	
J _w : Paramètre hydraulique.	
BK : Boukhadra.	
E : Est.	
S : Sud.	
O : Ouest.	
N : Nord.	

Introduction générale

Introduction générale

La stabilité des massifs rocheux fissurés reste une des questions principales qui se pose lors de l'exploitation minière qui résulte des activités d'extraction par la constitution d'ouvrages géotechniques au sens où l'on parle d'ouvrages miniers. La conception optimale de ces ouvrages doit intégrer les concepts de sécurité du travail, de récupération du minerai et de rentabilité.

Le problème de stabilité des massifs rocheux peut être résolu seulement à condition de connaître de façon approfondie et détaillée la structure du site étudié, cette connaissance doit avoir deux aspects également importants : d'une part, il y a la matrice rocheuse avec ses caractéristiques spécifiques (le type de la roche, la composition minéralogique, ses propriétés physico-mécaniques...etc.) et de l'autre, on doit considérer le massif rocheux qui subit l'instabilité avec ces spécificités comme la structure géologique, les familles de discontinuités composant ce massif et leurs caractéristiques géomécaniques.

Pour cela on a abordé Les différents systèmes de classification qui sont généralement utilisées afin d'assigner une valeur numérique pour définir les caractéristiques et les propriétés du massif rocheux afin d'estimer le comportement de l'excavation et de permettre un design du support de terrain adéquat et sécuritaire.

La présente étude se propose d'étudier le massif rocheux du Djebel de Boukhadra (wilaya de Tébessa - Est Algérien) renfermant un grand gisement de Fer. De notre part nous nous intéressons au niveau 1105 (niveau intermédiaire entre le ciel ouvert et le souterrain, sur l'axe principale et l'axe sud-est de la carrière BK II à la mine de Boukhadra); ayant continuellement subi des problèmes de stabilité et de déformation et ceux à daté du 2009. De ce fait la caractérisation et la classification du massif rocheux de Boukhadra est indispensable afin de spécifié les zones à défaillance et stoppé les problèmes et risques stabilitaires encourus. Pour atteindre ces objectifs on a structuré notre travail de la manière suivante :

- ❖ Le premier chapitre est consacré à la présentation du comportement du massif rocheux ainsi que sa structure qui est affectée par les discontinuités.
- ❖ Le second chapitre consiste en une description des différents paramètres physiques et mécaniques des roches et leur procédure de détermination.

- ❖ Le troisième chapitre est réservé à la présentation des méthodes de classification empiriques des massifs rocheux les plus utilisées dans le domaine minier.

- ❖ Le quatrième chapitre intitulé la présentation de la mine de Boukhadra qui regroupe des informations d'ordre générale sur l'entreprise ArcelorMittal Boukhadra, ainsi que le mode de fonctionnement de la mine.

- ❖ Le dernier chapitre est consacré à la caractérisation et la classification géomécaniques du massif rocheux du Djebel de Boukhadra par des essais de résistances et l'application des méthodes empiriques (RQD, RMR, GSI.....) pour mieux caractérisé notre site d'étude.

Chapitre I

Structure et Comportement d'un massif rocheux

Chapitre I : structure et comportement d'un massif rocheux

I.1. Introduction

La limite qui différencie un sol d'une roche est assez étroite et complexe à la fois. En ce chapitre nous présentons brièvement les principales limites entre sol et roche. Mais notre intérêt se dirige vers le comportement des massifs rocheux dont la structure est affectée par des surfaces qui interrompent la continuité physique du milieu sain appelé discontinuités. De ce fait l'étude des discontinuités des massifs rocheux est indispensable pour la classification de ces massifs. Cette étude nécessite une analyse statistique pour pouvoir différencier toutes les familles de discontinuités qui affectent le massif. Chaque famille est alors analysée à part pour déterminer la distribution de ces différents paramètres géométriques.

I.2. Distinction sol/ roche

Un agrégat de grains minéraux qui peuvent être séparés par un moyen doux; comme l'agitation dans l'eau est un sol. Alors que les grains minéraux d'une roche sont liés par des forces de cohésion fortes et permanentes [6].

- Les sols comportent des matériaux granulaires non cimentés (donc meubles et sans cohésion et pratiquement pas de résistance à la compression simple) comme le sable et des matériaux argileux de faible cohésion [6].
- Les roches ont une forte cohésion et une résistance à la compression simple supérieure à 10 MPa, mais comporte généralement des surfaces de discontinuités donc la roche à l'échelle d'ingénierie est Discontinue, Inhomogène, Anisotrope, et Non-linéairement Elastique [6].

La mécanique des sols est la science qui étudie les sols ; la mécanique des roches c'est la discipline qui prend en considération les roches, ceci représente le cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols.

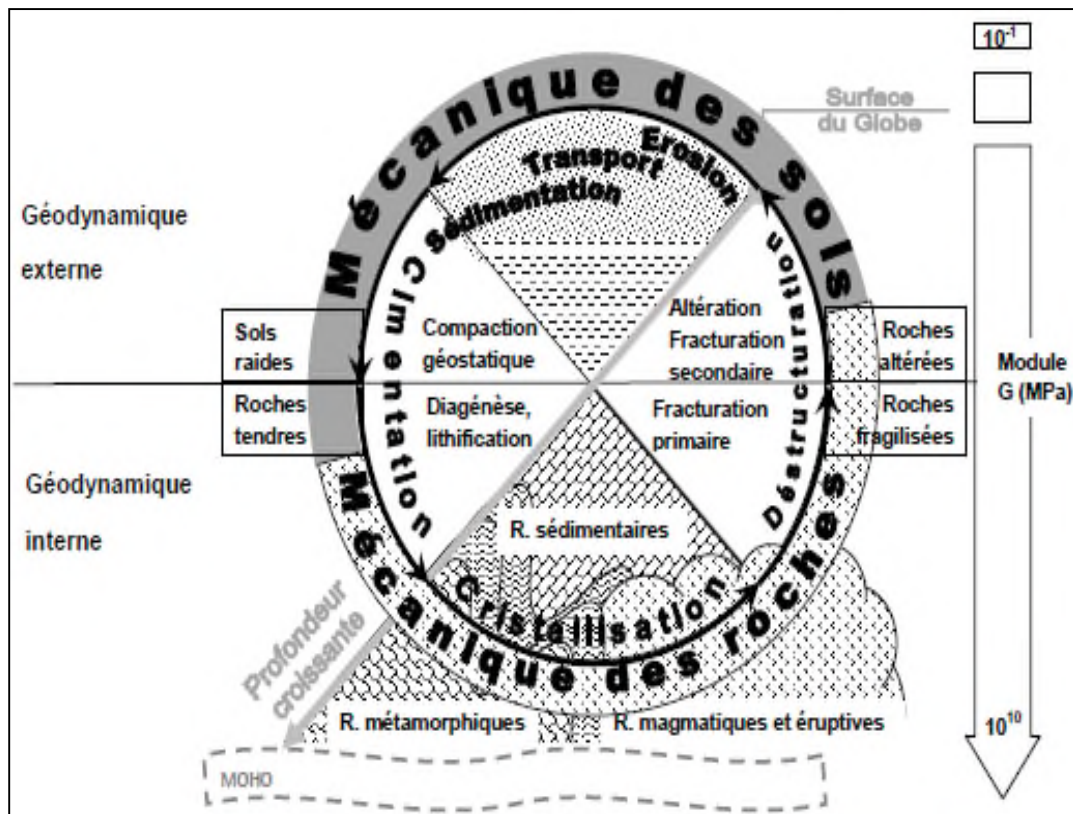


Figure I.1. Cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols [6].

I.3. Classification géologique des roches

Le nom d'une roche est donné en fonction de sa composition minéralogique, de sa texture et de son mode de formation. Ce dernier conduit à distinguer trois grandes familles de roches Selon l'AFTES [18]:

- Les roches magmatiques : résultent du refroidissement et de la solidification de magmas avec ou sans cristallisation. Elles peuvent être formées soit en profondeur, on a alors les roches plutoniques (granites par exemple), soit à la surface et on a alors les roches effusives (basaltes par exemple). Leur distinction se fait grâce à la taille des minéraux constitutifs : les roches plutoniques ont généralement un grain grossier et les effusives un grain fin.
- Les roches sédimentaires : sont formées par la décomposition (mécanique, chimique ou biologique) des matériaux suivie par leur dépôt en couches initialement proches de l'horizontale. Elles affleurent sur 75 % de la surface des continents mais avec des épaisseurs limitées. On peut citer ici les plus répandues comme les grès, les roches argileuses ou les roches carbonatées.

- Les roches métamorphiques : résultent de la recristallisation (accompagnée souvent de déformation) de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous l'effet de l'augmentation de la température et de la pression en profondeur (métamorphisme régional) ou au contact d'autres roches (métamorphisme de contact). Les plus communes sont les schistes et les gneiss où les minéraux apparaissent nettement orientés. Les marbres et les quartzites sont des roches massives, entièrement recristallisées, dans lesquelles l'orientation des minéraux (calcite ou quartz) n'est guère visible à l'œil nu.

I.4. Structure géométrique des massifs rocheux

I.4.1. Description des massifs rocheux

Formés d'une juxtaposition de matériaux hétérogènes, les massifs rocheux sont des structures très complexes. Ils sont assimilés à un assemblage de blocs appelés matrice rocheuse lesquels sont délimités par des discontinuités constituées de fissures, de fractures ou de failles ou encore de limites stratigraphiques [8].



Figure I.2. Structure géométrique d'un massif rocheux de calcaire au Nord du Liban [8].

Le comportement mécanique des massifs rocheux est un facteur déterminant dans le dimensionnement des ouvrages qui y sont exécutés. Afin de comprendre, expliquer et modéliser ce comportement, il est nécessaire de connaître la structure géométrique ou plus précisément le modèle de distribution géométrique des fractures, ainsi que les propriétés mécaniques de chacune des composantes que sont la matrice rocheuse et les discontinuités [8].

I.4.2. Aspect géologique

Afin d'étudier le comportement mécanique d'un massif rocheux, il est essentiel de connaître le degré de fracturation ainsi que la répartition des discontinuités dans l'espace. Pour un ensemble de massifs rocheux, les discontinuités constituent une superposition de différentes familles de fractures, disposant chacune de lois de distribution et des caractères statistiques différents. Ces derniers sont souvent déterminés par le biais de la méthode de projection stéréographique [8].

Divers auteurs ont essayé de regrouper les structures géométriques des massifs rocheux dans des catégories bien définies. Cela est illustré dans la figure I.3 pour une série de massifs rocheux. Nous distinguons les massifs à blocs polyédriques, équidimensionnels, prismatiques ou en colonnes, les massifs à bancs minces dont l'épaisseur est moins épaisse que la longueur et les massifs comprenant plusieurs familles de fractures [8].

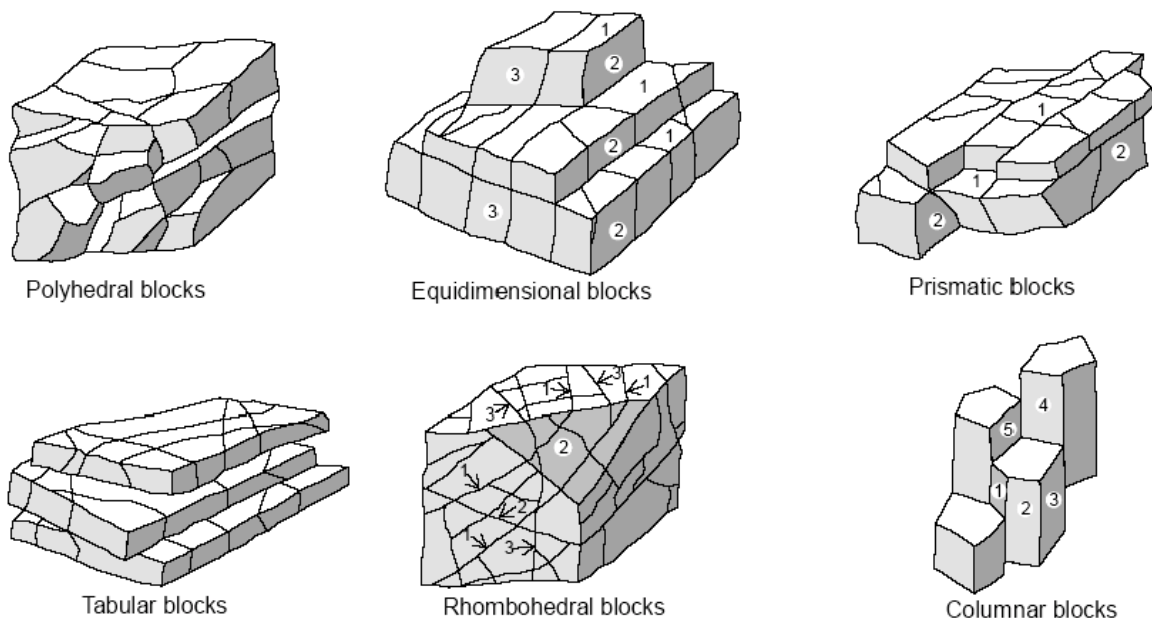


Figure I.3. Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés [8].

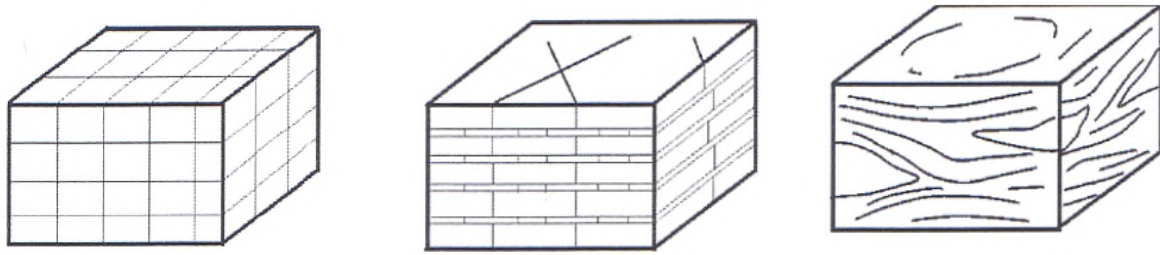
Le Manuel de Mécanique de Roche (CFMR-MMR [2000]) vient appuyer dans ce sens la définition des divers types déjà cités ci-dessous. Parmi plusieurs variantes plus complexes mais moins significatives, trois modèles géométriques principaux sont illustrés dans la figure I.4. [8].

Certains granites ou calcaire massifs formés de blocs parallélépipédiques (Figure I.4-a), révèlent la présence de trois familles de fractures trirectangulaires pour lesquelles tous les plans de discontinuités sont continus.

Toutefois, il faut noter que cette forme géométrique est très idéalisée. Des solutions analytiques existent déjà pour le calcul des propriétés mécaniques de tels massifs dont certaines seront présentées dans le chapitre suivant.

Le schéma de la Figure I.4-b représente un massif sédimentaire dont l'une des directions prend davantage d'importance et les diaclases perpendiculaires sont moins continues. Cette définition peut correspondre à des calcaires à bancs minces, des alternances de marnes et de calcaires, de grès et de marnes des formations appelées flyschs ou des roches schisteuses. Les observations montrent que l'espacement entre les bandes est souvent équivalent à la taille des diaclases ou à sa moitié. Ces types de massifs sont très courants mais non accessibles à des traitements analytiques simples ; le recours à des méthodes d'homogénéisation numériques nous semble très pertinent. La structure de ces massifs est définie géométriquement par un nombre limité de paramètres que nous préciserons dans le paragraphe suivant.

Souvent situées dans des zones tectoniques, les roches écrasées comme les schistes et les brèches de faille présentent une direction d'anisotropie largement dispersée. Dans un tel type de massif (Figure I.4-c), la précision d'un nombre bien défini de familles de fractures n'est pas évidente. Toutefois, des méthodes empiriques approximatives permettent le calcul de leurs propriétés mécaniques.



a- Roche massive à trois familles grossièrement équivalentes

b- Massif rocheux stratifié ou schisteux à une famille prépondérante

c- Roche écrasée ou schiste froissé où la famille prépondérante est largement dispersée

Figure I.4. Types de structures des massifs rocheux [8].

I.4.3. Description des discontinuités

On définit une discontinuité dans un massif rocheux par une surface qui interrompt la continuité physique du milieu sain [1]. L'identification géologique, géométrique et mécanique des discontinuités, à toutes les échelles est indispensable dans l'étude de comportement du massif.

Elle nécessite une analyse statistique, pour pouvoir différencier toutes les familles de discontinuités qui affectent le massif. Chaque famille est alors analysée à part pour déterminer la distribution des différents paramètres géométriques.

I.4.3.1. Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux

- De couper la roche en plaques, blocs et coins (libres de tomber et de bouger) ;
- D'agir comme plan de faiblesse pour le glissement ;
- De faciliter l'écoulement d'eau et créer des réseaux d'écoulement ;
- D'entraîner de grandes déformations ;
- De changer la distribution et l'orientation des contraintes [22].

I.4.3.2. Les familles des discontinuités

On distingue généralement :

- a. **Les joints stratigraphiques** : ils marquent une discontinuité dans le phénomène de sédimentation des formations sédimentaires. Ils présentent une forte extension et souvent une faible ondulation [1].



Figure I.5. Les joints stratigraphiques [22].

- b. **Les diaclases**: elles sont souvent perpendiculaires ou obliques aux joints de stratifications ou à la schistosité. Elles ne présentent pas de trace de mouvement et elles ont une extension limitée [1].



Figure I.6. Les diaclases [18].

- c. **Les fentes ou fractures d'extension** : elles sont formées sous l'effet d'une traction qu'a subi le massif au cours des mouvements tectoniques. Elles sont souvent remplies de cristallisation de calcite ou de quartz [1].
- d. **Les failles** : elles résultent de la rupture d'une zone du massif qui a subi un grand effort de cisaillement. Elles représentent ainsi des discontinuités séparant deux grandes entités du massif. Elles sont caractérisées par une grande extension et souvent un remplissage de matériau broyé et altéré, parfois des recristallisations [1].



Figure I.7. Les failles [18].

- e. **les plis** : les plis sont le résultat de la flexion d'une strate rocheuse sous l'effet d'une force tectonique ou d'un mouvement.
Les plis ne sont généralement pas considérés comme éléments du massif rocheux. Ils sont souvent associés à un haut degré de fracturation et à des roches relativement faibles et tendres [22].



Figure I.8. Les plis [22].

- f. la schistosité :** La schistosité dans les roches métamorphiques, la forte compression a perturbé et transformé l'organisation des minéraux internes. Ceux-ci se sont alignés selon une direction orthogonale à la compression et ont entraîné la formation de plans de rupture préférentiels. L'ardoise, qui est fendue selon cette schistosité, en est une bonne illustration [16].



Figure I.9. La schistosité [18].

I.4.3.3. Les caractéristiques géométriques des discontinuités

Les caractéristiques géométriques les plus importantes des discontinuités, qui ont une influence sur le comportement du massif rocheux. Ont été présentées telles que :

- a. orientation :** La position du plan de discontinuité est décrite par son orientation dans l'espace muni d'un repère ayant un axe parallèle au Nord magnétique.

L'orientation est représentée par la direction de la ligne d'intersection du plan de discontinuité et du plan horizontal, et par le sens et l'angle de pendage de la ligne de plus grande pente [1].

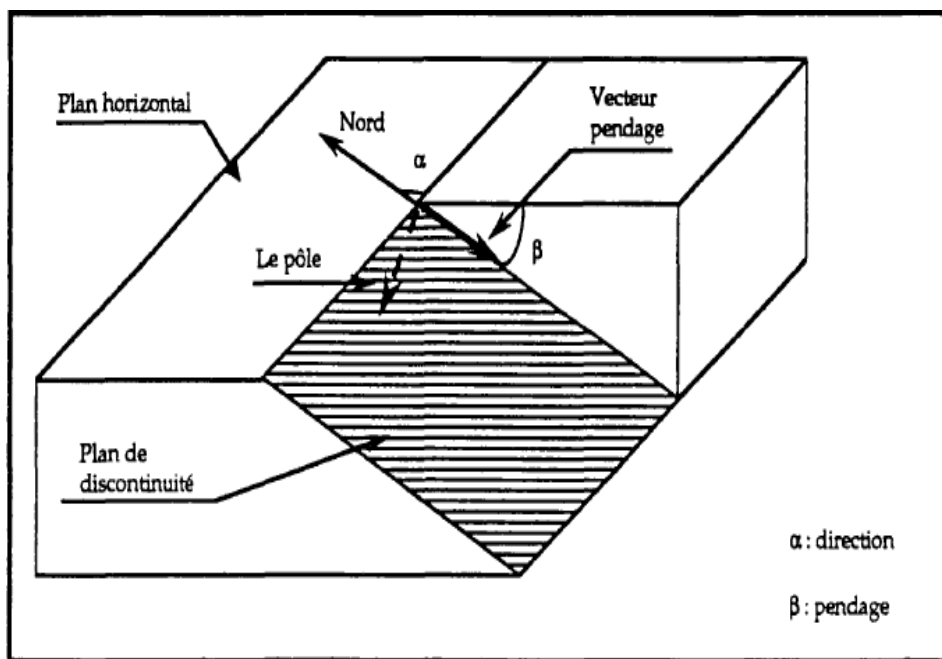


Figure I.10. Orientation d'un plan de discontinuité [1].

On représente aussi une discontinuité par:

- le vecteur pendage : qui matérialise la ligne de plus grande pente du plan de discontinuité. Il est défini par l'azimut de sa trace sur le plan horizontal et son pendage ;
- le vecteur perpendiculaire au plan de discontinuité [1].

La projection stéréographique des discontinuités permet de faire un classement des discontinuités en familles directionnelles. La représentation des plans se fait habituellement en utilisant les diagrammes polaires.

On considère une sphère dont un diamètre du plan équatorial est la direction du plan considéré et l'autre diamètre est orienté Nord - Sud.

Sur l'hémisphère inférieur, se trace le grand cercle, intersection du plan avec la surface hémisphérique, et le pôle du plan, c'est-à-dire le point de percée sur l'hémisphère de la normale au plan passant par le centre de la sphère.

Pour effectuer les projections, on peut utiliser le canevas de Wulf (qui correspond à la projection stéréographique). Mais en général, on utilise le canevas de Schmidt (Lambert) qui est une projection équilatérale et qui n'introduit donc pas de distorsion quant à la densité des pôles.

La notation "classique" donnant l'azimut de la direction en degrés (chiffre <180) et le secteur (N, E, S ou O) vers lequel "pend" le plan.

