



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



UNIVERSITE LARBI TEBESSI—TEBESSA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Institut des Mines

جامعة العربي التبسي - تبسة
كلية العلوم والتكنولوجيا
معهد المناجم

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines

Option : Exploitation des mines

Thème

**Classification géomécaniques du massif rocheux cas de la carrière de
kaf Essnoun – djebel Onk- Bir-el Ater**

Présenté et soutenu par

- Zergui fatima
- Ben fada Amira

Devant le jury :

	Grade	Etablissement
Encadreur : BOUTERFIF Leila	M.C.A	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Président : MERAH Chafia	M.A.A	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Examineurs : derbal chams Eddine	M.A.A	Université Larbi Tebessi - Tébessa

Année Universitaire : 2023-2024

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي: جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

الصفة: طالب، أستاذ باحث، باحث دائم: طالبة

السيد (ة) زرقى فاطمة

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية/ رخصة السياقة رقم 103183254 .. والصادرة بتاريخ 2017/02/01

قسم علوم و تكنولوجيا

المسجل بمعهد مناجم

والمكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها:

Classification géomécaniques du massif rocheux cas de la carrière de kas Essnoun – djebel Onk-
Bir-el Ater

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز

البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 10/06/2023

إمضاء المعني (ة)

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي: جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) بن فضا اميرة الصفة: طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية/ رخصة السياقة رقم: 119990385004020009 والصادرة بتاريخ 2022/18

المسجل بمعهد المناجم قسم العلوم والتكنولوجيا

والمكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها:

Classification géomécanique d'un massif rocheux de kef essnoun -bir El ater

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية

المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ 2023/6/9

إمضاء المعني (ة)

Année universitaire : 2022-2023

Tébessa le :

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants

1 Zergui fatima

2 Benfada Amira

Niveau : Master2 Option : exploitation des mines

Thème : classification géomécanique du massif rocheux Cas de la carrière kef Essnoun

Nom et prénom de l'encadreur : BOUTERFIF Leila

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre I : Description des massifs rocheux matrice rocheuse et discontinuités	
Chapitre II : Système de classification géomécaniques	
Chapitre III : généralités sur les gisements de djebel Onk	
Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux	

Remerciement

Nous remercier « الله » qui nous a donné le courage et la patience Pour acheiver nos études.

*Toute notre gratitude va vers notre encadreur: BOUÏERFIF LEILA, pour son
encouragement, son suivi pas à pas de notre travail.*

Un grand merci pour Ahmed ben Youcef pour sa patience et ses conseils précieux,

*Nous remercions aussi l'ensemble des membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter
de juger notre travail.*

*Nous remercions tous les enseignants et les enseignantes de l'Institut des mines, pour leur
contribution dans notre formation.*

Merci pour le personnel technique du complexe minier de Djebel Onk,

Dédicaces

Remercie Dieu d'abord pour tout

Je dédie ce travail à mon père, qui est fatigué pour moi et je demande à Dieu de lui

Accorder santé et bien-être

Ma mère, qui a été ma compagne dans mon chemin

Pendant mes études, en demandant à Dieu de lui accorder sa force et de la

Perpétuer au-dessus de nos tête.

A mes frères et sœurs, en particulier RABEH,

Et mon binôme AMIRA

Fatima

Dédicace

CE MODESTE TRAVAIL EST DEDIE A :

MON CHER PERE ET MA CHERE MERE ;

MA SCEUR

ET MON BINOME FATI

TOUS LES MEMBRES DE MA FAMILLE, PETITS ET GRANDS;

TOUS MES AMI(E)S;

TOUS CEUX QUI DE LOIN OU DE PRES N'ONT CESSENT DE M'APPORTER

LEUR SOUTIEN PENDANT MES ANNEES D'ETUDES.

AMIRA

Résumé

La région de Djebel Onk est située au Sud – Est de l’Algérie, à 100 km de la Wilaya de Tébessa et à 20 km de la frontière Algéro–Tunisienne, sur la route qui relie Tébessa à El Oued .Cette région constitue la limite géographique naturelle entre les hauts plateaux constantinois et le domaine saharien.

La carrière de phosphates de Kef - Essnoun est localisée au pied sud du Djebel Onk. Suite à un glissement d’ampleur de terrain qui s’y est produit en septembre 2007, des mesures de protection consécutives ont été mises en place, En 2013, des fissures ont été observées dans l'épaule de la paroi Nord. Celles-ci pourraient être des signes d’un autre glissement potentiel ; aussi, pour prévenir ce genre d’instabilité et afin d’assurer la continuité