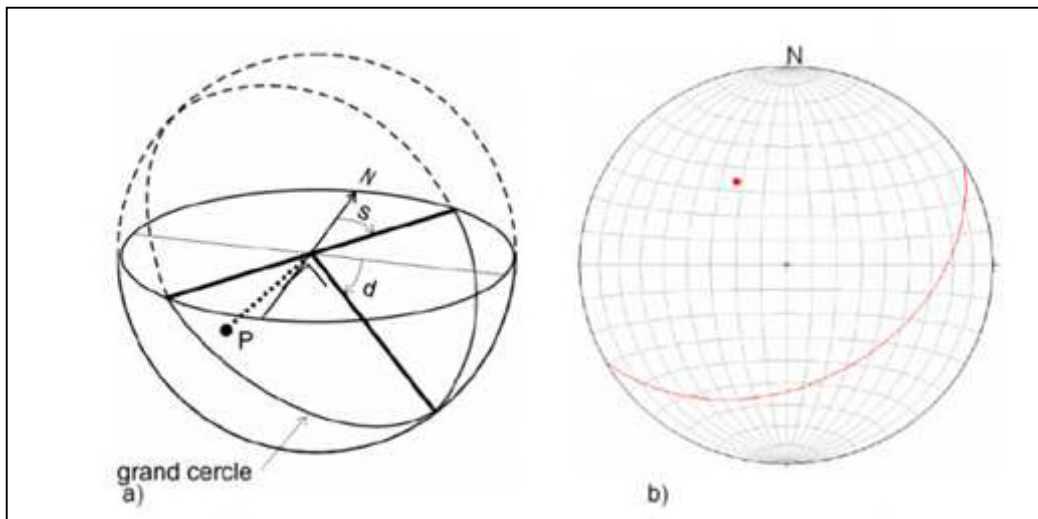


Figure I.11. Représentation stéréographique [17].

a) : direction (S), pendage (d), grand cercle et pôle (P) ;

b) : canevas de Schmidt. Sur le plan équatorial figurent les projections des grands cercles et des petits cercles tracés sur l'hémisphère inférieur.

La représentation stéréographique des failles nous aide à déterminer les contraintes principales agissant sur le massif qui peuvent provoquer la rupture de ce dernier.

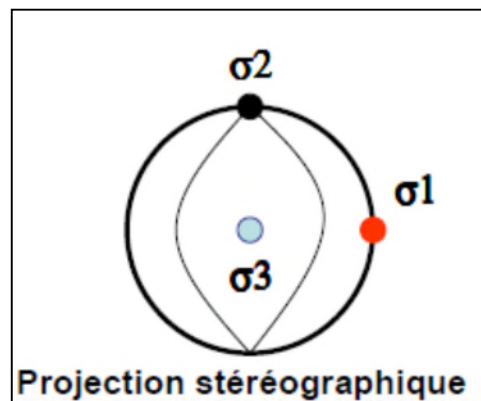
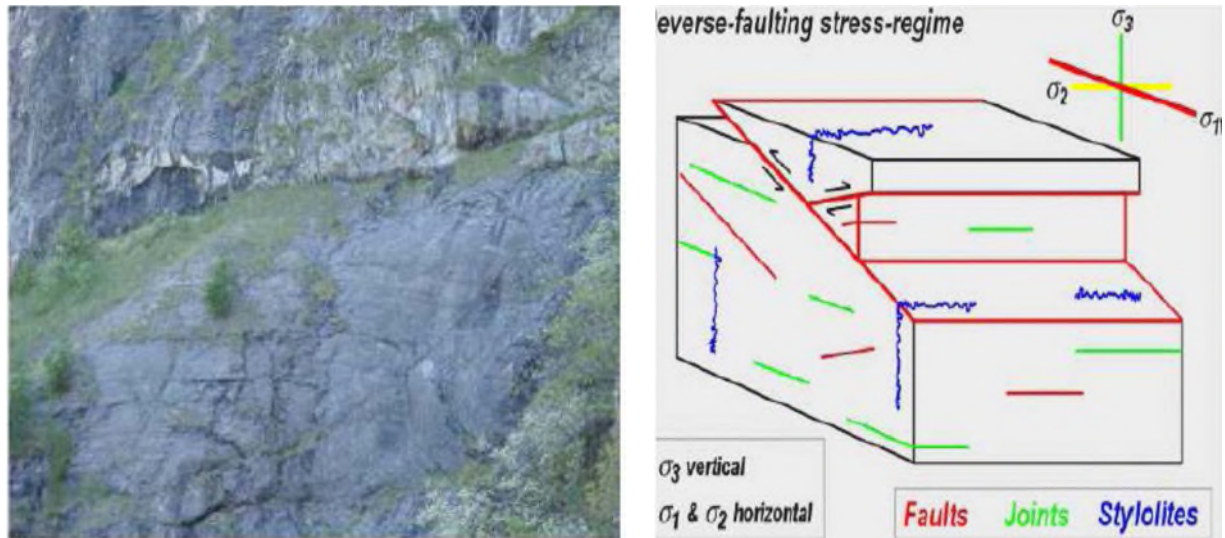


Figure I.12. Projection stéréographique d'une faille inverse [4].

La détermination des contraintes verticale σ_3 et horizontales σ_1 et σ_2 suite à cette projection stéréographique des failles permettra d'avoir la contrainte normale ainsi qu'à la résistance au cisaillement afin de tracer le cercle de Mohr qui donne l'angle de frottement interne Φ , la cohésion C et le domaine de rupture du massif [4].

- b. Extension :** L'extension caractérise la dimension de la discontinuité dans l'espace. Ce paramètre est difficile à évaluer car sur le terrain on n'observe pas la totalité de la discontinuité mais uniquement sa trace sur un parement [1].

L'extension peut être estimée à partir de la distribution de la longueur de trace de la discontinuité.

La distribution de la longueur de trace peut suivre une loi exponentielle ou log-normale.

- c. Espacement et densité** : L'espacement représente la distance moyenne séparant deux discontinuités d'une même famille. La densité définit le nombre de discontinuités, d'une même famille, par unité de volume ou de surface ou de longueur.

Ces paramètres sont liés souvent, la densité est estimée à partir de l'espacement puisque ce dernier est facile à mesurer en pratique.

Ces paramètres sont essentiels car ils donnent une idée de la fracturation moyenne du massif et de la blocométrie in-situ du massif. La distribution de l'espacement est souvent exponentielle [1].

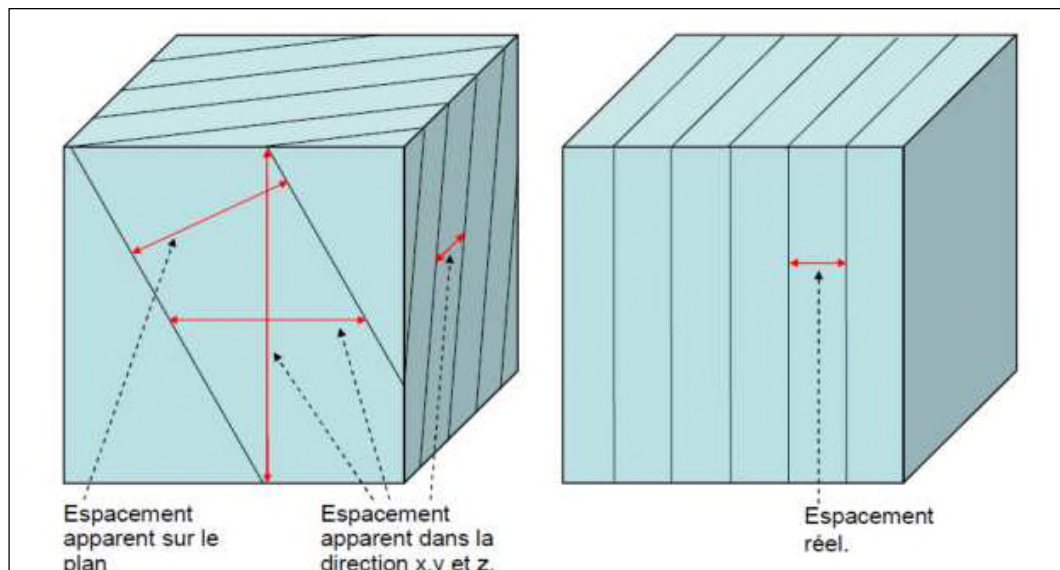


Figure I.13. Mesure de l'espacement [20].

On décrit l'espacement selon les mesures des discontinuités :

Tableau I.1. Description de l'espacement des discontinuités [20].

Espacement des discontinuités (m)	Description
<0,02	Espacement extrêmement étroit
0,02-0,06	Espacement très étroit
0,06-0,2	Espacement étroit
0,2-0,6	Espacement modéré
0,6-2	Espacement large
2-6	Espacement très large
>6	Espacement extrêmement large

- d. La fréquence des discontinuités (λ)** : Déterminée par comptage sur le terrain, par exemple en mesurant l'espacement des discontinuités le long d'une ou de plusieurs

lignes tracées perpendiculairement à leur direction ou selon des lignes traversant au mieux (statistiquement) les différentes familles de joints [13].

Si, le long de la ligne du levé, N est le nombre de discontinuités et L la longueur du levé, la fréquence (λ) des discontinuités vaut $\lambda = N/L$ et l'espacement moyen (x) vaut $X = L/N$. On déduit que la fréquence est simplement l'inverse de l'espacement moyen des discontinuités. La fréquence et l'espacement moyen dépendent de l'orientation de la ligne de levé par rapport à celle des discontinuités [13].

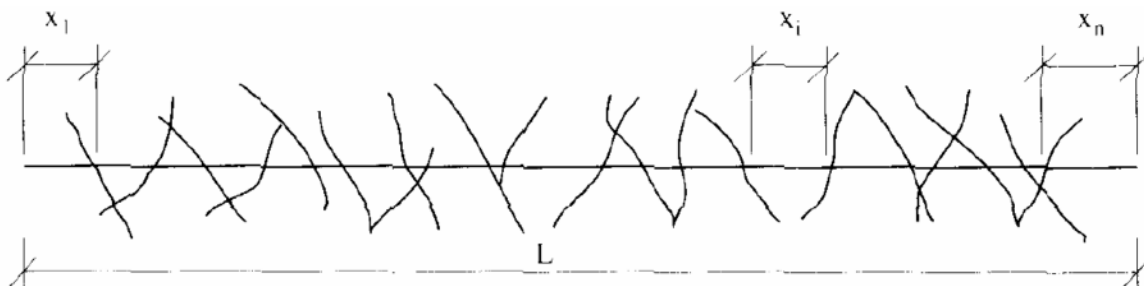


Figure I.14. Mesure de la fréquence des discontinuités [13].

- e. **Degré de fracturation:** lorsque des forages carottés sont disponibles, cette qualité est désignée par RQD (Rock Quality Designation) (Deere, 1988). Cet indice est égal au rapport de la somme des longueurs des éléments de carottes du forage dont la longueur est au moins égale à 10 cm à la longueur totale de la passe carottée.
- f. **La rugosité :** Elle correspond à la forme de la surface de discontinuité d'un ensemble individuel à petite échelle. Elle doit être évaluée sur la base des critères visuel et sensoriel. Pour décrire la rugosité [5], il convient d'utiliser les termes suivants:
- **Très rugueuse :** la surface est très rugueuse et présente d'importantes aspérités visuelles, semblables à du gravier fin ou de calibre moyen.
 - **Rugueuse :** lorsqu'on passe la frôle du doigt, la surface est rugueuse comme du papier de verre à gros grain. Les aspérités peuvent être visuelles.
 - **Légèrement rugueuse :** la surface est rugueuse comme du papier de verre à grain plus fin. Les aspérités ne sont pas visibles à l'œil nu.
 - **Lisse :** la surface est plutôt lisse, comme du papier.
 - **Miroir de faille :** la surface est très lisse, voire polie, et présente une striation due à un déplacement en cisaillement.

Un coefficient de rugosité du joint (JRC) peut être adapté : il va de 0, pour une surface plane et lisse, à 20, pour une surface très rugueuse.

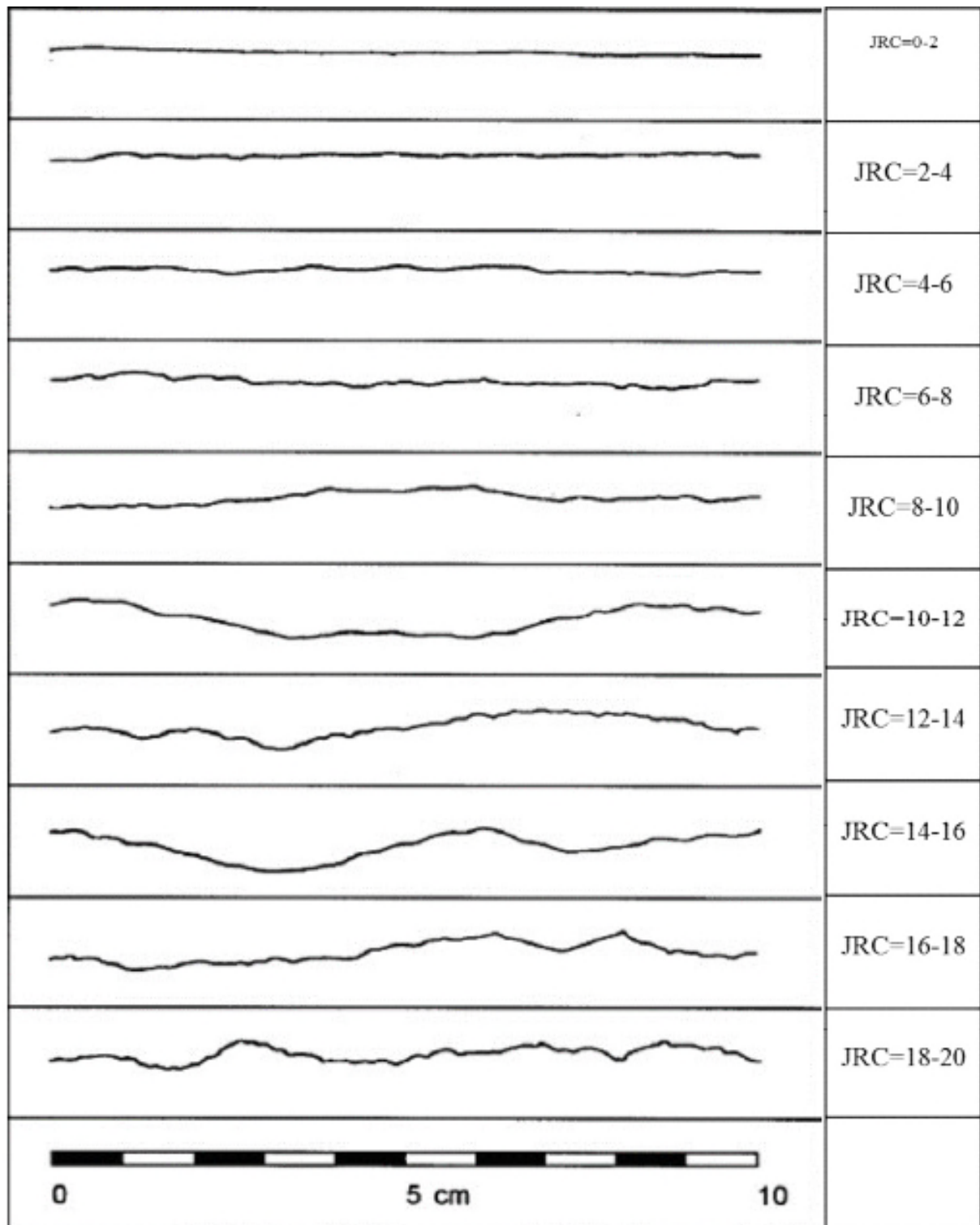


Figure I.15. Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC) [5].

g. La persistance : La persistance est l'extension spatiale où la longueur d'une discontinuité peut être directement mesurée en observant les longueurs des traces des discontinuités sur les affleurements [20].

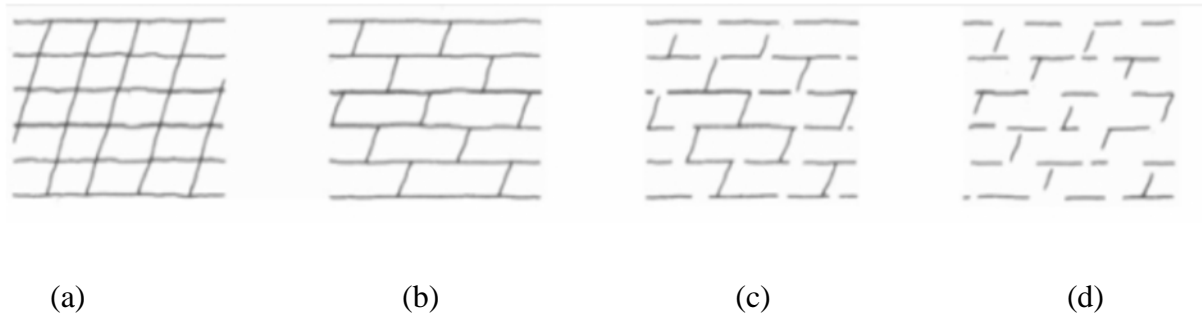


Figure I.16. Persistence de différents ensembles de fractures [20].

- (a): Deux ensembles de diaclases persistants avec persistance élevée ;
 (b): Un ensemble de diaclases avec persistance élevée + un ensemble de diaclases discontinues avec persistance moyenne ;
 (c) : Deux ensembles de diaclases discontinus avec persistance moyenne ;
 (d) : Deux ensembles de diaclases discontinus avec faible persistance.

On classe les persistance des discontinuités selon la longueur de leurs traces :

Tableau I.2. Classification des discontinuités selon leur extension [20].

Persistance	Longueur de la trace (m)
Persistance très faible	<1
Persistance faible	1-3
Persistance moyenne	3-10
Persistance élevée	10-20
Persistance très élevée	> 20

h. Ouverture et matériaux de remplissage : Il est très rare que les deux surfaces d'une discontinuité soient en contact, généralement il existe un espace entre elles appelé ouverture qu'elle soit remplie d'air, d'eau (joint ouvert) ou avec des matériaux de remplissage [20].

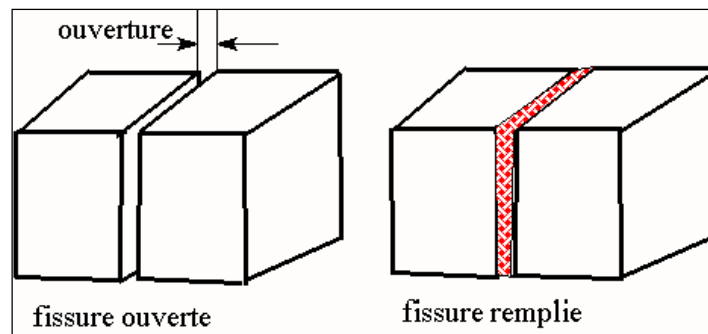


Figure I.17. Fissure ouverte et remplie [7].

En général, les propriétés du matériel de remplissage affectent la résistance au cisaillement, la déformabilité et la perméabilité des discontinuités. On peut distinguer :

- Matériaux tendres : qui peuvent être rayés à l'ongle ou essuyés à la main (argile, sable);
- Matériaux durs : qui ne peuvent être rayés à l'ongle (minéraux comme la calcite, le quartz, etc.).

En fonction de la taille d'ouverture on peut classer les discontinuités dans le tableau suivant :

Tableau I.3. Classification d'ouverture des discontinuités [20].

Ouverture	Description
<0,1 millimètre	Très étroite
0,1-0,25 millimètre	Etroite
0,25-0,5 millimètre	Partiellement ouvert
0,5-2,5 millimètre	Ouvert
2,5-10 millimètre	Largement ouvert
1-10 centimètre	Très largement ouvert
10-100 centimètre	Extrêmement ouvert
>1 mètre	Caverneux

I.5. Conclusion

Les massifs rocheux sont présentés comme un milieu discontinu, composé de discontinuités et de la matrice rocheuse.

La présence des discontinuités peut avoir une grande influence sur le comportement et la structure du massif.

L'étude des massifs rocheux ne sont donc pas seulement basée sur la caractérisation de la roche saine, mais on doit se basé sur la caractérisation géométrique des discontinuités.

Chapitre II
Les Propriétés physico-mécaniques
des roches

CHAPITRE II : Propriétés physico-mécaniques des roches

II.1. Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à la description des différents paramètres physiques et mécaniques des roches et leur procédure de détermination.

Parmi les propriétés physiques les plus importantes: la porosité et la masse volumique, la teneur en eau, le degré de saturation, le degré de fissuration, la dureté ainsi que l'abrasivité, l'altérabilité.....etc.

Les propriétés mécaniques de résistance à savoir sont : la résistance à la compression, la résistance à la traction et la résistance au cisaillement, d'autres propriétés mécaniques aussi importantes sont : l'angle de frottement interne et la cohésion.

II.2. Les propriétés physiques des roches

II.2.1. La porosité

Dans les roches la matière minérale forme un squelette solide qui ne remplit pas tout l'espace, et dont le complément est appelé vide. La proportion de vide est appelée porosité. La forme des vides, leur taille, leur répartition, leurs liaisons ou au contraire l'isolement de certains, influent sur le comportement mécanique du massif rocheux [11].

C'est le rapport du volume des vides V_v de la roche au volume total V_t :

$$P = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

La porosité varie de quelque % à plus de 40 % dans les roches sédimentaires, dans les roches magmatiques, elle est plus faible, souvent inférieure à 1 %.

Selon la porosité, les roches sont classées en[9]:

- Roches de faible porosité : $0 < p < 5$ %
- Roches de porosité moyenne : $5 < p < 10$ %
- Roches de porosité élevée : $10 < p < 20$ %
- Roches de grande porosité : $p > 20$ %

II.2.2. La masse volumique

C'est la masse de l'unité de volume de la roche (g/cm^3). Suivant l'état du matériau, on définit: ρ_s la masse volumique absolue ou masse volumique du solide, ρ_h la masse volumique naturelle, ρ_d la masse volumique sèche et ρ_{sat} la masse volumique saturée [11].

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{II.2})$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad (\text{II.3})$$

$$\rho_h = \frac{M_h}{V_t} \quad (\text{II.4})$$

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{M_{\text{sat}}}{V_t} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

M_s la masse du matériau sec; g

V_s le volume des grains après broyage; cm^3

V_t le volume de l'échantillon; cm^3

M_h la masse naturelle; g

M_{Sat} la masse de l'échantillon saturée; g

ρ_d dépend de la porosité de la roche, par contre ρ_s ne dépend que de la minéralogie.

II.2.3. La teneur en eau

C'est le rapport de la masse d'eau M_w , à la masse du solide sec [4].

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \quad (\text{II.6})$$

II.2.4. Le degré de saturation

C'est le rapport du volume de l'eau contenue dans l'échantillon au volume des vides [4].

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (\text{II.7})$$

V_w : volume de l'eau dans l'échantillon, cm^3

V_v : volume des vides, cm^3

II.2.5. Le degré de fissuration des roches

La fissuration du massif rocheux influe sur les propriétés mécaniques du massif et sur la stabilité des talus. C'est le facteur le plus important qui caractérise les roches et les sols.

Il permet de choisir la méthode d'exploitation et de résoudre le problème de la stabilité des bords de la carrière [16].

Le coefficient de fissuration est égal à la distance moyenne entre les fissures :

$$I_d = \frac{L}{m} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

L : longueur de la partie étudiée du massif (en mètre) ;

m : nombre de fissures sur la partie mesurée.

La classification des discontinuités selon les valeurs de I_D est donnée dans le tableau suivant :

Tableau II.1. Classification des discontinuités selon les valeurs d' I_D [16].

Classe	Intervalle moyen entre discontinuités I_D (cm)	Densité des discontinuités
I_{D1}	>200	Très faible
I_{D2}	60 à 200	Faible
I_{D3}	20 à 60	Moyenne
I_{D4}	6 à 20	Forte
I_{D5}	<6	Très forte

II.2.6. La dureté

La dureté d'un minéral est due à la structure du cristal lui-même : comment les atomes qui le forment, à l'échelle microscopique, sont organisés. Plus ces atomes sont liés fortement entre eux, plus le minéral sera dur. C'est donc une propriété propre au minéral, et elle permet de le reconnaître. Certains minéraux peuvent changer de couleur, mais pas de dureté. La mesure de la dureté permet donc de reconnaître un minéral.

Si un minéral raye un minéral, c'est forcément que le premier minéral soit plus dur que le second[4].

Le scientifique, Friedrich Mohs, a eu l'idée de choisir dix minéraux, et de les classer du plus tendre au plus dur ; ils sont numérotés de 1 à 10, et servent d'échelle : c'est ce que l'on appelle l'échelle de Mohs:

Tableau II.2. Echelle de dureté de Mohs[4].

Minérale	Dureté	Minérale	Dureté
Talc	1	Orthose	6
Gypse	2	Quartz	7
Calcite	3	Topaze	8
Fluorine	4	Corindon	9
Apatite	5	Diamant	10

II.2.7. l'abrasivité

L'abrasivité caractérise la capacité d'une roche à provoquer l'usure d'un outil tel que pièce de concasseur, taillant de forage, molette ou pic de machine foreuse. Cette propriété est importante pour les travaux d'exploitation des matériaux rocheux, en souterrain comme à ciel

ouvert. Elle dépend à la fois de la teneur en minéraux durs (quartz notamment) et de la résistance de l'assemblage des grains (cohésion de la roche) [4].

Tableau II.3. Durée de vie (mesurée en mètre foré) d'un taillant de forage en fonction de l'abrasivité des roches.

Taillant de forage	Longueur forée (m)	
	Roche abrasive	Roche peu abrasive
Taillant fileté à picots ≥ 64 mm ou taillant fond de trou à picots	400 à 1000	1200 à 2500
Taillant fileté à plaquettes	200 à 400	800 à 1000
Fleuret monobloc	150 à 200	600 à 800

II.2.8. L'altérabilité

On appelle altérabilité la sensibilité d'une roche aux modifications du milieu environnant. L'altération physico-chimique traduit la capacité de gonflement, de délitage ou de dissolution d'une roche. Divers essais existent pour quantifier l'altérabilité d'une roche ; aucun cependant ne s'est véritablement imposé [4].

II.3. Les propriétés mécaniques des roches

II.3.1. Définition de la rupture

La résistance au cisaillement d'un sol est la résistance interne par unité de surface qu'un sol peut offrir pour résister à une rupture ou à un cisaillement le long d'un plan.

La contrainte appliquée qui peut causer la rupture doit être déterminée et elle est située sur un plan critique donné → Cercle de Mohr [4].

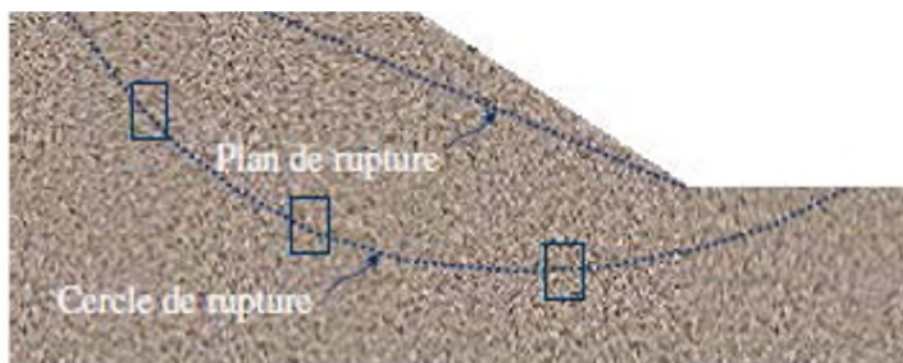


Figure II.1. Rupture d'un sol [4].

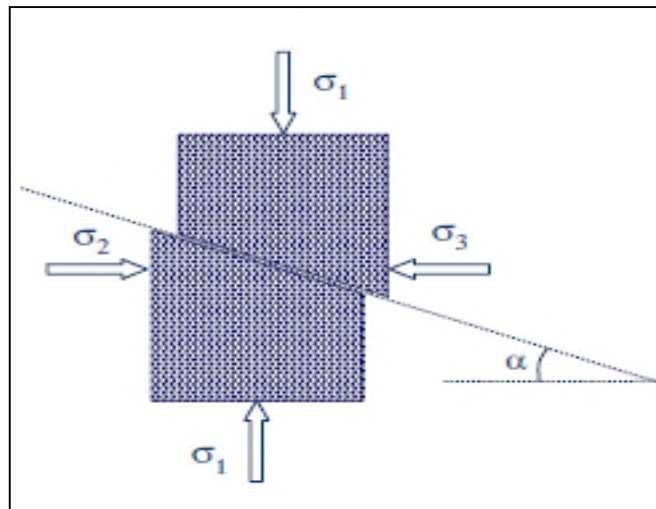


Figure II.2. Les contraintes provoquant la rupture[4].

II.3.2. Critère de Mohr Coulomb et le module de Young

En ce qui concerne le critère de rupture Mohr coulomb :

Le cercle de Mohr est une représentation graphique des états de contrainte à deux dimensions, proposée par l'ingénieur allemand Christian Otto Mohr en 1882.

Pour des échantillons d'une même roche, on fait varier expérimentalement σ_1 et σ_3 ; on note les valeurs provoquant la rupture et l'angle de rupture correspondant. La représentation graphique dite du Cercle de Mohr situe le domaine de la rupture par rapport aux valeurs des contraintes σ_1 , σ_3 et à la contrainte tangentielle τ exercée sur le plan de rupture. Par convention, on prend des valeurs négatives de σ_3 dans le cas de la traction. Le cercle de Mohr permet donc de prévoir la résistance à la rupture d'un matériau, les conditions limites de la rupture et l'angle de rupture correspondant pour des valeurs données de σ_1 , σ_3 et τ [4].

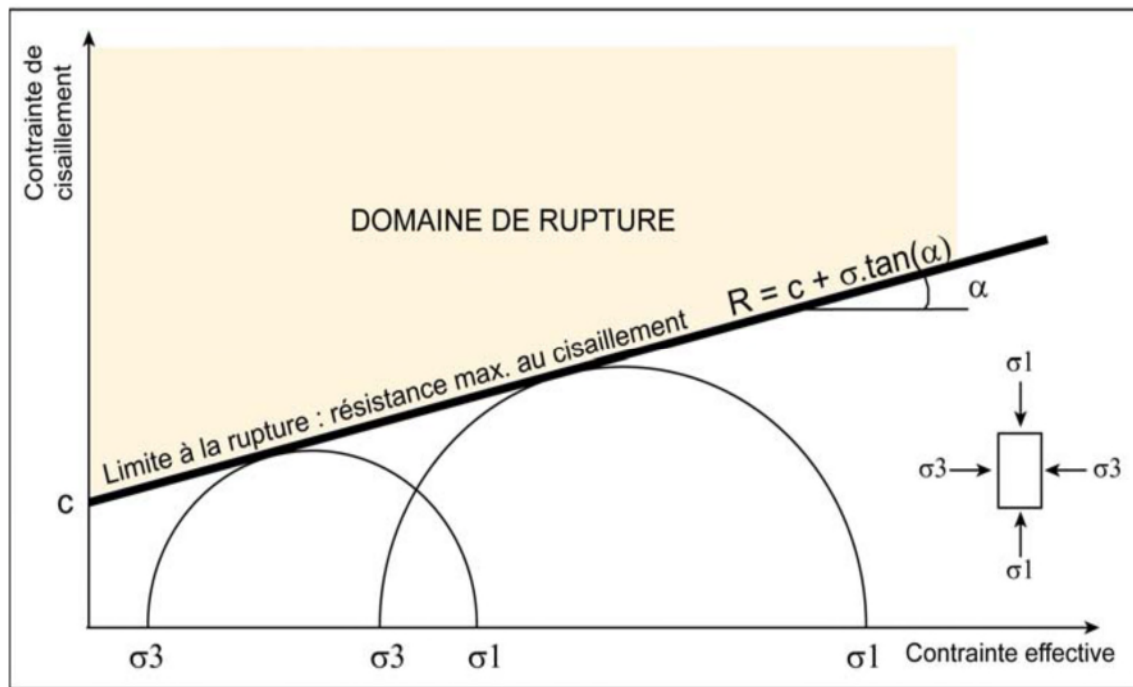


Figure II.3. Représentation de la droite de Mohr-Coulomb [4].

➤ Commentaires sur le critère de Mohr-Coulomb

Le critère de Mohr-Coulomb n'est valable que pour le domaine des confinements faibles. A un haut niveau de confinement, il surestime la résistance. Il surestime aussi la résistance à la traction. Dans la plus part des cas, la mécanique des roches traite des problèmes superficiels et de faible confinement, aussi ce critère est largement employé, grâce à sa simplicité et son succès [19].

Quand au module de Young :

Le physicien britannique Thomas Young (1773-1829) avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte [4].

La loi d'élasticité est la loi de Hooke: $\sigma = E \cdot \epsilon$.

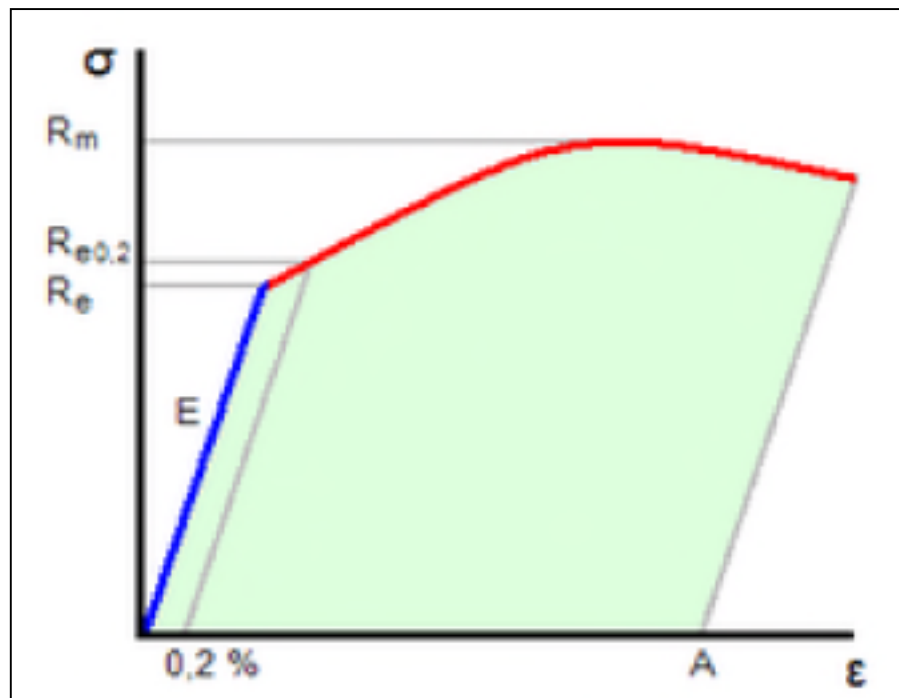


Figure II.4.Diagramme contrainte-déformation [4].

Où :

- σ est la contrainte (en unité de pression).
- E est le module de Young(en unité de pression).
- ϵ est l'allongement relatif, ou déformation (adimensionnel).

Le module de Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau (il doublerait donc de longueur), si l'on pouvait l'appliquer réellement : dans les faits, le matériau se déforme de façon permanente, ou se rompt, bien avant que cette valeur soit atteinte.

II.3.3. Le Critère de Hoek et Brown

Lorsqu'on étudie un massif rocheux fracturé, on se rend compte assez rapidement des limitations imposées par les modèles du type linéaire Mohr-Coulomb. En effet, les tests effectués en laboratoire (essais de résistance, détermination des paramètres mécaniques) permettent en général de dresser un profil de résistance de la matrice rocheuse, qui ne correspond pas à celui du massif rocheux in situ.

Pour rendre compte du comportement réel du massif rocheux, il est donc nécessaire d'inclure aux modèles constitutifs l'influence des discontinuités, la fracturation interne ayant un effet notable sur la réponse mécanique des matériaux. Hoek et Brown (1980) ont proposé une technique permettant d'obtenir une estimation de la résistance mécanique pour des roches

fracturées, basée sur une évaluation de l'assemblage et des conditions de surface entre les blocs rocheux. Conçu initialement pour l'étude des milieux rocheux moyennement à fortement fracturés, le critère non linéaire (purement empirique) de Hoek-Brown est sensé décrire une grande variété de roches et massifs rocheux. Du fait de l'absence d'autres alternatives dans l'étude des milieux rocheux fracturés, ce critère a été fréquemment utilisé et il a été révisé à plusieurs reprises afin de pouvoir accroître son domaine d'application. Désormais, le critère de rupture généralisé de Hoek-Brown (1994) permet de décrire le comportement des roches de très mauvaise qualité, qui pourraient presque être classées en tant que sols.

Le principe de ce critère de rupture est dans le fait que la contrainte de cisaillement tangentielle τ appliquée sur une facette augmente moins vite avec la contrainte normale σ_N qu'avec le critère habituel de Mohr-Coulomb [4].

$$\tau = A. Rc \left(\frac{\sigma_N}{Rc} - T \right)^B \quad (\text{II.9})$$

A et B sont des constantes qui définissent la forme de l'enveloppe dans le plan de Mohr.

Rc est la résistance à la compression uniaxiale de la roche.

T est la résistance au cisaillement.

σ_N est la contrainte normale.

T est lié au massif rocheux et qui se calcule par la formule suivante :

$$T = 1/2 (m - \sqrt{m^2 - 4s}) \quad (\text{II.10})$$

Où m est un paramètre de forme, s le coefficient de fracturation.

➤ Commentaires sur le critère de Hoek-Brown

C'est un critère empirique basé sur des résultats réels d'essais obtenus sur diverses roches.

L'emploi et le choix des paramètres est très facile. Il peut être étendu aux massifs rocheux. Il est employé couramment en mécanique des roches et dans le dimensionnement des ouvrages.

L'enveloppe de résistance de Hoek-Brown n'est pas une ligne droite. C'est une courbe. A haut niveau de contrainte, l'enveloppe s'incurve vers le bas, et donne ainsi une évaluation de résistance inférieure à celle de l'enveloppe de Mohr-Coulomb [19].

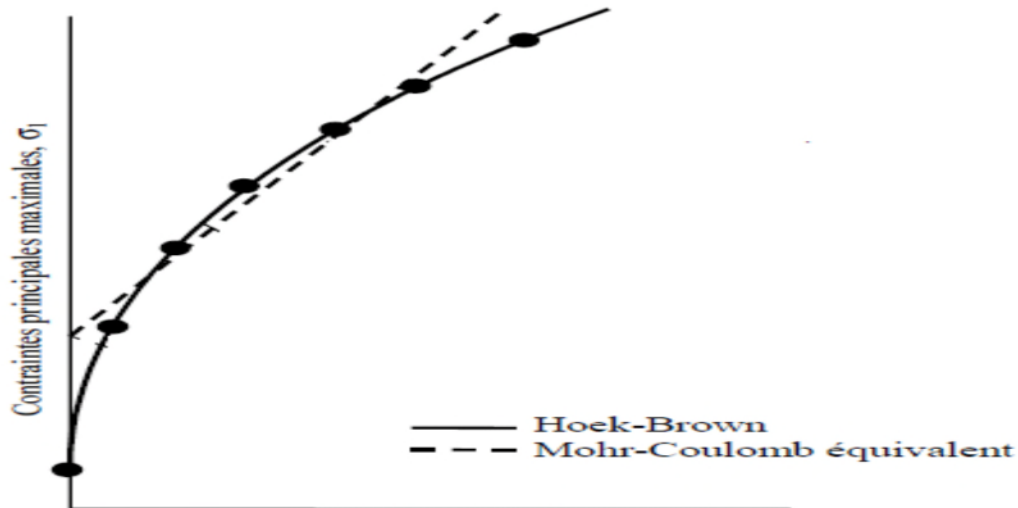


Figure II.5. Ajustement du critère linéaire de Mohr-Coulomb au critère non-linéaire de Hoek-Brown, d'après Hoek et Brown [4].

II.3.4. La résistance à la compression (R_c)

Elle est déterminée lors des essais de compression simple. Dans cet essai, l'échantillon est pris sous la forme d'une carotte (éprouvette cylindrique), d'élanement L/D (L : hauteur, D : diamètre) compris entre 2 à 2,5 avec deux faces planes, lisses et parallèles obtenues par une rectification soignée. L'échantillon est ensuite placé entre les plateaux d'une presse. On appelle résistance à la compression (notée R_c) la contrainte maximale supportée par l'échantillon avant la rupture lors d'un essai de compression [9]. Elle est donnée par la formule suivante:

$$R_c = \frac{F}{S} \quad \text{MPa} \quad (\text{II.11})$$

F : effort (charge) maximale atteinte (juste avant la rupture) ;

S : section ou surface sur laquelle on applique l'effort F .



Figure II.6. Dispositif expérimental [4].

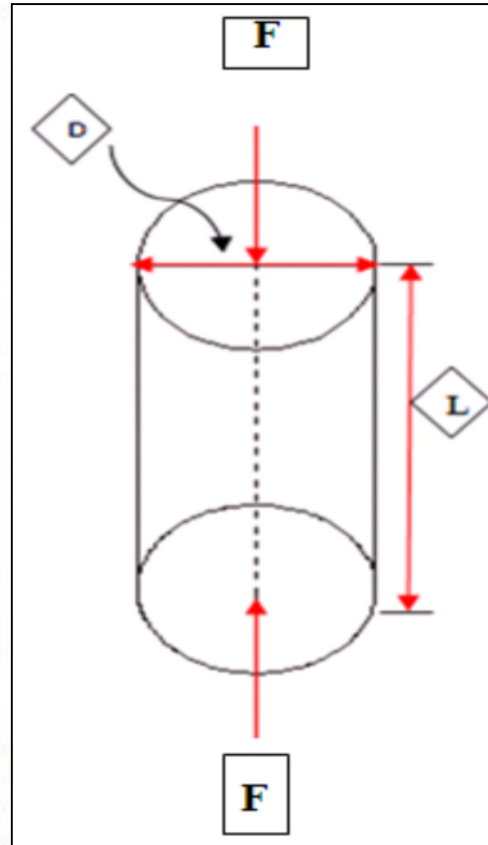


Figure II.7. Schéma de la Compression uniaxiale [4].

Le tableau donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la compression :

Tableau II.4. Classification des roches en fonction de la résistance à la compression [9].

Roches	Faiblement résistantes	Moyennes	Résistantes	Très résistantes
R _c (MPa)	<5	20	60	>100

II.3.5. La résistance à la traction

II.3.5.1. Traction direct

En soumettant une éprouvette cylindrique à une traction uniaxiale, la résistance à la traction simple est égale à la contrainte limite de traction qui produit la décohésion des échantillons des roches massives [9].

$$R_t = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad \text{MPa} \quad (\text{II.12})$$

P_{\max} = valeur finale atteinte par l'effort appliqué.

A_0 = surface transversale.

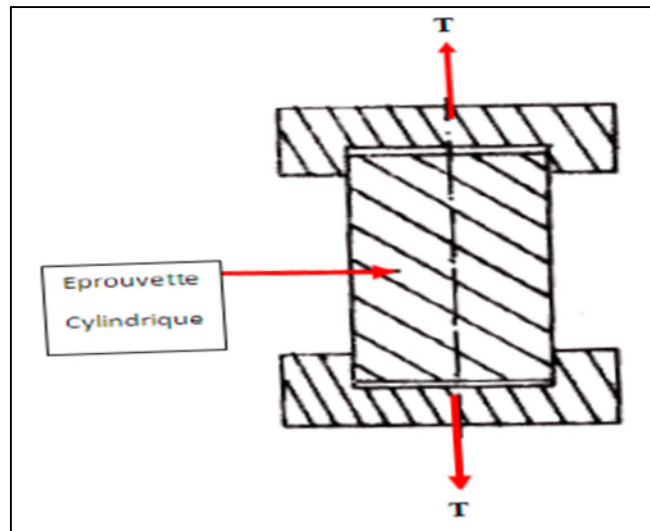


Figure II.8. Traction directe[4].

II.3.5.2. Traction indirecte (Essai brésilien)

C'est l'essai de traction le plus commun pour les roches ; Pour réaliser cet essai, on utilise une éprouvette de longueur à peu près égale au diamètre. L'éprouvette est placée entre les plateaux de la presse puis elle est chargée[9]. La contrainte de traction est donnée par la relation suivante:

$$R_t = \frac{2F_{max}}{\pi DL} \quad \text{MPa} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

F_{max} : la charge maximale appliquée ;

D et L : dimensions de l'éprouvette cylindrique.



Figure II.9. Dispositif expérimental(Essai Brésilien)[4].

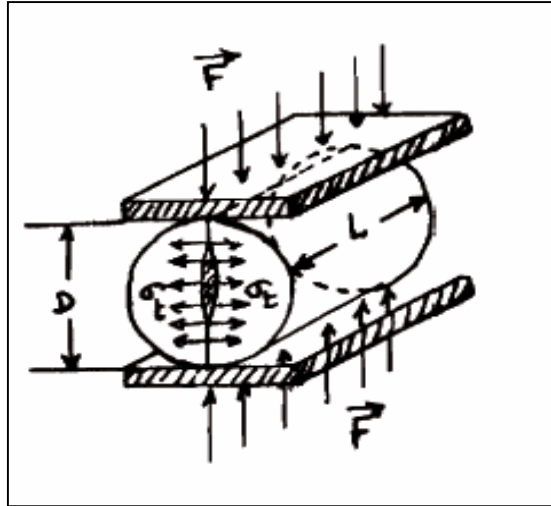


Figure II.10. Traction indirect (Essai Brésilien)[4].

Le tableau II.5. Donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la traction :

Tableau II.5. Classification des roches en fonction de la résistance à la traction[9].

Roches	Faiblement Résistantes	Moyennes	Résistantes	Très résistantes
R_t(MPa)	0,40	1,50	4,00	> 20

Notons que la résistance à la traction d'une roche est très faible par rapport à sa compression à cause des surfaces d'affaiblissement structurales qu'elle renferme.

On peut déterminer la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression, par la relation suivante :

$$R_t = (0,08 \div 0,12) \times R_c \quad (\text{II.14})$$

II.3.6. La résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement représente la contrainte tangentielle limite avant la rupture dans un essai de cisaillement [9].

On distingue :

1. Cisaillement simple;
2. Cisaillement par torsion ;
3. Cisaillement par compression.

II.3.6.1. Cisaillement simple

La résistance au cisaillement est définie par la relation suivante :

$$R_t = \frac{P_{\max}}{S} \quad \text{MPa} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

P_{\max} : effort tangentielle entraînant la rupture ;

S : Surface sur laquelle on applique l'effort P .

• Dans le cas d'un cisaillement simple avec une seule surface : $S = h.L$

• Dans le cas d'un cisaillement simple avec deux surfaces : $S = 2.h.L$

• Dans le cas d'un cisaillement simple avec une seule surface cylindrique : $S = d.L$

h : largeur de l'échantillon ;

L : longueur de l'échantillon ;

d : diamètre du cylindre.

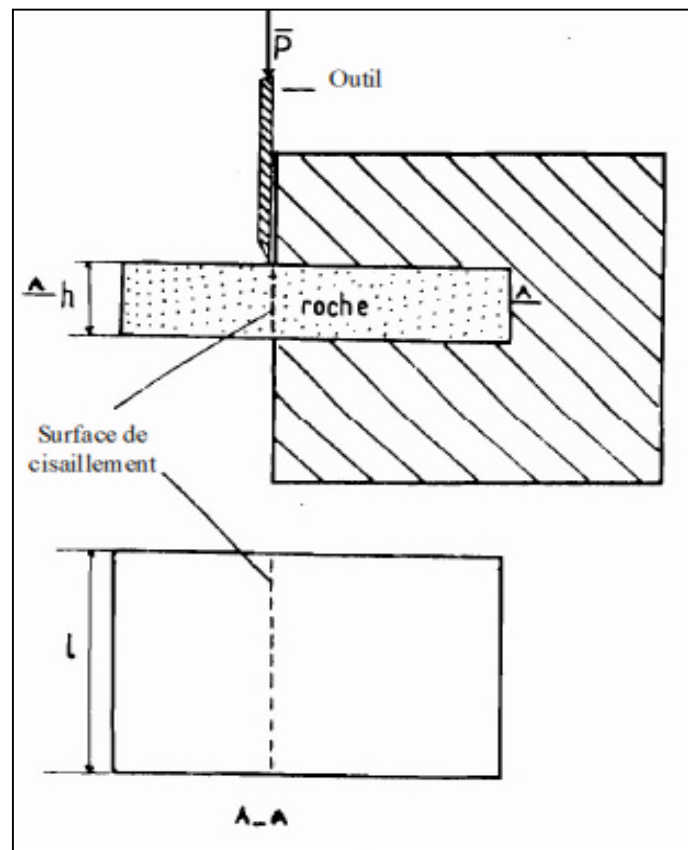


Figure II.11. Cisaillement simple avec une surface de cisaillement[9].

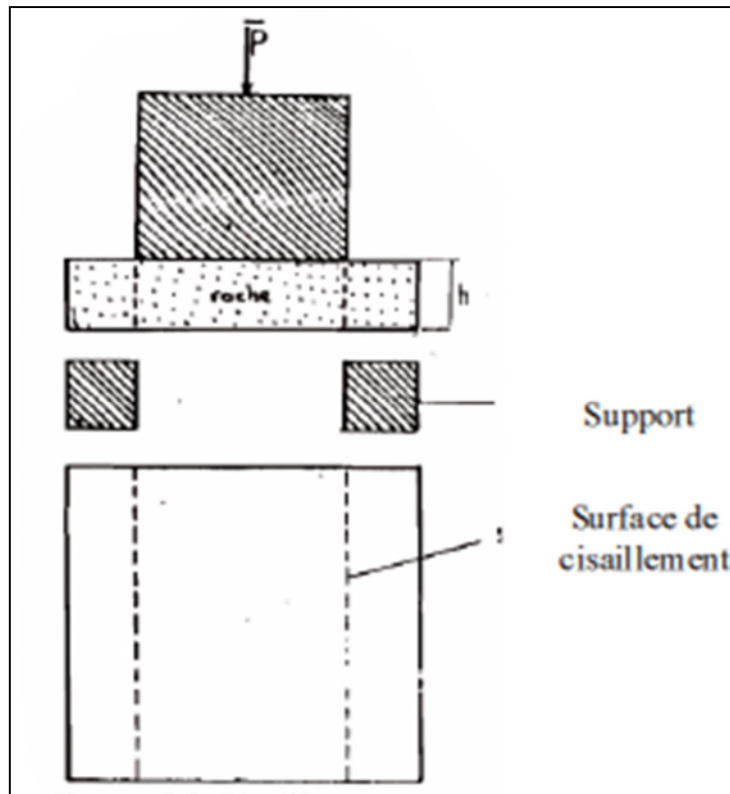


Figure II.12. Cisaillement simple avec deux surfaces de cisaillement [9].

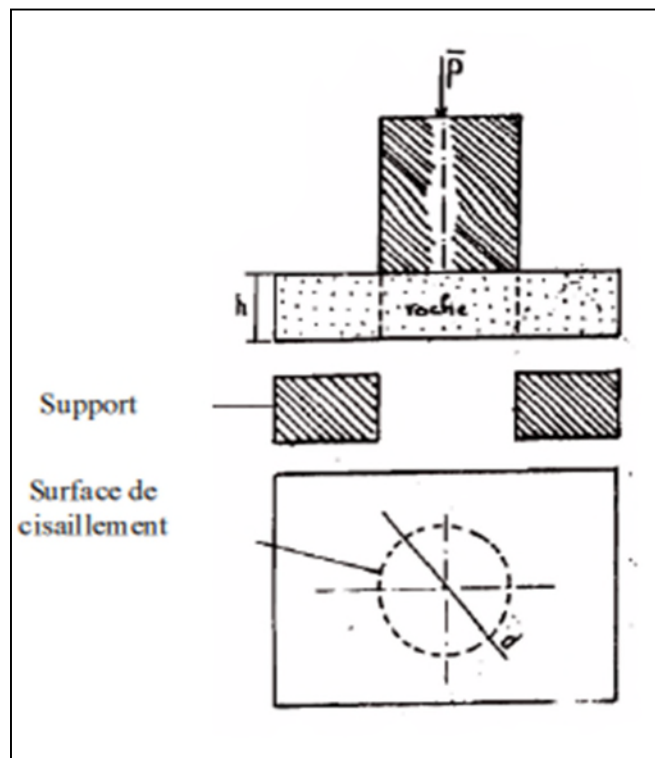


Figure II.13. Cisaillement simple avec une surface cylindrique [9].

II.3.6.2. Cisaillement par torsion

Dans ce cas, l'échantillon de forme cylindrique est soumis à un couple de torsion. Ce dernier va engendrer des contraintes de cisaillement sur chaque section transversale. Quand ces contraintes atteignent une valeur critique [9], elle nous donne la résistance de cisaillement par torsion définie par la formule suivante:

$$R_t = \tau_{max} = \frac{M_t}{w} \quad \text{MPa} \quad (\text{II.16})$$

M_t : couple de torsion ;

W : moment résistant, avec $w = \frac{d^3}{16} \pi$; d : diamètre de l'échantillon.

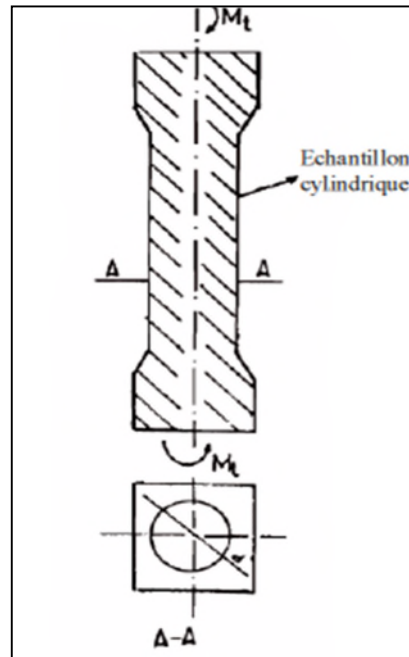


Figure II.14. Cisaillement par torsion [9].

II.3.6.3. Cisaillement par compression

On applique un effort de compression F incliné avec un angle α par rapport à la surface de cisaillement. La contrainte transmise par l'échantillon se décompose en une composante normale (σ_n) et une composante tangentielle (τ) ; quand cette dernière atteint une certaine valeur, l'échantillon se rompt [9]. Cette valeur critique est la résistance au cisaillement par compression de la roche. Les deux contraintes sont définies par les formules suivantes:

$$\tau = \frac{P \cdot \cos \alpha}{S} \quad (\text{II.17})$$

$$\sigma_n = \frac{P \cdot \sin \alpha}{S} \quad (\text{II.18})$$

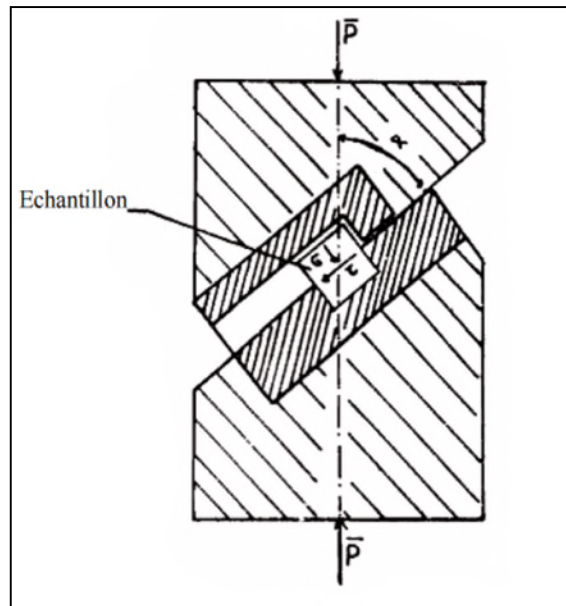


Figure II.15. Cisaillement par compression[9].

Les échantillons utilisés ont une forme cubique ou cylindrique dont le diamètre est égal à la longueur. L'angle α varie de 30° à 60° .

La courbe représentative de (τ) en fonction de (σ_n) est donnée sur la figure II.16. A partir de cette courbe on peut déterminer graphiquement la cohésion et l'angle de frottement interne de l'échantillon (C et Φ)[9].

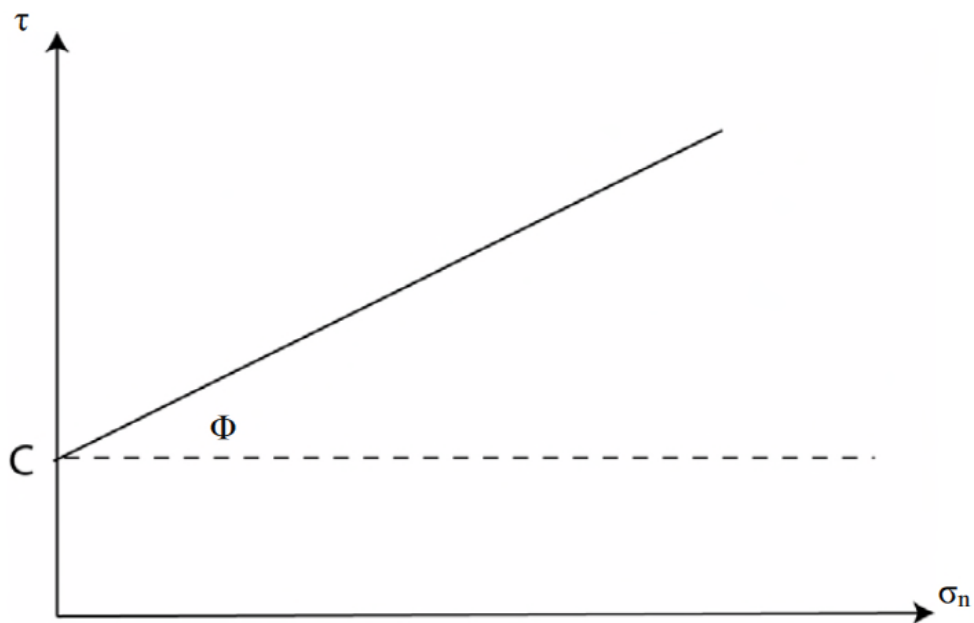


Figure II.16. Courbe représentative de τ en fonction de σ_n [9].

II.3.7. La cohésion et l'angle de frottement interne

II.3.7.1. la cohésion (c)

Les roches sont beaucoup plus cohésives que les sols, mais il existe d'importantes différences de la valeur de la cohésion entre les types de roches, par exemple entre un granite et la craie. Le degré d'altération de la roche est un facteur à prendre en compte.

La cohésion est également en fonction de la présence de discontinuités. En effet, ces dernières sont les points faibles d'une roche et en déterminent fortement la résistance au cisaillement. Ainsi, lorsque de la présence des discontinuités, la résistance au cisaillement d'une roche sera dépendante de la résistance au cisaillement des joints de ces discontinuités et non de celle de la matrice [7]. Elle est donnée par la relation :

$$C = \frac{R_c \times R_t}{2 \times \sqrt{R_c \times R_t - 3R_t^2}} \quad (\text{II.19})$$

Tel que :

R_c : c'est la résistance à la compression en MPa;

R_t : c'est la résistance à la traction en MPa.

II.3.7.2. L'angle de frottement interne (Φ)

L'angle de frottement interne correspond à l'angle formé naturellement par un matériau mis en tas, par rapport à l'horizontale. Il dépend du type de sol et plus particulièrement de l'éroulé de ses grains : plus ces derniers sont anguleux, plus l'angle de frottement interne sera élevé. Ainsi, cet angle sera nettement plus élevé dans le cas de graviers que pour un sol à forte teneur en argiles [2].

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{R_c - 4R_t}{R_c - 2R_t} \right) \quad (\text{II.20})$$

Tel que :

R_c : c'est la résistance à la compression en MPa;

R_t : c'est la résistance à la traction en MPa.

II.4. Conclusion

De la prédiction d'éventuels problèmes de stabilité vis-à-vis des massifs rocheux, les propriétés physiques et mécaniques sont toujours déterminés suite à des essais effectués au laboratoire et des formules empiriques mais aussi et inévitablement sur la base des critères de ruptures.

Chapitre III

Les systèmes de classification des massifs rocheux

Chapitre III : Les systèmes de classification des massifs rocheux

III.1. Introduction

Les classifications des massifs rocheux fracturés continuent à évoluer depuis plus d'un siècle. Leur utilisation a un intérêt considérable lors de l'étude de faisabilité et de dimensionnement préliminaire d'un projet, surtout quand les informations mécaniques, hydrologiques et l'état de contrainte in-situ du massif rocheux ne sont pas disponibles.

Nous nous intéressons, dans ce qui suit, aux systèmes de classifications quantitatives, nommés également classifications géomécaniques.

III.2. Les buts des systèmes de classification des massifs rocheux

La classification géomécaniques consiste à quantifier un massif rocheux par une note empirique décrivant sa qualité par une série de termes allant d'un très bon rocher à un rocher très médiocre. Les buts principaux de ces classifications se résument comme suit :

- Estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d'un massif fracturé, en particulier son module de déformation, sa résistance à la compression simple, sa cohésion et son angle de frottement interne.
- Estimer le temps durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement (stand-up time). C'est un indice très essentiel dans la détermination de la portée d'excavation.
- Donner des recommandations de soutènement des ouvrages[8].

III.3. Les différents systèmes de classification

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

- RQD (RockQuality Designation) d'après Deer (1967);
- RMR (Rock Mass Rating) d'après Bieniawski(1976);
- Q-system (Barton, 1974);
- GSI (Geological Strength Index) d'après Hoek- Brown (1995);
- SMR (Slop Mass Rating) d'après Romana (1985).

III.3.1. Système du RQD (Rock Quality Designation)

Le Rock Quality Designation (RQD) a été développé par Deere et al. (1967) 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.

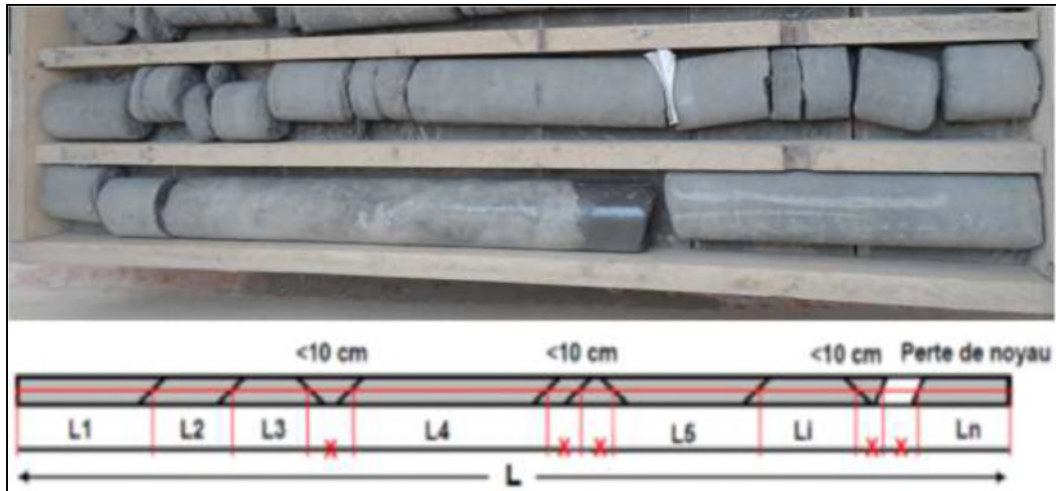


Figure III.1. Une carotte [20].

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

$$RQD = \frac{\sum \text{longueur des morceaux} > 10\text{cm}}{\text{longueur du forage}} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Palmstrom (1982) 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 ;

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (\text{III.2})$$

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 [8].

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

Tableau III.1. Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux [20].

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

➤ Limites 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 [14]:

- 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'effectuée sur une carotte de forage, cette classification est en outre limitée par la qualité du forage.

III.3.2. Système RMR (Rock Mass Rating)

Cette classification a été développée par Bieniawski [1973] au South African Council of Scientific and Industrial Research (SACSIR). Elle est basée sur l'étude de quelques centaines de tunnels creusés principalement dans des roches sédimentaires à profondeur modérée. L'utilisation de cette classification nécessite de diviser au préalable le site en régions homogènes d'un point de vue de structures géologiques. Chaque région est classifiée séparément.

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 figure III.2.

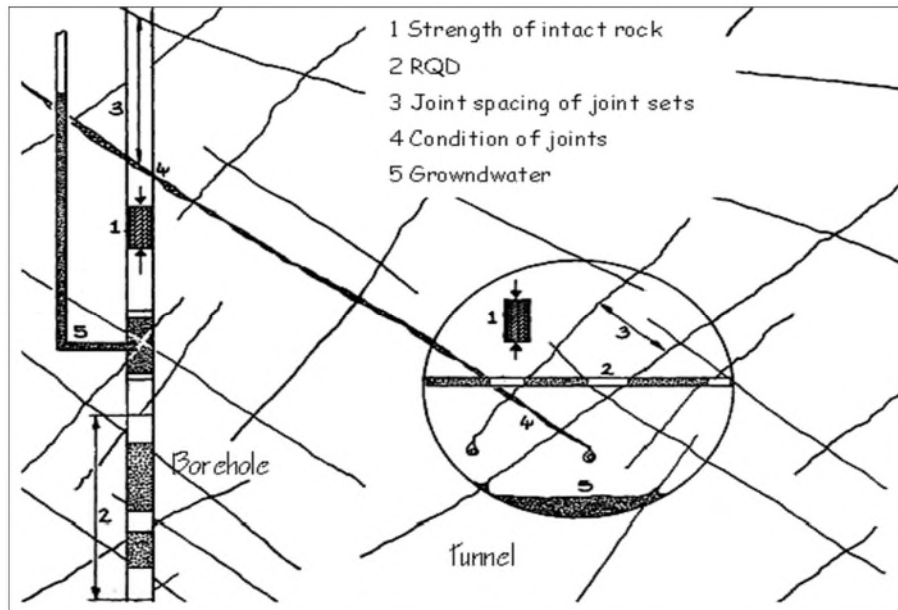


Figure III.2. Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR [8].

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 [2].

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]).

Le RMR₈₉ s'écrit alors :

$$\text{RMR}_{89} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B \quad (\text{III.3})$$

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

Tableau III.2. Classification RMR (Bieniawski).

PARAMETRES			COEFFICIENTS						
1	Résistance de la Roche (MPa)	Indice Franklin (MPa)	>10	4-10	2-4	1-4	Indice Franklin non utilisable (MPa)		
		Résistance à la compression (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Note	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D.		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Note		20	17	13	8	3		
3	Espacement des Joints		>2m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2m	<0,06 m		
	Note		20	15	10	8	5		
4	Nature des joints		Surfaces très rugueuses non continue Eponte en contact Eponte non Altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte non Altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte Altérées	Surfaces lustrées ou remplissage <5 mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	Remplissage mou >5 mm ou joints ouverts >5 mm joints continus		
	Note		30	25	20	10	0		
5	Venues d'eau	Débit sur 10 m	Aucune venue d'eau	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Pression d'eau contrainte principale	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Hydro-Géologie	Complètement sec	Humide	Suintements (eau interstitielle)	Pression d'eau modérée	Problèmes sérieux de venues d'eau		
	Note		15	10	7	4	0		

Tableau III.3. Classe de rocher suivant la classification de Z. BIENIAWSKI
après application de la note d'ajustement

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

III.3.2.1. 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[11]:

a) la cohésion :

$$C_{\text{éq}} \text{ (kPa)} \approx 5 \text{ RMR} \text{ (Beniawski, 1979, cité par Beniawski, 1989)} \quad (\text{III.4})$$

b) l'angle de frottement :

$$\varphi_{\text{éq}} (\text{°}) \approx 0,5 \text{ RMR} + 8,3 \pm 7,2 \text{ (Trunck et Hönish, 1989, cité par Beniawski, 1989)} \quad (\text{III.5})$$

c) le module de young :

$$E_{\text{éq}} \text{ (GPa)} \approx 10^{(RMR-10)/40} \text{ (Serafim \& Pereira, 1983, cité par Beniawski, 1989)} \quad (\text{III.6})$$

Stille et al. (1982,) ont proposé d'utiliser les équivalences du tableau pour estimer la résistance à la compression simple du massif rocheux.

Tableau III.4. Relations entre RMR_{sec} et la résistance à la compression simple
d'après Stille et al. (1982).

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

III.3.2.2. 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. Bieniawski, 1989 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 [14].

III.3.3. Système Q

Développée par le Norwegian 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]). 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.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{III.7})$$

- RQD (Rock Quality Designation) caractérise la qualité des carottes de sondage.
- J_n (Joint set number) représente le nombre de familles de discontinuités.
- J_r (Joint roughness number) représente la rugosité des épontes de la famille de discontinuité la plus défavorable en terme d'orientation,
- J_a (Joint alteration number) caractérise l'état d'altération des discontinuités.

- Jw (Joint water reduction) est un facteur de réduction dû à la présence de l'eau dans les joints.
- SRF (Stress Reduction Factor) est un facteur de réduction des contraintes dans le massif (voir annexe 01).

D'une façon globale, RQD/Jn représente l'effet de la taille des blocs, Jr/Ja caractérise la qualité mécanique de contact entre les blocs en cisaillement et Jw/SRF décrit l'état initial du massif par rapport à l'eau et aux contraintes.

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

$$RMR = 9 \log Q + 44 \quad (\text{III.8})$$

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. Selon Goel et al. [1995], le RMR et le Q-system ne prennent pas en considération les mêmes paramètres et donc, elles ne sont pas équivalentes [8].

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 III.5 présente cette qualification:

Tableau III.5. Classification de massif en fonction de la valeur Q [14].

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

➤ Limitations du système Q

- L'utilisation de l'indice Q est spécifiquement développée pour des tunnels et des excavations en forme de voûte, 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 (Milne et al. 1998). 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 [14].

III.3.4. Système du GSI (Geological Strength Index)

Introduit par Hoek et al. [1995] puis amélioré par Hoek et Brown [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).

$$RMR' = A1 + A2 + A3 + A4 + 15 \quad (III.9)$$

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).

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \quad (III.10)$$

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.

Tableau III.6. Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI[8].

Valeur du GSI	76-95	56-75	41-55	21-40	<20
Qualité de massif rocheux	Très bonne	Bonne	Moyenne	mauvaise	Très mauvaise

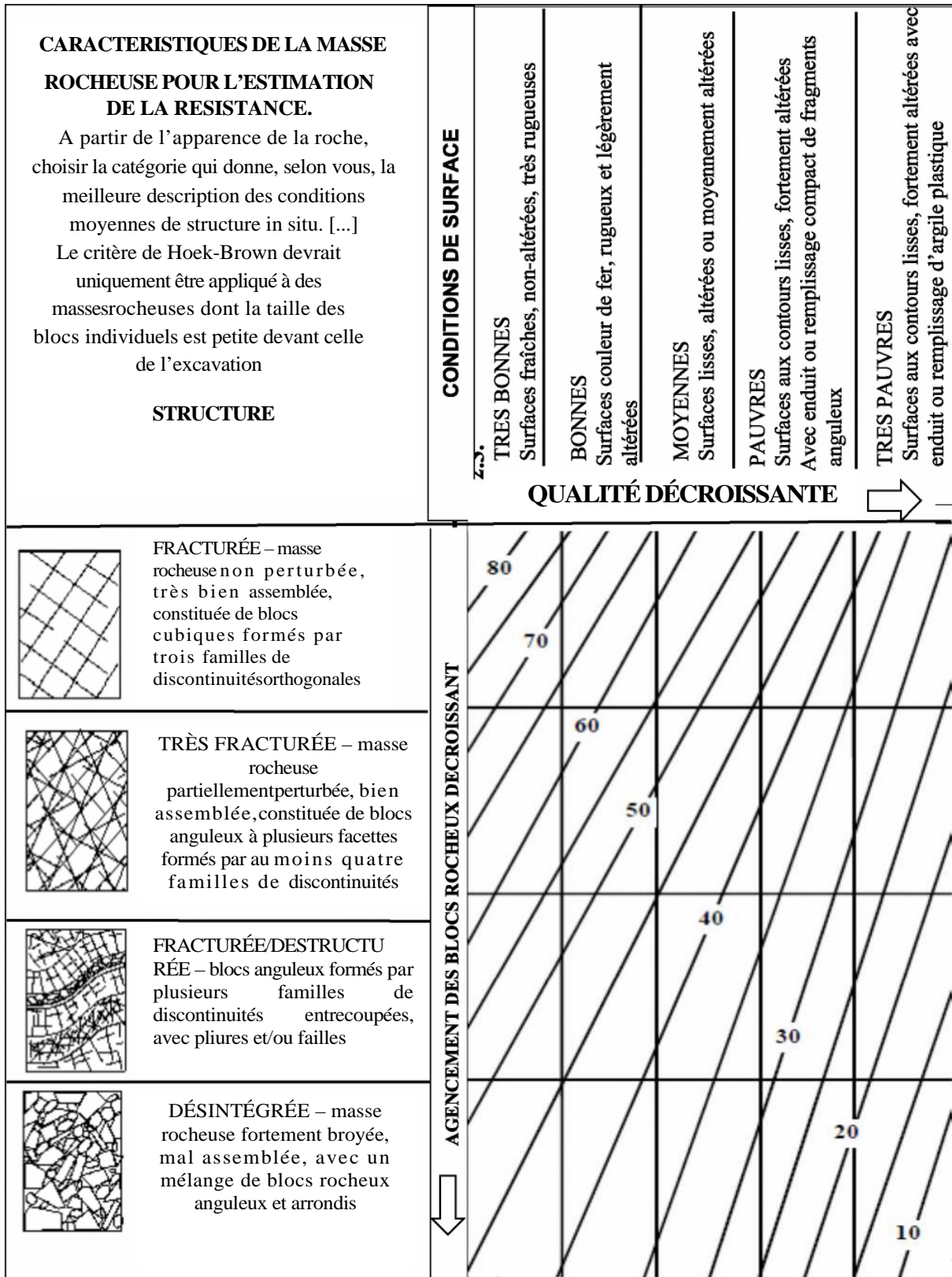


Figure III.3. Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse (Hoek et Brown, 1995)

III.3.5. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)

Introduit par Romana en 1985, 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[17]:

$$\text{SMR} = \text{RMR}_{\text{debase}} + (F1. F2. F3) + F4 \quad (\text{III.11})$$

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).

$$F1 = (1 - \sin A)^2 \quad (\text{III.12})$$

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 est également été établi empiriquement par l'équation suivante:

$$F2 = \tan^2 \beta_j \quad (\text{III.13})$$

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 telles 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 III.7:

Tableau III.7. Notes des paramètres du SMR (Romana, 1985) [17].

SMR= RMR_{debase}+ (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° =$						
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	Deficient blasting
Valeur de F4		15	10	8	0	-8

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

Tableau III.8. Description des classes SMR(Romana, 1985)[17].

Description des classes SMR										
Classe	V _a	V _b	IV _a	IV _b	III _a	III _b	II _a	II _b	I _a	I _b
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	Réexcavation		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.).

III.4. 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 [8] :

- 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 [14].

III.5. Conclusion

Les systèmes de classifications des massifs rocheux sont des méthodes empiriques qui déterminent les propriétés du massif en fonction de plusieurs facteurs affectent sa stabilité. Leur rôle consiste à combiner de manière structurée les informations provenant d'observation de mesure ou encore de l'expérience de manière à fournir des estimations quantitative et qualitative sur la situation de massifs et le type de soutènement adéquat.

Chapitre IV

Conditions géologiques et

Minières de gisement

Chapitre IV: Conditions géologiques et minières de gisement

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous développons deux axes sur la base des analyses documentaires et des données recueillies sur terrain. Le premier se base sur la connaissance des conditions géologiques et hydrogéologiques de gisement qui sont des facteurs déterminants du degré de difficulté et du coût de réalisation d'un ouvrage minière. Ces conditions géologiques et hydrogéologiques sont donc des outils très importants pour le géotechnicien pour qu'il obtienne une image aussi complète que possible des caractéristiques du massif rocheux traversé et toutes autres structures qui peuvent influencer la stabilité de la zone en question. Le second axe concerne la méthode et les paramètres d'exploitation qui sont aussi des critères à considérer lors de l'évaluation de la stabilité.

IV.2. Historique de la mine

L'exploitation de la mine de Boukhadra fut entamée durant l'époque Romaine pour l'extraction du cuivre dans la zone du pic; par la suite l'exploitation a porté sur le zinc et autres poly-métaux par la concession de Boukhadra (Mr TADRO).

-De 1903 à 1926, la concession de MOKTA EL HADID avait entrepris des travaux de recherches systématiques par des galeries entre les niveaux 845-1225.

-De 1926 à 1966, date de nationalisation des mines, c'était la société de l'Ouenza qui exploitait le gîte de Boukhadra. Cette dernière avait effectuée de la recherche systématique Par des travaux miniers et par des sondages sur le gisement de Boukhadra.

-Durant la période de 1967 à 1984, la SONAREM était chargée de l'exploitation et des recherches sur les gîtes ferrifères de l'Ouenza et Boukhadra.

Après la restructuration des entreprises (1983 - 1984), c'était FERPHOS qui gérait, exploitait et développait ces recherches sur l'ensemble des gîtes ferrifères existants sur le territoire national.

-Depuis la date du 18/10/2001, et dans le cadre de partenariat avec l'étranger, le holding L.N.M.N.V. a signé l'accord de partenariat avec HADID OUENZA - BOUKHADRA filiale FERPHOS avec 70% pour la première.

-Le 01/01/2005 la nomination a été modifiée par Mittal steel Tébessa.

-Le 18/08/2007 la nomination a été modifiée par ArcelorMittal Tébessa [15].

IV.3. Situation géographique

La région est située dans les monts du Mellègue (Nord Est Algérien), elle est desservie par le biais de la CW58 qui relie El Meridj et Morsott. La commune de Boukhadra est située à environ 45Km au Nord du chef lieu de la willaya de Tébessa, à 47Km de la mine de l'Ouenza, à 18 Km des frontières Algéro-Tunisiennes et à 190Km au sud du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (willaya d'Annaba), auquel est relié par une ligne de chemin de fer, elle est limitée :

- Au Nord par la commune de L'Ouenza.
- A l'Est par la commune d'El Meridj.
- A l'Ouest par la commune d'El Aouinet.
- Au Sud la commune de Morsott.

Le Djebel de Boukhadra constitue un massif isolé qui s'élève au dessus de la vallée de Morsott de 700 à 800m d'altitude. Avec un point culminant de 1463m. Le gisement est entre les méridiens $8^{\circ}-01^{\circ}$.et $8^{\circ}-04^{\circ}$.Est et les parallèles $35^{\circ}-40^{\circ}$.et $35^{\circ}-50^{\circ}$.Nord [12].

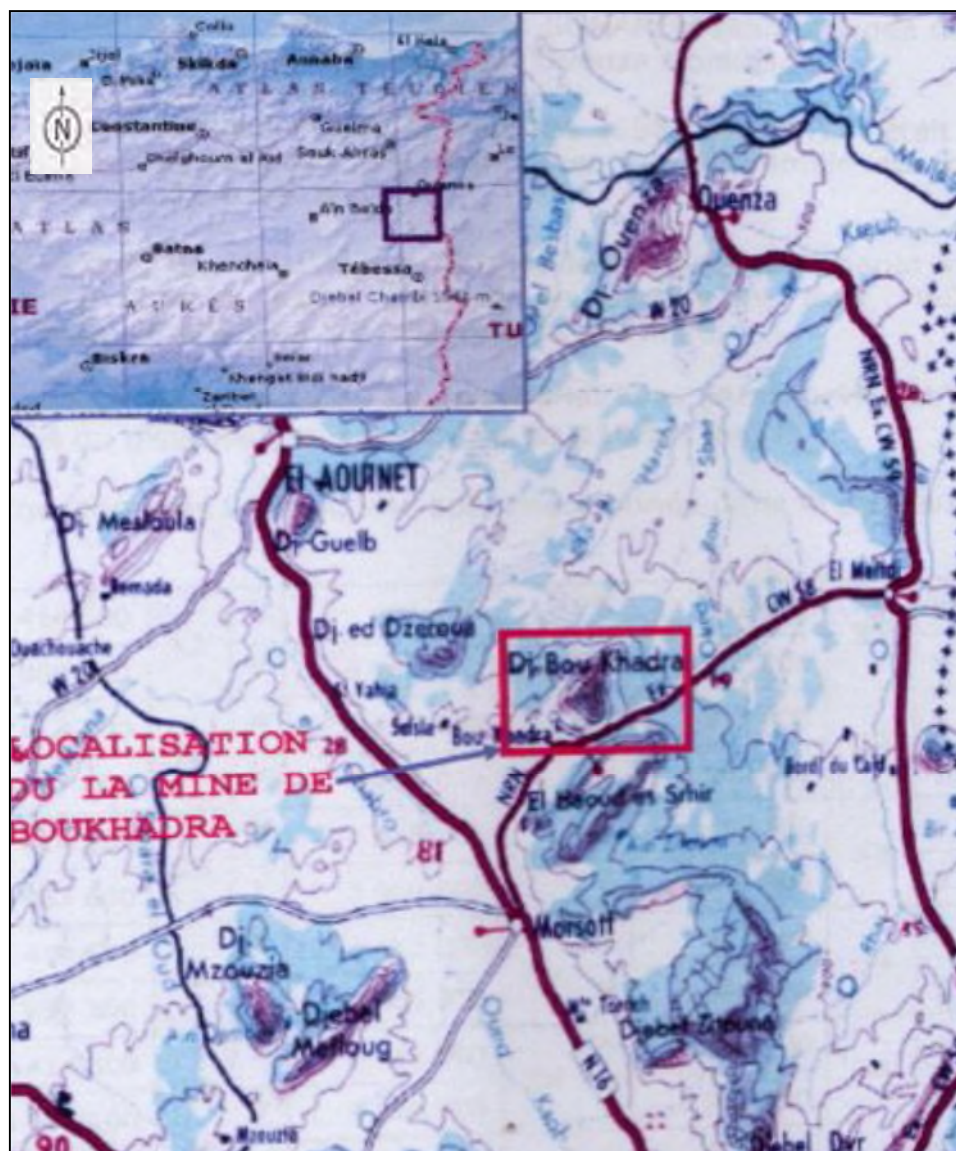


Figure IV.1. Carte de situation géographique de la mine de Boukhadra (Tébessa) [15].

IV.4. Aperçu géologique du gisement de Boukhadra

IV.4.1. Géologie régionale

Les Monts de Mellègue font partie intégrante de l'Atlas saharien, qui se poursuit en Tunisie par l'Atlas tunisien. Il est composé de trois faisceaux de plis organisés en échelons et formant du Sud-Ouest vers le Nord-Est ; Monts des Ksours, Djebel Amour, Monts de Ouled Nail, les Aurès et les Monts de Mellègue.

Plusieurs études ont été réalisées dans la région des confins Algéro-tunisiens, considèrent les formations triasiques comme des diapirs polyphasés liés aux phases compressives depuis l'Aptien jusqu'au Quaternaire (Dubourdiou, 1956 ; Thibièroz et Madre, 1976 ; Rouvier et al, 1985 ; Othmanine, 1987 ; Perthuisot et al, 1988 ; Aoudjehane et al,

1992 ; Bouzenoune, 1993 ; Bouzenoune et al, 1995 ; Kowalski et Hamimed, 2000). Certains auteurs rattachent une relation entre la mise en place des diapirs à des phases tectoniques distensives permettant la mise en place des formations triasiques en surface par une éventuelle halocinèse à caractère diapirique classique (Laatar, 1980 ; Orgeval et al, 1986 ; Smati, 1986 ; Chikhaoui, 1988 ; Hatira, 1988 ; Perthuisot et al, 1988). Quant à Vila (1994, 1995, 1996, 2001 ; Vila et Charrière, 1993 ; Vila et al, 1994 ; Vila et al, 1996), ils considèrent les formations triasiques comme d'importantes lentilles empruntées des fractures ouvertes qui vont être resédimentées et interstratifiées au sein des séries crétacées, à la manière de « glaciers de sel » sous-marins [15].

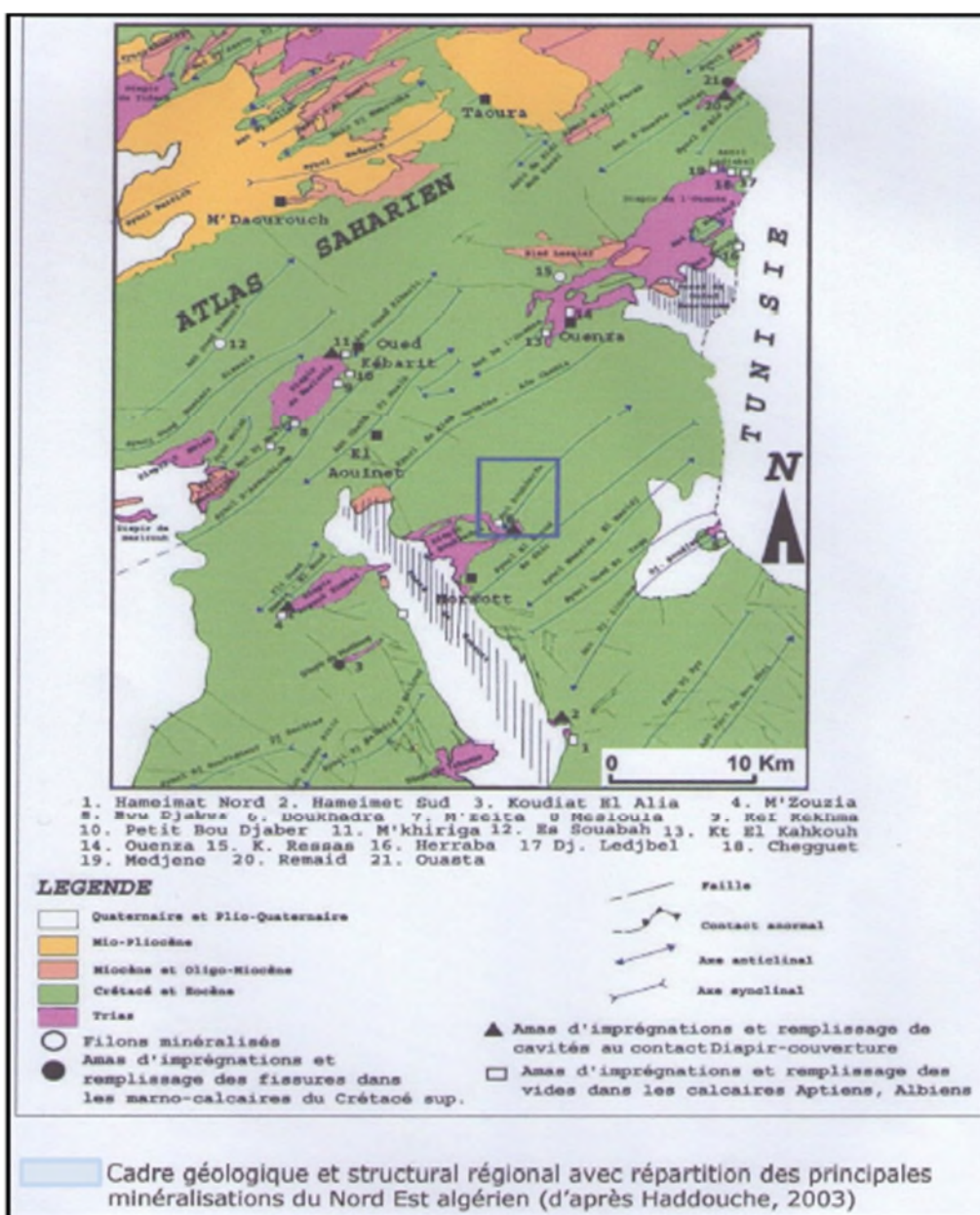


Figure IV.2. Carte géologique régionale [15].

IV.4.2. Géologie du site

Le massif de Boukhadra présente une structure anticlinale orientée NE-SW, recoupée par le fossé de Tébéssa-Morsott d'orientation NW-SE, l'ossature de l'anticlinal est constituée par les terrains du Crétacé moyen (Aptien- Vraconien) qui dessinent dans la partie NE une fermeture périclinale. Les terrains les plus anciens reconnus à l'affleurement sont représentés par les évaporites du Trias, ils sont le plus souvent en contact tectonique avec les formations du Crétacé [12].

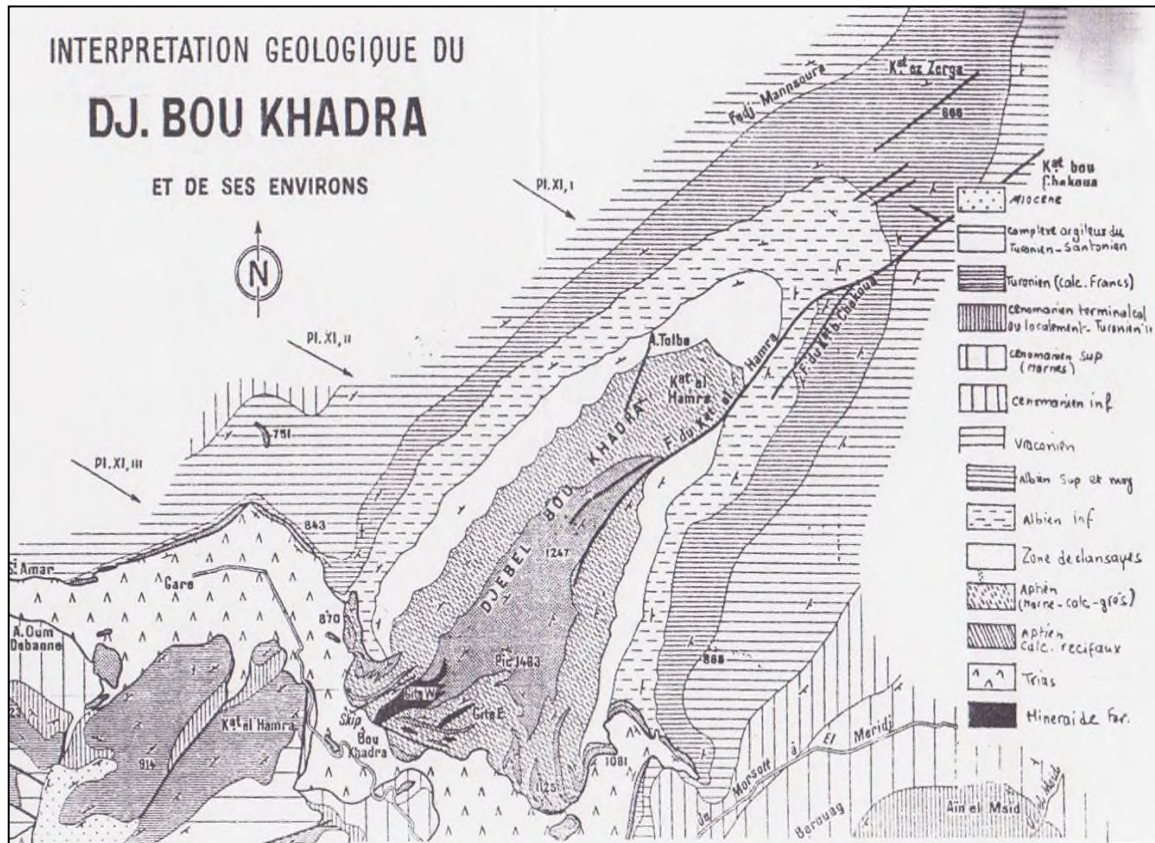


Figure IV.3. Carte géologique de Boukhadra [15].

IV.4.3. Stratigraphie

Les terrains du secteur de Boukhadra sont formés par des sédiments du Mésozoïque et une partie du Tertiaire et du Quaternaire pour le Mésozoïque, les formations sont formées par les sédiments du Trias et du Crétacé.

a. Le Trias : les dépôts Triasiques rencontrés dans la région de Boukhadra sont représentés par les marnes bariolées, gypses, dolomies, débris de calcaires et de grés. Les roches du Trias se développent dans les parties Ouest, Sud et Sud Est et en contact anormal avec les dépôts aptiens du crétacé (Diapirisme).

b. Le Crétacé: dans le profil du crétacé, nous retrouvons le Cénomaniens, l'Aptien, l'Albien, le Coniacien, et le Cénomaniens où on a la série Aptienne, porteuse de la minéralisation est caractérisée par des marnes et des calcaires constituant la partie inférieure qui encaisse le gîte Sud, des calcaires récifaux construits, à organismes fossiles (rudistes) qui constituent le niveau porteur de la minéralisation principale et des grès et calcaires de la partie supérieure de l'Aptien non productif et on a :

- **L'Aptien :** Les dépôts ou les sédiments aptiens de la région Boukhadra occupent des vastes surfaces. L'aptien se présente sous forme de deux faciès bien distincts:
 - Faciès carbonaté (calcaire);
 - Faciès terrigènes (marno-grésocalcaireux).
- **L'Albien:** La base et le sommet de l'albien sont surtout représentés par des marnes, la partie moyenne étant constituée dans une large mesure par des calcaires sublitographiques.
- **Vraconien:** La séquence est composée de minces lits de marnes avec intercalation d'argile marneuse noires et de calcaires marno-argileux. La puissance maximale est de 470m.
- **Le Cénomaniens:** Il s'agit d'une série de marnes gris ou verdâtres grises, avec par endroits des intercalations de calcaires.
- **Turonien:** Les dépôts de cet âge s'observent dans la partie Ouest et Sud du domaine traité. Il s'agit surtout de calcaires épais et massif pélitique marneux dans la partie basale, avec de rares minces intercalations de marnes. La puissance est variable, décimétrique jusqu'aux quelques centaines de mètres.
- **Coniacien :** contient les marnes argileuses avec intercalation d'argile marneuse et par endroit de calcaire marneux.

c. Le Tertiaire : les dépôts classés comme Tertiaire (miocène) sont observés seulement dans la partie occidentale du domaine étudié et sont représentés par des conglomérats à éléments variés, cimentés par une matrice carbonatée et des intercalations de roches gréseuses.

d. Le Quaternaire : les dépôts récents du Quaternaire sont formés par un matériel caillouteux, blocs de calcaires, grès, débris de minerai et de conglomérats. Ils sont répandus aux flancs de la montagne et dans les parties basses du relief [15].

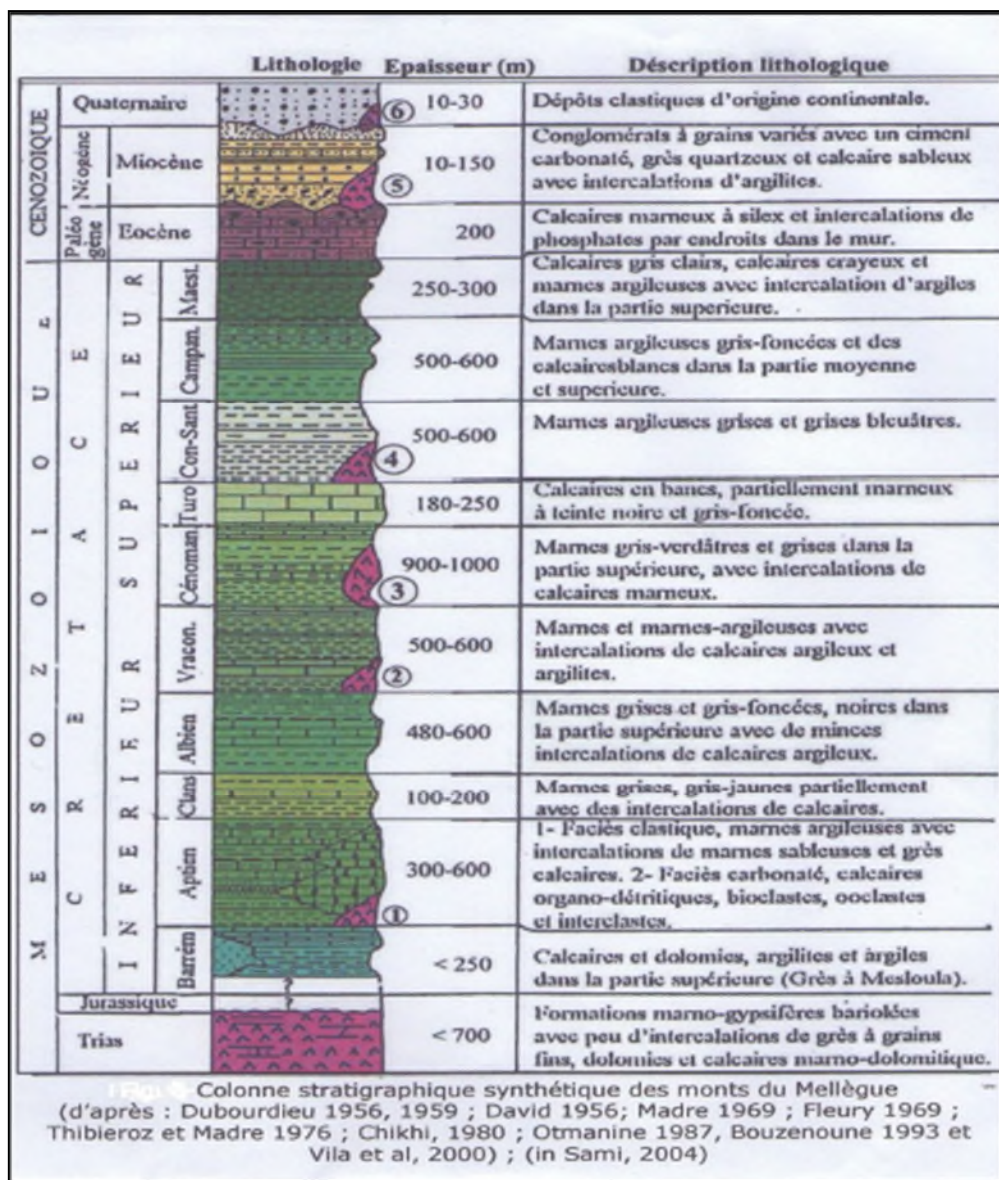


Figure IV.4. Colonne stratigraphique de la région de Boukhadra [15].

IV.4.4. Tectonique

Du point de vue tectonique, la région de Boukhadra est marquée par deux phases tectoniques importantes; La phase de plissement de direction N.E/S.O et la phase de tectonique cassante ayant engendré des mouvements de socle qui sont à l'origine de la formation des fossés de Tébesa – Morsott et des Ouled – Boughanem ainsi que le horst de Boudjaber.

L'anticlinal de Boukhadra est affecté principalement par la faille de Koudiet -El – Hamra qui est le relais de la faille de Boukhara de direction N.E/S.O. Dans la partie Sud-Ouest (à l'aval du pic), la structure est affectée par un effondrement considérable.

D'autres failles sans importance majeure, à petits rejets sont à signalées également aux environs immédiats du gisement.

IV.4.5. Géomorphologie

Le gisement ferrugineux de Boukhadra, appartenant au domaine de l'Atlas saharien est localisé dans le massif montagneux de Djebel Boukhadra, caractérisé par une structure anticlinale très simple de direction NE-SO avec une terminaison périclinale au NE. Le Djebel Boukhadra s'étend sur une longueur de 7 à 8 Km et une largeur variant de 3 à 5 Km, suivant une direction NE-SO. Les côtes absolues dans les limites de la concession minière variant de 750m au pied de la montagne à 1463m au point culminant, localisé au niveau du pic de Boukhadra [9].

IV.5. Aperçu Hydrologie et hydrogéologique de gisement de Boukhadra

Le réseau hydrographique dans la région de la mine de Boukhadra est faible à l'exception des multiples petits chenaux d'écoulement pluviaux sans importance majeure qui parsèment les versants de Djebel Boukhadra. Le réseau hydrographique se compose de l'oued El Harcha et Oued El Melali qui passent entre Kharoubet el harcha et le Douar el khiana suivant la direction NE -SW à l'extrémité nord de Djebel Boukhadra.

Hydrologiquement parlant; le comportement des terrains existants à Boukhadra se résume comme suit:

Les terrains triasiques contenant du gypse et du sel ; et du fait de leur hétérogénéité présentent un aspect perméable et facilitent les infiltrations des eaux ; leur circulation les rend saumâtre et ne peuvent convenir qu'à l'emploi industriel.

Les calcaires massifs de l'aptien sont toujours très fissurés en affleurement et constituent un terrain favorable à la circulation et l'accumulation des eaux souterraines.

Les marnes qui forment malheureusement la plus grande surface affleurant dans la région sont imperméables et toutes les eaux de pluies ruissellent ou s'évaporent.

Les terrains quaternaires n'ont pas une importance hydrologique.

Les études hydrogéologiques entreprises par la DHW de la wilaya de Tébessa ne révèlent aucune nappe aquifère en eau potable exploitable dans la région minière de Boukhadra. Toutefois; il y a lieu de noter que les synclinaux calcaires sont des réservoirs naturels d'eau et à leur pied apparaissent des sources qui sont fréquemment localisées sur de petites fractures.

L'on a ainsi les points d'eau d'Ain Chania ; à l'extrémité fracturée du synclinal de même nom ; les sources d'Ain Safsaf; Ain Malga; Chegaga; Ain Menahla... ect; au pied de

Haoud Es Sghir et celle d'Ain Bettik; au pied de Haoud el Kebir. Au Sud Est; l'Ain Oudei Elma est un exutoire de l'eau accumulée dans les calcaires à incérâmes du Sénonien.

A Boukhadra; d'anciens travaux de recherche ont recoupé des circulations d'eau dans les calcaires aptiens (A. Si Hamed) [10].

IV.5.1. Données climatologiques

Cette région étant une zone de transition météorologique, Le climat est caractérisé par l'alternance d'une saison chaude et sèche et une saison froide et humide. La pluviosité moyenne annuelle est faible (environ 300-400 mm), la température moyenne annuelle est de (+ 15°C) avec un minimum de (- 5°C) en hiver et un maximum allant jusqu'à (+ 45°C) en été [10].

IV.6. Aperçu sur l'exploitation du gisement de Boukhadra

Le gisement de fer de Boukhadra est un important gisement. La qualité de son minerai, ses réserves en catégorie industrielles et ses paramètres techniques d'ouverture lui confèrent un caractère prioritaire et stratégique quant à l'exploitation et le traitement de son minerai.

IV.6.1. Les réserves géologiques

Les réserves en minerai de fer de la mine de Boukhadra s'élèvent à 50 millions de tonnes avec une teneur moyenne en fer supérieure à 50%. L'allure générale des corps minéralisés et leurs dimensions sont très variables. Ils sont représentés par quatre grands corps et quelques petites veines de moindre importance, qui se joignent dans la partie occidentale, pour former un seul corps minier.

Sur la base des travaux d'exploitations de la mine, on distingue deux principaux gîtes dans le gisement de Boukhadra [10].

a. Gîte principal : le gîte principal est constitué de deux grands filons : Nord et médian et deux petites veines qui se joignent ensemble en un grand corps c'est le corps principal. Il est caractérisé par une longueur de 250 à 300 m, une largeur de 100 m, allant vraie semblablement jusqu'au niveau sidéritique qui se trouverait à une altitude de 820 m, soit à quelques mètres sous le niveau le plus bas de la carrière.

Ce corps stratoïde, représente la racine des autres corps minéralisés, et il est situé dans la partie W du gisement. La concordance des corps minéralisés n'est apparente qu'à une échelle hectométrique, dans le détail les limites du minerai sont sécantes et discordant sur les strates aptiennes [10].

b. Gîte Sud : le gîte Sud se présente sous la forme d'un filon. Il change de direction trois fois, et rejoignant le gîte principal dans sa partie centrale. La position de ces corps (principal, Nord, médian et Sud) par rapport à l'encaissant est particulièrement bien visible au niveau de la carrière principale.

La prospection détaillée du gisement a été réalisée durant les années 50 et 70 par les ouvrages miniers et des sondages de profondeur moyenne, les ouvrages de prospection sont répartis sur 09 niveaux (825...1285). Selon la première estimation des réserves réalisées en 1981 par la D.E.D basée sur les résultats de prospection, les réserves globales sont de 57 millions divisées en trois parties (corps) :

- Corps Nord.
- Corps Médian.
- Corps Sud.

Les trois corps sont bien prospectés à partir de la coupe 108 sur l'axe principal (corps Nord et Médian), les réserves sont en cours d'exploitation par la méthode à ciel ouvert (carrière principale et BK II).

L'exploitation souterraine est concentrée sur la partie Sud du gisement (corps Sud), les réserves sont réparties sur trois axes :

- Axe principal.
- Axe Sud – Est.
- Axe Nord.

Une partie de ces réserves situées sur l'axe principal et l'axe Sud – Est dont l'exploitation initiale est prévue par la méthode souterraine, serait extraite par la méthode à ciel ouvert (carrière BK II jusqu'au niveau 1135), ceci compte nu du taux de découverte avantageux et de la morphologie du relief [10].

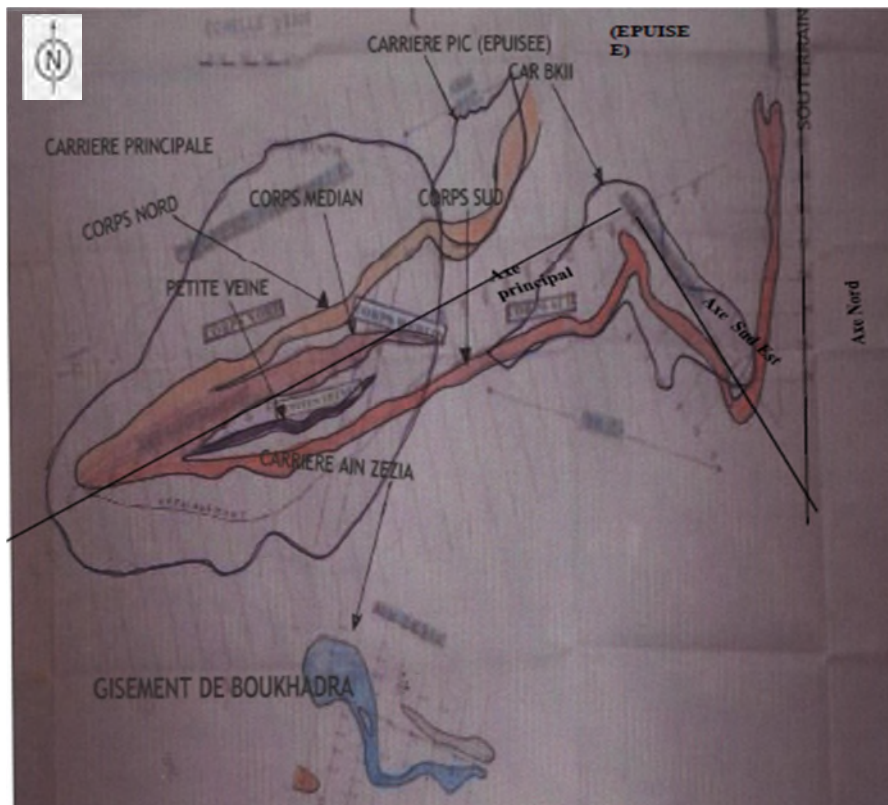


Figure IV.5. Carte des réserves géologiques de gisement de Boukhadra [10].

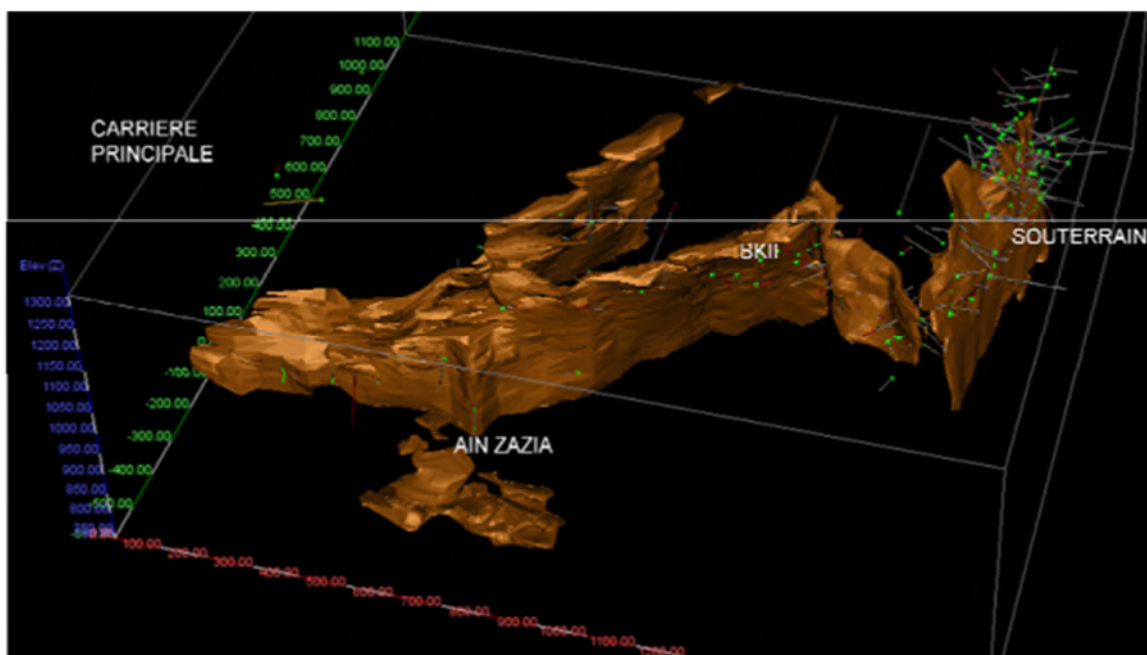


Figure IV.6. Modélisation en 3D du gisement de Boukhadra [15].

Le minerai exploité est constitué principalement d'hématite, le constituant majeur du minerai, goethite et autres ocres limnétiques. Il est issu de l'oxydation du minerai carbonaté, maintenant restreint à la zone située sous le niveau hydrostatique.

Le tableau ci-après représente les différents éléments chimiques constitutifs de la minéralisation du gisement de Boukhadra.

Tableau IV.1. Les éléments chimiques constitutifs de la minéralisation du gisement de Boukhadra.

Eléments	%
Manganèse (Mn)	2,0-3,0
Phosphore Fluor (P.F)	6-10
Cuivre (Cu)	Trace
oxyde de calcium (Cao)	3,5-8
Oxyde de magnésium (MgO)	0,2 – 0,40
Soufre (S)	0,04-0,10
Oxyde de d'aluminium (A ₂ O ₃)	0,5 -0,3
Oxyde de sodium et potassium (Na ₂ O) +(K ₂ O)	0,05 – 0,3
Phosphore (P)	0,002 – 0,01
Oxyde de silicium (SiO ₂)	6-9
Humidité (H ₂ O)	2-6
Plomb (Pb)	0,005 – 0 ,02
Zinc (Zn)	<0 ,01

IV.6.2. Méthodes et paramètres d'exploitation

Le minerai exploité est du fer sous forme d'oxyde de fer montré par l'hématite rouge (Fe₂O₃) présente en abondance dans ce gisement avec une teneur moyenne de 54% de fer. Le gisement est de forme ventriculaire, dont la genèse est hydrothermale ou sédimentaire, d'une longueur de 900 à 2200 m et d'une puissance variant de 10 à 15 m [15].

Le minerai est exploité par deux méthodes d'exploitation :

- Exploitation à ciel ouvert.
- Exploitation souterraine.

IV.6.2.1. Exploitation à ciel ouvert

L'ouverture du champs de la carrière consiste au creusement d'excavation à ciel ouvert appelée demi-tranchée, afin de permettre l'accès au gîte à partir de la surface et assurer le lien de transport entre les horizons en activité de la carrière et les points de déchargements à la surface en d'autre terme réalisation des demi-tranchées d'accès de découpage qui constituent le point de départ de la formation des gradins .

- Le Djebel de Boukhadra étant un relief montagneux exploité par des demi-tranchées.

- L'abattage de la matière s'opère de haut en bas suivant les gradins et les talus garantissant la stabilité lors des travaux d'abattage.
- La technique d'extraction utilisée est celle de forage et de tir.
- La méthode d'exploitation à ciel ouvert est appliquée sur les trois sites suivant :
 - ✓ Carrière Pic : épuisée.
 - ✓ Carrière Principale : les travaux d'exploitation sont arrêtés et ils ont procédé à des travaux de développement.
 - ✓ Carrière BKII : elle est en développement.

a. Creusement de la demi-tranchée d'accès

Pour les gîtes de Boukhadra de relief montagneux, la tranchée d'accès est disposée sur le flanc de coteau représentant une demi-tranchée, d'après les caractéristiques du gisement (roches dures, relief montagneux). Les travaux de forage sont réalisés à l'aide d'un chariot de forage après on procède le chargement des trous par l'explosif, ensuite l'évacuation des charges abattues par bulldozer afin de créer une plate-forme (3 à 4 m) [15].

b. Les principaux paramètres de l'exploitation à ciel ouvert

Tableau IV.2. Les principaux paramètres de l'exploitation à ciel ouvert.

Designation	Unités	Symboles	Valeurs	
Hauteur du gradin	(m)	H_g	15	7,5
Longueur de trou	(m)	L_t	16,5	8,5
Diamètre de trou	(mm)	D	165	165
Ligne de moindre résistance	(m)	W	04	04
Distance entre les trous	(m)	a	04	04
Distance entre les rangées	(m)	b	04	04
Sous-foration (excès de forage)	(m)	L_{sf}	1,5	0,5-01
Longueur de bourrage	(m)	L_b	5,5	03
Longueur de la charge	(m)	L_{ch}	11	5,5
Inclinaison de trou	(degré)	β	90°	90°
Inclinaison de talus	(degré)	α	80° - 85°	80° - 85°
Charge d'un trou	(kg)	Q_c	125	62,5
Nombre de trous total	-	N_t	20	40
Consommation spécifique stérile	(g/t)	Q_{sp}	208	208
Consommation spécifique minerai	(g/t)	Q_{sp}	200	189
Type d'amorçage	-	Electrique	-	-
Quantité d'explosif ANFOMIL	(kg)	Q_{ANFO}	2000	
Quantité d'explosif MARMANIT	(kg)	Q_{MAR}	500	
Cordeau détonant (12g)	(m)	-	500	

c. Chargement et transport

Le chargement est opéré à l'aide de pelles hydrauliques et de chargeuses sur pneus de type de capacité respective 5.5 et 6,5 m³ de godet.

Le transport des masses abattues s'effectue au moyen des camions de 50 et 60 Tonnes de capacité. Le minerai est transporté vers le concasseur et le stérile vers les décharges [15].



Figure IV.7. L'opération de chargement et de transport [15].

IV.6.2.2. Exploitation souterraine

La méthode appliquée est la méthode du sous niveau abattu dont l'ouverture est faite par des galeries au jour.

L'exploitation souterraine est effectuée suivant trois axes :

- Axe Nord.
- Axe Principal.
- Axe Sud Est.

Phases épuisées (1185-1165), (1165-1145), (1145-1125).

Phase en cours d'exploitation (1125-1105).

Le tableau ci-dessous donne les profondeurs moyennes et angle de pendage du gîte exploité en souterrain :

Tableau IV.3. Profondeurs moyennes et angles de pendages du gîte exploité en souterrain.

	Profondeur (m)	Angle de pendage (°)
Axe Nord	391	60
Axe Sud Est	320	54
Axe Principal	215	54

Les types d'ouvrages souterrains sont :

- ✓ Verticaux (cheminées).
- ✓ inclinés (montages, descenderies).
- ✓ horizontaux (galeries au jour).

Actuellement l'exploitation souterraine se fait au niveau 1105 (axe principal) (Sud-Ouest). L'accès (Sud-Est) du niveau 1105 a été abandonné suite aux éboulements qui s'y trouvent.

Les dimensions de la galerie sont représentées sur le tableau ci-dessous.

Tableau IV.4. Les dimensions de la galerie principale du niveau 1105.

Largeur moyenne (m)	4
Hauteur moyenne (m)	3,5
Section (m ²)	12-13
Longueur (m)	900

IV.6.2.3. Ouverture du gisement de Boukhadra

L'ouverture est le creusement des ouvrages miniers donnant l'accès au gîte à partir du jour. Principalement, ces ouvrages doivent assurer dans les meilleures conditions techniques et économiques les processus suivants :

- a) La circulation d'air (aéragé)
- b) Le transport :
 - des charges (minerai et roches stériles) ;
 - du personnel ainsi que du matériel.

Le mode d'ouverture dépend essentiellement des facteurs :

- Forme et disposition du gîte.
- Conditions géographiques, géologiques et topographiques du gisement.

Le gisement de Boukhadra est considéré comme dressant, il est situé dans un relief montagneux, par conséquent le mode d'ouverture convenant est galerie au jour [15].

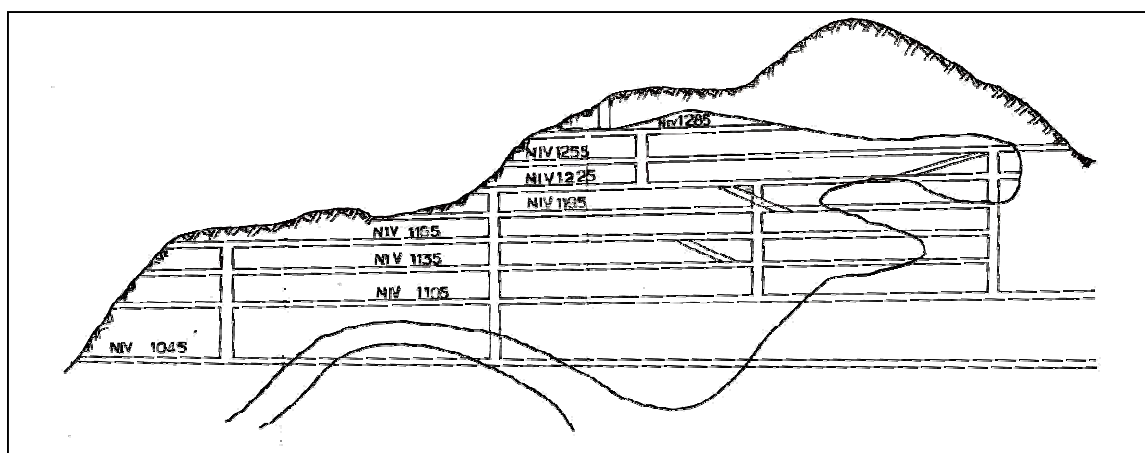


Figure IV.8. Coupe schématique du mode d'ouverture en souterrain [15].

a. Les travaux préparatoires

Les travaux préparatoires comprennent toutes les excavations nécessaires à la mise en place des infrastructures de production et pour assurer la continuité des opérations au cours de la phase d'exploitation. Les principaux ouvrages, réalisés par foration, tir à l'explosif et déblocage, sont les puits, les galeries, les plans inclinés et les cheminées verticales ou inclinées.

- **Le percement des galeries** : Une galerie est une voie de communication horizontale servant au transport du minerai et des stériles; son percement fait partie des travaux préparatoires courants. Dans les exploitations mécanisées, l'abattage de la roche se fait à l'aide de jumbos de foration à deux bras orientables portant des perforatrices électro-hydrauliques. La section des galeries dans notre cas est généralement de 13 m², et les trous de mine sont forés à 1,6 m de profondeur. Les trous de mine sont chargés d'une quantité appropriée d'explosif en vrac. L'amorçage est assuré par des détonateurs électriques à micro-retard.

- **Le creusement des cheminées** : Une cheminée, ou montage, est une voie verticale ou très inclinée servant à la circulation du personnel, du matériel, du minerai ou de l'air entre différents niveaux de la mine. Le creusement des cheminées est une tâche difficile et dangereuse, mais indispensable. Les méthodes utilisées vont du creusement manuel, par foration de trous au marteau perforateur et tir à l'explosif.

b. Chargement et transport

Le chargement de minerai au niveau des blocs d'exploitation sont assurés par des pelles chargeuses de capacité 3.8m³ de godet.

Le transport du minerai du fond vers le jour à partir du niveau base de roulage est assuré par les camions navettes de 20 tonnes de capacité.



Figure IV.9. L'opération de chargement et de transport dans le fonds [15].

IV.7. Conclusion

La nature sédimentaire du terrain étudié fait qu'il existe une anisotropie très marquée liée à leur dépôt, cette anisotropie caractérisant donc la matrice rocheuse, est souvent désignée par des joints de stratification qui forment des plans de glissement naturels.

Les deux phases tectoniques qui ont marqué la zone de Boukhadra ont causé plusieurs failles et fissures ce qui crée des difficultés pour l'exploitation et on remarque cela surtout à l'axe nord qui est situé dans une zone tectonique de broyage.

Le gisement de Boukhadra est exploité en souterrain et à ciel ouvert, nous intéressons dans cet étude au niveau 1105, (niveau intermédiaire entre le ciel-ouvert et le souterrain, l'axe principale /l'axe Sud-Est de la carrière BK II), L'ouverture du gisement à ciel ouvert est assurée par des demi-tranchées avec des gradins de hauteurs variables allant de 7,5-15 m et l'exploitation souterrain dans ce niveau est faite par la méthode de sous niveau abattue.

L'étude des caractéristiques concernant les conditions géologiques, hydrogéologiques et les paramètres d'exploitation de gisement de Boukhadra ont permis d'obtenir une image aussi complète que possible sur les caractéristiques des massifs rocheux traversés afin d'évaluer leurs stabilité.

Chapitre V

**Caractérisation et
classification géomécaniques
du massif de Boukhadra**

Chapitre V : caractérisation et classification géomécaniques du massif de Boukhadra

V.1. Introduction

Dans ce chapitre et dans le cadre de la caractérisation du massif rocheux du Djebel de Boukhadra, On a procédé en premier lieu, à classier notre massif selon la résistance à la compression et à la traction (essais brésilien) des différentes couches qui le constituent. Ensuite nous avons présenté l'application des systèmes de classification empiriques (ou géomécaniques) sur notre site ce qui nous a permis d'avoir une connaissance plus précise du massif et pourquoi pas l'établissement des résultats dans l'étude de stabilité des terrains.

V.2. Les propriétés physico-mécaniques des terrains

La caractérisation d'un massif rocheux conduit en premier lieu à déterminer les propriétés physico-mécaniques relatives à la roche intacte du massif. Dans notre cas, ces paramètres ont été relevés à la base des données disponibles et communiquées par l'entreprise à l'exception de la résistance à la compression R_c dont nous avons personnellement pris le soin d'en déterminer les valeurs pour les différentes couches.

Les propriétés physico-mécaniques du Djebel de Boukhadra sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.1. Les propriétés physico-mécaniques des différentes couches du Djebel de Boukhadra

Propriétés	Unités de mesure	Marne grise	Marne jaune	Marne minéralisée	Minerai de fer	Calcaire
Masse volumique saturée (ρ_{sat})	g/cm ³	2,7	2,6	2,5	2,9	2,65
Masse volumique insaturée (ρ_{unsat})	g/cm ³	2,3	2,2	2,4	2,7	2,6
Cohésion (c)	bar	2,7	0,33	2,6	3,2	3,5
Angle de frottement interne(ϕ)	Degré	35	23	40	45	50
Module de young E	GPa	4,47	4,47	4,47	21	19,84
Coefficient de poisson (ν)	/	0,35	0,33	0,3	0,25	0,22
Dureté	/	4	3	3	5	7

V.2.1. La Résistance à la compression

En vue de la détermination de la résistance à la compression des différentes formations rocheuses principales rencontrées dans le massif rocheux de Boukhadra, 15 échantillons ont été testés au laboratoire dont les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

La préparation des éprouvettes s'effectue au laboratoire des travaux publics LTP Est (Arrière port, Bejaia) et la réalisation des essais effectués au laboratoire technique des nouvelles constructions SNC LTNC NAOUI & CIE (BERCHICHE, EL KSEUR, BEJAIA).

Tableau V.2. Résistance à la compression de la marne grise.

Roche	L'échantillon	Dimension (mm)		Elancement	Resistance		Resistance moyenne RC(MPa)
		D	H		H/D	Charge(KN)	
Marne Grise	Echantillon N°01	52	104	2	25	11,77	14,13
	Echantillon N°02	52	104	2	35	16,48	
	Echantillon N°03	52	104	2	30	14,13	

Tableau V.3. Résistance à la compression de la marne jaune.

Roche	L'échantillon	Dimension (mm)		Elancement	Resistance		Resistance moyenne RC(MPa)
		D	H		H/D	Charge(KN)	
Marne jaune	Echantillon N°01	52	104	2	25	11,77	16,67
	Echantillon N°02	51	102	2	30	14,69	
	Echantillon N°03	52	104	2	50	23,54	

Tableau V.4. Résistance à la compression de la marne minéralisée.

Roche	L'échantillon	Dimension (mm)		Elancement	Resistance		Resistance moyenne RC(MPa)
		D	H		H/D	Charge(KN)	
Marne minéralisée	Echantillon N°01	52	104	2	45	21,19	20
	Echantillon N°02	52	104	2	46	21,69	
	Echantillon N°03	51	102	2	35	17,13	

Tableau V.5. Résistance à la compression de minerai de fer.

Roche	L'échantillon	Dimension (mm)		Elancement	Resistance		Resistance moyenne RC(MPa)
		D	H		H/D	Charge(KN)	
Minerai de fer	Echantillon N°01	52	104	2	112 ,15	52,90	53,73
	Echantillon N°02	52	104	2	100	47 ,09	
	Echantillon N°03	52	104	2	130	61,21	

Tableau V.6. Résistance à la compression du calcaire.

Roche	L'échantillon	Dimension (mm)		Elancement	Resistance		Resistance moyenne RC(MPa)
		D	H		H/D	Charge(KN)	
calcaire	Echantillon N°01	51	102	2	100	48,95	46,83
	Echantillon N°02	51	102	2	90	44,06	
	Echantillon N°03	52	104	2	97	47,48	

Tableau V.7. Classification du massif rocheux du Djebel de Boukhadra en fonction de la résistance à la compression.

Roches	R_c(MPa)	Qualité de la roche
Marne grise	14	Moyenne
Marne jaune	17	Moyenne
Marne minéralisée	20	Moyenne
Minerai de fer	54	Résistante
Calcaire	47	Résistante

➤ **Synthèse et conclusion**

D'après les résultats obtenus dans les tableaux ci-dessus, on constate que les différents types de marne (marne grise, marne jaune et marne minéralisée) sont classés comme étant une roche moyennement résistante, bien que le minerai de fer et le calcaire sont classés comme étant une roche résistante.

V.2.2.La Résistance à la traction

La résistance à la traction (essais brésilien) n'a pas pu être déterminée au laboratoire par manque d'appareil de mesure. Nous avons utilisé la relation empirique entre la résistance à la traction et à la compression.

$$R_t = (0,08 \div 0,12) * R_c \quad (V.1)$$

$$\text{On prend} \quad R_t = 0,1 * R_c \quad (V.2)$$

Avec :

R_t : la résistance à la traction (MPa) ;

R_c : la résistance à la compression moyenne (MPa).

Les résultats de calcul sont donnés dans le tableau V.8.

Tableau V.8.classification du massif rocheux du Djebel de Boukhadra en fonction de la résistance à la traction.

Roches	R_t(MPa)	Qualité de la roche
Marne grise	1,4	Moyenne
Marne jaune	1,7	Moyenne
Marne minéralisée	2	Moyenne
Minerai de fer	5,4	Résistante
Calcaire	4,7	Résistante

V.3. Classification géomécaniques du massif rocheux de Boukhadra

V.3.1.Classification RQD

Dans le but de la reconnaissance géologique des terrains ou bien l'identification de leurs nature géotechnique (Etat de fracturation, RQD, caractérisation mécanique,...etc.) des sondages d'exploration ont été réalisé sur le site de Boukhadra.

Les valeurs du RQD pour les sondages réalisé sur le site d'étude nous ont été communiquées pas l'entreprise ArcelorMittal, les valeurs obtenues pour les différentes couches de massifs sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.9. RQD des différentes couches.

Roches	RQD (%)	Qualité de la roche
Marne jaune	55	Moyenne
Marne grise	58	Moyenne
Marne minéralisée	60	Moyenne
Calcaire	78	Bonne
Minerai de fer	75	Bonne

➤ **Synthèse et conclusion**

D'après l'analyse du paramètre RQD, on constate que le massif est formé principalement par cinq couches (marne jaune, marne grise, marne minéralisée, calcaire et minerai de fer) dont la qualité varie de moyenne à bonne.

V.3.2. Classification RMR

En utilisant les observations des différentes formations rocheuses rencontrées sur terrain et les résultats obtenus par les analyses de laboratoire et de la thèse de M^r GADRI comme la nature et l'espacement des joints, on a attribué une note à chacun des paramètres dont se base la classification du RMR.

Le RMR a été estimé pour les différentes couches constituant le massif rocheux dans sa globalité de la manière suivante :

Tableau V.10. Classification RMR de la couche de la marne jaune.

Couches	Marne jaune					
Paramètre	R_c(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	17	55	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Eponte altérées	0,6-2 m	Complètement sec	60
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	50-75				
Note	2	13	15	15	15	

Tableau V.11. Classification RMR de la couche de la marne grise.

Couches	Marne grise					
Paramètre	R_c(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	14	58	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Eponte altérées	0,6-2 m	Complètement Sec	60
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	50-75				
Note	2	13	15	15	15	

Tableau V.12. Classification RMR de la couche de la marne minéralisé.

Couches	Marne minéralisé					
Paramètre	R_c(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	20	60	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Eponte altérées	0,6-2 m	Complètement sec	60
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	50-75				
Note	2	13	15	15	15	

Tableau V.13. Classification RMR de la couche de minerai de fer.

Couches	Minerai de fer					
Paramètre	R _c (MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	54	75	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Epointe non altérées	0,6-2 m	Complètement Sec	79
Valeurs extrêmes de la classification	50-100	75-90				
Note	7	17	25	15	15	

Tableau V.14. Classification RMR de la couche du calcaire.

Couches	Calcaire					
Paramètre	R _c (MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	47	78	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Epointe non altérées	0,6-2 m	Complètement Sec	76
Valeurs extrêmes de la classification	25-50	75-90				
Note	4	17	25	15	15	

Tableau V.15. Classification RMR du massif rocheux du Djebel de Boukhadra.

Les couches	RMR de base	Classe du massif Rocheux	Description du massif rocheux
Marne jaune	60	III	Rocher moyen
Marne grise	60	III	Rocher moyen
Marne minéralise	60	III	Rocher moyen
Minerai de fer	79	II	Bon rocher
Calcaire	76	II	Bon rocher

➤ **Synthèse et conclusion**

D'après les résultats du RMR de base, on déduit que les couches du calcaire et de minerai de fer ont une bonne qualité. En revanche, les autres couches de marnes sont de qualité moyenne.

V.3.3. Classification GSI

L'estimation de la valeur de GSI se base sur le critère de Hoek et Brown qui s'appuie sur une observation directe de la structure du massif rocheux (voir annexes 04).

Le GSI se détermine comme suit :

$$GSI = RMR'_{89} - 5 \quad \text{si } RMR'_{89} > 23 \quad (V.3)$$

$$GSI = 9 (\log Q' + 44) \quad \text{si } RMR'_{89} < 23 \quad (V.4)$$

$$RMR_{89} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B \quad (V.5)$$

Le RMR'89 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).

$$RMR'_{89} = A1 + A2 + A3 + A4 + 15 \quad (V.6)$$

Dans notre cas le RMR'89 = RMR de base

Tableau V.16. Classification GSI du massif rocheux du Djebel de Boukhadra.

Les couches	RMR de base	GSI	Description du massif rocheux
Marne jaune	60	55	Rocher moyen
Marne grise	60	55	Rocher moyen
Marne minéralisée	60	55	Rocher moyen
Minerai de fer	79	75	Bon rocher
Calcaire	76	70	Bon rocher

➤ **Synthèse et conclusion**

D'après les résultats du GSI, on déduit que les couches du calcaire et de minerai de fer ont une bonne qualité. En revanche, les autres couches de marnes sont de qualité moyenne.

V.3.4. Classification Q-système

Tableau V.17. Classification Q-système du massif rocheux du Djebel de Boukhadra.

Paramètres	Marne Jaune	Marne Grise	Marne minéralisé	Minerai de Fer	Calcaire
RQD	55	58	60	75	78
Jn	2	2	2	2	2
Jr	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Ja	2	2	2	1	1
Jw	1	1	1	1	1
SRF	5	5	5	5	5
Q	4,13	4,35	4,5	11,25	11,70
Qualité du massif rocheux	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Bonne	Bonne

➤ Synthèse et conclusion

D'après les résultats du Q-système, on déduit que les couches du calcaire et de minerai de fer ont une bonne qualité. En revanche, les autres couches de marnes sont de qualité moyenne.

V.4. Conclusion

La caractérisation du massif rocheux de Boukhadra nous a permis de faire les constatations suivantes :

- Selon la résistance à la compression et à la traction (essais brésilien) , On a déduit qu'on a affaire à des roches moyennement résistantes pour tous les types de marnes et des roches de bonne résistance pour le minerai de fer ainsi que pour le calcaire.
- Les valeurs du RQD (Rock Quality Designation), varient entre 55% et 78% en fonction des couches constituant le massif, estimant que la qualité est moyenne pour les marnes, bonne pour le calcaire et le minerai de fer.
- La méthode de classification RMR (Rock Mass Rating) classe le massif comme étant celui formé de roches de qualité moyenne pour les marnes à bonne pour le calcaire et le minerai de fer.
- L'eau n'a pas d'influence dans la mine de Boukhadra parce que le niveau hydrostatique est en dessous de la zone d'exploitation.
- Les autres systèmes (GSI, Q-Système) ont confirmés les constatations des autres classifications concernant la qualité du massif rocheux.
- Vue la non disponibilité du matériel et d'essais nous n'avons pu élaborer d'autre caractérisation comme l'étude stéréographique et même on n'a pas pu élaborer la classification SMR de notre site.

Conclusion générale

Conclusion générale

La caractérisation d'un massif dans les mines est une approche importante pour mettre des remèdes aux problèmes de stabilité soit des talus des mines à ciel ouvert ou des toits des galeries des mines souterraines, cette caractérisation a une influence directe sur la sécurité ainsi que la production de la mine.

Ce travail nous a permis d'identifier d'une manière détaillée un massif rocheux ainsi que ces facteurs géologiques et géotechniques, sa fracturation et les propriétés physiques et mécaniques des roches qui le constituent; ces derniers sont des paramètres importants pour une caractérisation complète de notre massif.

Après la caractérisation on est passé à l'étape de classification du massif par les différents systèmes de classification afin de donner une estimation quantitative et qualitative sur la situation du massif et avoir une note concernant la qualité de ce dernier.

La mine de fer de Boukhadra représente l'une des richesses de l'Algérie ; dans le but de sa préservation et dans le cadre de développement durable, une prévention de déstabilisation des masses rocheuses et une approche importante pour garantir le bon fonctionnement de la mine. Pour cela, la caractérisation de massif de la mine qui constitue la détermination des propriétés physiques et mécaniques au laboratoire et in-situ est une phase importante avant d'estimer la stabilité des différents ouvrages miniers, cette caractérisation représente une pré-analyse des problèmes liés à la stabilité.

D'après les essais effectués au laboratoire de la résistance à la compression on a constaté que le massif de Boukhadra est classé comme moyennement résistant pour les couches de marnes bien qu'il est résistant pour les couches du calcaire et de minerai de fer. Ces constatations sont les mêmes pour la résistance à la traction.

La classification semi-empiriques, établies à la base des observations sur terrains menées par l'entreprise et nous même, que se soit RQD, RMR..., On déduit que la qualité de massif de Boukhadra varie en fonction des différentes couches de bon pour le minerai de fer et le calcaire à moyen pour les marnes.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Abdelouahed T., [1992], « Modélisation des massifs rocheux fissurés par la méthode des éléments distincts », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées en géologie de l'ingénieur.
- [2] AFTES., [2003], « Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et la réalisation des ouvrages souterrains ».
- [3] Alhoushi H., [2009], « Renforcement des massifs rocheux fissurés par ancrages : cas de massif rocheux de Boukhadra », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de l'ingénieur d'état en géotechnique, Université de Tébessa.
- [4] Amrani S., [2011], « Etude de stabilité des talus de la carrière de Mefteh (Blida) », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier, Ecole nationale polytechnique Alger, 112 pages.
- [5] Barton N. et Choubey V., [1977], « The shear strength of rock joints in theory and practice », Edition Rock Mech.
- [6] Baud J.P et Gambien M., [2011], « Classification des sols et des roches à partir d'essais d'expansion cylindrique en haute pression », France, 326 pages.
- [7] Boucif R. et Tamourt M., [2015], « Etude de stabilité du flanc Nord de la mine de kef Essnoun- Tébessa », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master, Université Abderahmane Mira de Bejaia, 148 pages.
- [8] Chalhoub M., [2006], « Apport des méthodes d'homogénéisation numérique à la classification des massifs rocheux fracturés », Thèse de doctorat 2006, Ecole Nationale des mines de Paris, 206 pages.
- [9] Chenafa W. et M'zoughem K., [2006], « Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain el kebira (Sétif) », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en géologie, Université de Ferhat Abbas de Sétif, 68 pages.
- [10] Dubourdieu., [1956], « Etude géologique de la région de Boukhadra et L'Ouenza ».
- [11] Duffaut P. et Homand F., [2000], « Manuel de mécanique des roches », Tome 1 : fondements, Comité français de mécanique des roches, 87 pages.
- [12] Gadri L., [2012], « Etude de la déformation et de la rupture des massifs fissurés par la méthode des éléments finis », Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat, université Badji Mokhetar, Annaba, 127 pages.

- [13] Hudson J.A., [1993], « Comprehensive rock engineering-principales, practice and projects », rock Testing and Site Characterization, Oxford, vol 3.
- [14] 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, 163 pages.
- [15] Mine de Boukhadra., [2014], « Etude géologique de la région de Boukhadra et L'Ouenza ».
- [16] Sanat A.et Zidani N., [2015], « Etude de stabilité des talus de la carrière d'Ain El Kebira (Wilaya de Sétif) vis -à-vis un glissement circulaire », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master, Université Abderahmane Mira de Bejaïa.
- [17] Schroeder Ch., [2010], « Etude de stabilité des parois rocheuses », Revenue de société Belge de géologie de l'ingénieur et de mécanique des roches (SBGIMR), 90 pages.
- [18] Thi Thanh Nhan Hoang, [2010], « Etude du comportement d'un milieu rocheux fracturé : Application à la réalisation du tunnel de St Beat. Other. », Ecole des ponts Paristech, France, 273 pages.
- [19] Zhao J., [2008], « Mécanique et propriétés des massifs », part 2 , cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [20] Zhao J., [2008], « Propriétés des discontinuités », part 3, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [21] Zhao J., [2008], « Propriétés du massif rocheux et classifications », part 4, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [22] Zhao J., [2007], « Roches et massifs rocheux », part 1, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.

Annexes

Annexe 01 : Caractérisation du massif suivant Q-système.

Annexe 01.A : Paramètre J_r (paramètre de rugosité des joints), (Barton et al. 1974).

(a) Epontes en contact (b) Epontes en contact après cisaillement de moins de 10 cm	J_r	(c) Epontes hors contact après cisaillement	J_r
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) $J_r = 0,5$ si les joints plans et striés comportent des linéations orientées de telle sorte qu'elles peuvent amorcer une rupture.</p>	

Annexe 01.B : Paramètre Ja (paramètre d'altération des joints), (Barton et al 1974).

	Caractère du joint		Conditions	Ja
	Epontes en contact	Joints propres	Joint serré, recimenté	Remplissage de quartz, épidote,...etc.
Epontes non altérées			Pas d'enduit.	1
Epontes 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
Epontes 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	
Epontes séparées	Condition d'éponte	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		

Annexe 01.C : Paramètre J_w (paramètre hydraulique), (Barton et al, 1974).

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 du 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 avec le temps	0,1 -0,05	> 10,0

Note :

(i) 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 ;

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

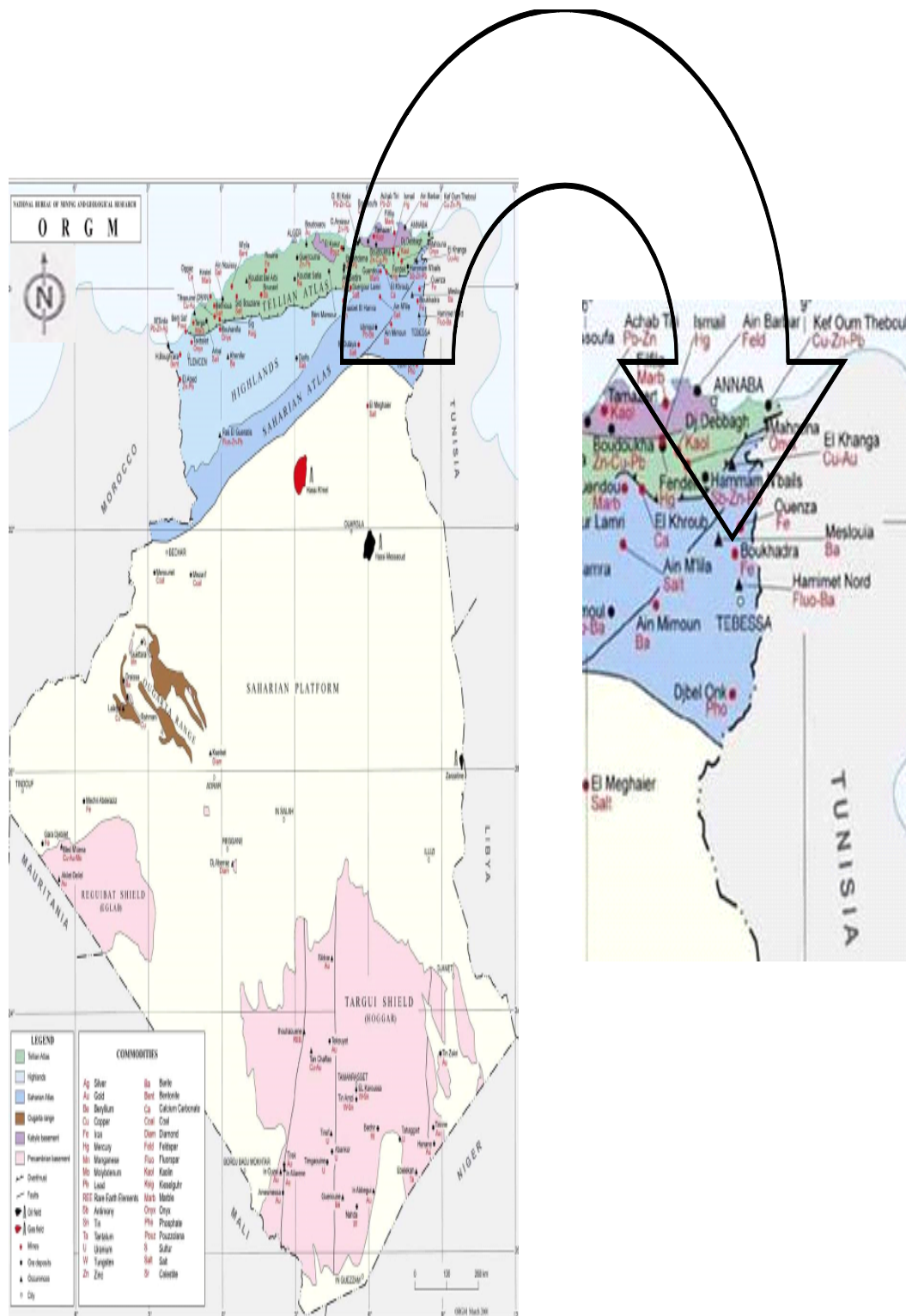
Annexe 01.D : Paramètre de J_n (nombre de famille de discontinuités), (Barton et al., 1974)

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
Note :	
1. Pour une intersection, utilisez $3 \times J_n$	
2. Pour un portail, utilisez $2 \times J_n$	

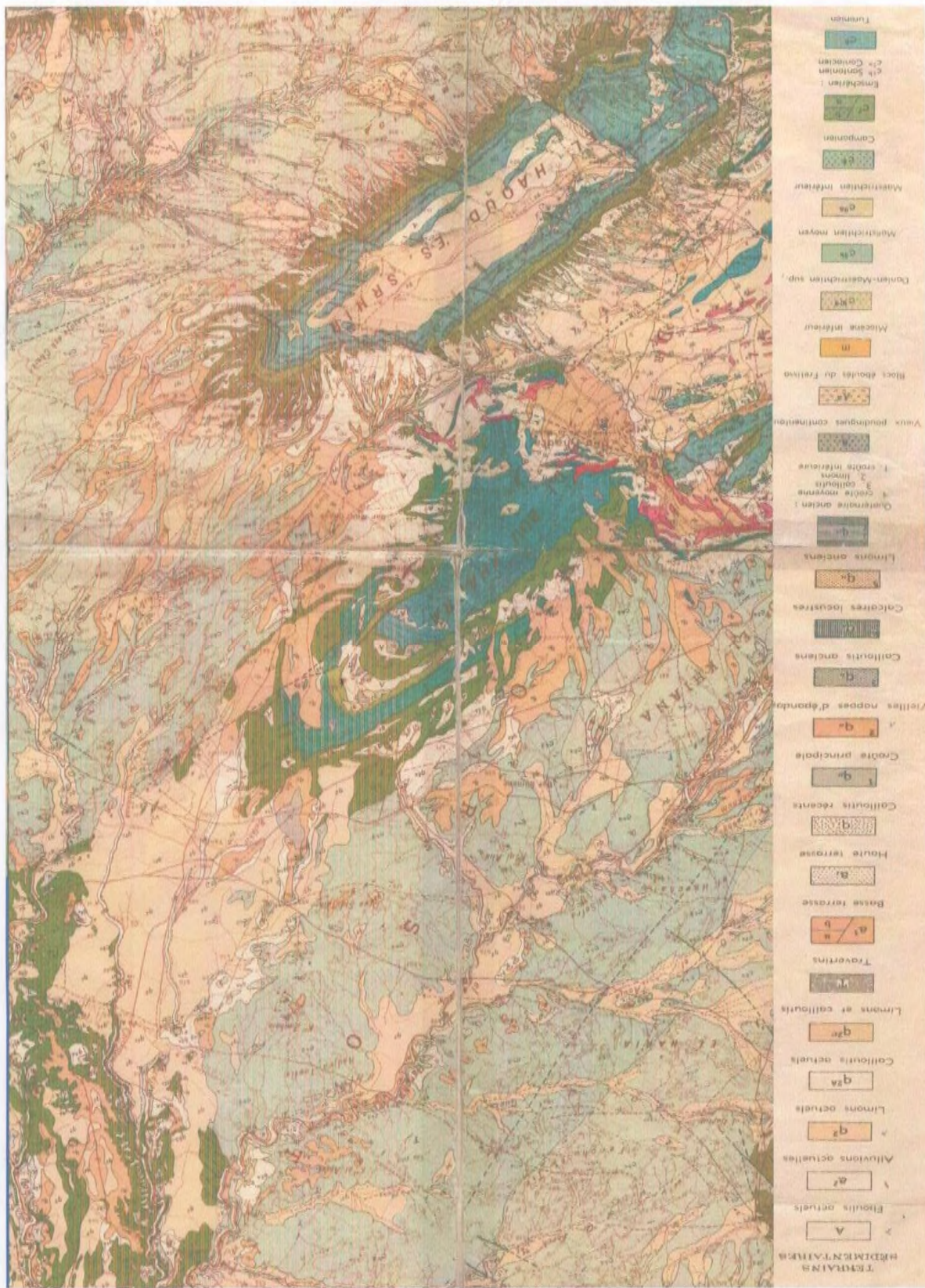
Annexe 01.E : Paramètre de SRF (paramètre de réduction relatif aux contraintes), (Barton et al., 1974).

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 décomposé 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		
	Joint 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 serrée (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 modéré (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:				
(ii) 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 $0,5 \sigma_c$				
(iii) 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

Annexe 02 : Situation géographique de la ville du Boukhadra.

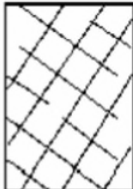
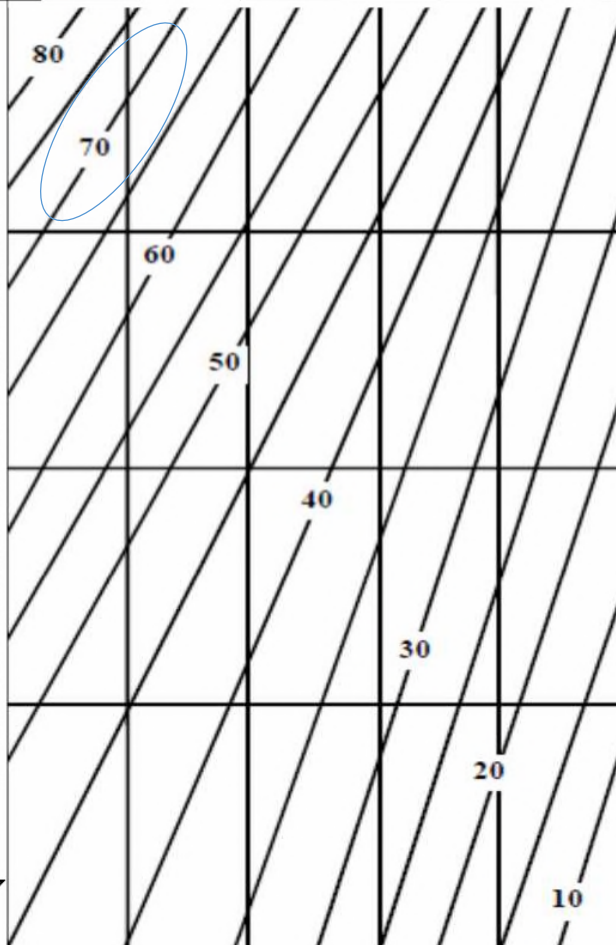





Annexe 03 : Carte géologique de Boukhadra.

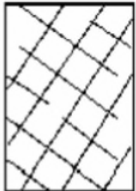
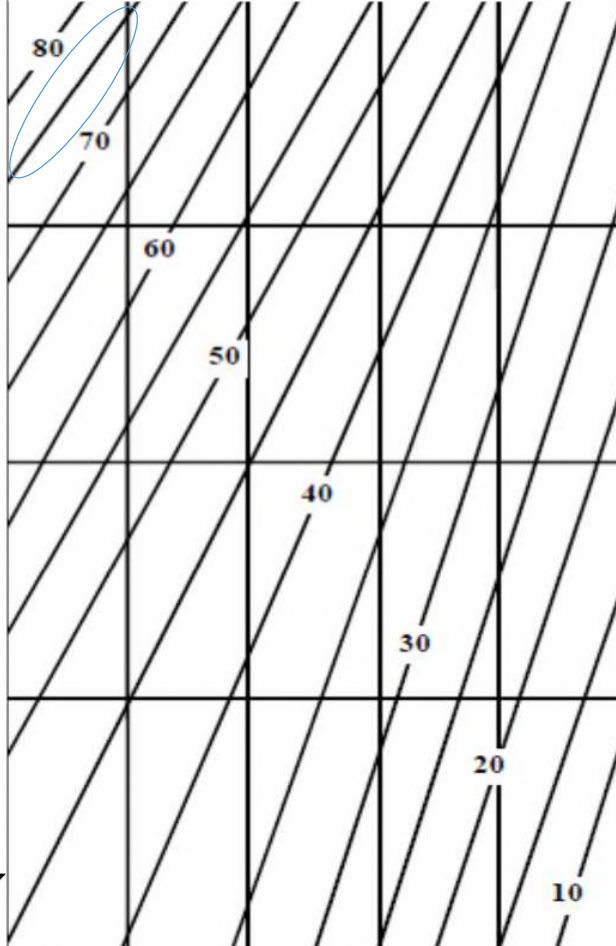





Annexe 04 : Caractérisation du massif suivant le GSI.

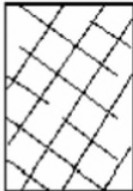
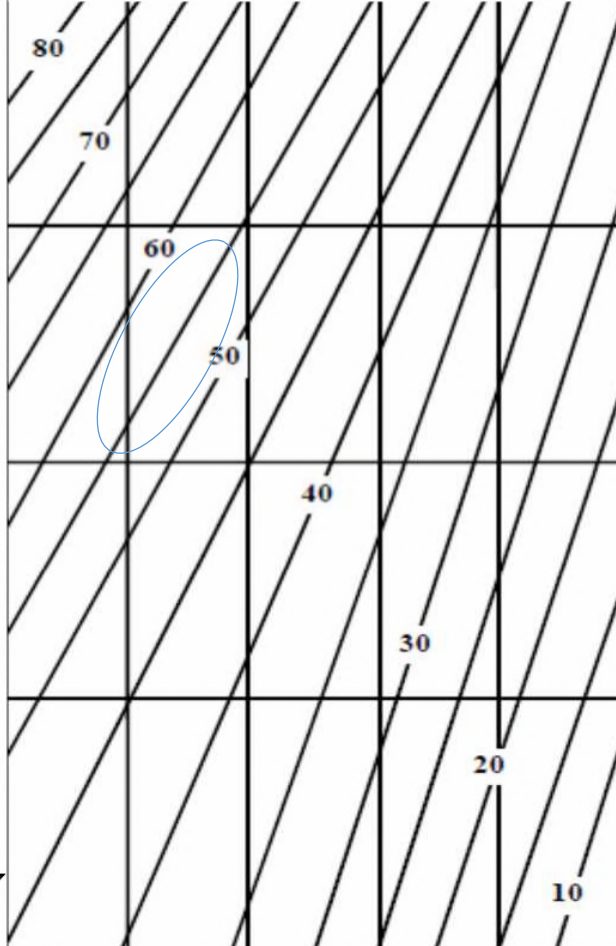



Annexe 04.A : Couche du Calcaire.

<p>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE</p> <p>ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE.</p> <p>A partir de l'apparence de la roche, choisir la catégorie qui donne, selon vous, la meilleure description des conditions moyennes de structure in situ. [...]</p> <p>Le critère de Hoek-Brown devrait uniquement être appliqué à des masses rocheuses dont la taille des blocs individuels est petite devant celle de l'excavation</p> <p>STRUCTURE</p>	<p>CONDITIONS DE SURFACE</p> <p>TRES BONNES Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p>BONNES Surfaces couleur de fer, rugueux et légèrement altérées</p> <p>MOYENNES Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p>PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées Avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p>TRES PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique</p> <p style="text-align: center;">QUALITÉ DÉCROISSANTE →</p>
 <p>FRACTURÉE – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	<p>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DÉCROISSANT ↓</p> 
 <p>TRÈS FRACTURÉE – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre familles de discontinuités orthogonales</p>	
 <p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles</p>	
 <p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>	

Annexe 04.B : Couche de minerai de fer.

<p>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE</p> <p>ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE.</p> <p>A partir de l'apparence de la roche, choisir la catégorie qui donne, selon vous, la meilleure description des conditions moyennes de structure in situ. [...]</p> <p>Le critère de Hoek-Brown devrait uniquement être appliqué à des masses rocheuses dont la taille des blocs individuels est petite devant celle de l'excavation</p> <p>STRUCTURE</p>	<p>CONDITIONS DE SURFACE</p> <p>TRES BONNES Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p>BONNES Surfaces couleur de fer, rugueux et légèrement altérées</p> <p>MOYENNES Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p>PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées Avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p>TRES PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique</p> <p style="text-align: center;">QUALITÉ DÉCROISSANTE →</p>
 <p>FRACTURÉE – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	<p>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DÉCROISSANT ↓</p> 
 <p>TRÈS FRACTURÉE – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre familles de discontinuités orthogonales</p>	
 <p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles</p>	
 <p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>	

Annexe 04.C : Les couches des marnes.

<p>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE</p> <p>ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE.</p> <p>A partir de l'apparence de la roche, choisir la catégorie qui donne, selon vous, la meilleure description des conditions moyennes de structure in situ. [...]</p> <p>Le critère de Hoek-Brown devrait uniquement être appliqué à des masses rocheuses dont la taille des blocs individuels est petite devant celle de l'excavation</p> <p>STRUCTURE</p>	<p>CONDITIONS DE SURFACE</p> <p>TRES BONNES Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p>BONNES Surfaces couleur de fer, rugueux et légèrement altérées</p> <p>MOYENNES Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p>PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées Avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p>TRES PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique</p> <p>QUALITÉ DÉCROISSANTE →</p>
 <p>FRACTURÉE – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	<p>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DÉCROISSANT ↓</p> 
 <p>TRÈS FRACTURÉE – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre familles de discontinuités orthogonales</p>	
 <p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles</p>	
 <p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>	

Résumé

Depuis la création de l'entreprise actuellement ArcelorMittal (filial Boukhadra) l'exploitation se faisait machinalement suivant les besoins économiques, c'est seulement après l'apparition de sinistre ayant coûté la vie à un mineur en 2002 suite à un glissement que dû à l'instabilité des niveaux en activité. Le personnel responsable à l'entreprise, c'est trouvé contraint d'enfin mettre le point sur les propriétés physique et mécanique du massif rocheux afin d'appréhender les problèmes rencontrés à l'actuel et l'éventualité d'une aggravation de ses problèmes sur le futur. De ce fait l'importance du travail exposé par notre mémoire qui vise justement une caractérisation de toutes les propriétés physiques et mécaniques et une classification du massif rocheux de BK. Cette étude menée à bien de notre part est certainement la seule issue capable de curer les problèmes d'instabilité des talus de Boukhadra.

Mots-clefs : caractérisation, propriétés physico-mécaniques, massif rocheux, essais mécaniques, classification, mine de Boukhadra.

Abstract

Since the creation of the company currently ArcelorMittal (filial Boukhadra) The operation was mechanically following the economic needs, It is only after the onset of a disaster having cost the life of a minor in 2002 following a landslide that due to the instability of the levels in activity. The staff responsible to the company, It is found forced to finally put the item on the physical properties and mechanical engineering of the rocky massif in order to apprehend the problems encountered in the current and the possibility of a worsening of its problems on the future. This is the importance of the work outlined by our memory which aims precisely a characterization of all the physical and mechanical properties and a classification of the rock mass of BK. This study carried out on our part is certainly the only outcome capable of parish priest the problems of slope instability of Boukhadra.

Key words: characterization, physico-mechanical properties, massive rock, mechanical tests, classification, mine of Boukhadra.

ملخص

منذ إنشاء المؤسسة الحالية ارسلورميتال فرع بوخضرة، الاستغلال المنجمي يتم عشوائيا حسب الاحتياجات الاقتصادية الذي دفع ثمنه حياة عامل منجمي في 2002، وذلك يرجع إلى الانزلاق الذي حدث لعدم الاستقرار في مستويات الجهة الناشطة. الموظف المسؤول عن الشركة وجد نفسه مضطرا إلى وضع النقاط فوق الحروف من أجل تحديد الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للكتلة الصخرية. و من أجل فهم المشاكل التي تواجه الشركة في الوقت الحالي و احتمال تفاقمها في المستقبل. لذلك الهدف من عرض مذكرتنا تحديد وصف للخصائص الفيزيائية و الميكانيكية و تصنيف الكتلة الصخرية لبوخضرة. و لقد أجريت هذه الدراسة لتأكدنا بان هذا هو المخرج الوحيد القادر على إيقاف مشاكل عدم استقرار منحدرات بوخضرة.

الكلمات المفتاحية : توصيف, الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية, الكتلة الصخرية, التجارب الميكانيكية, التصنيف, منجم بوخضرة.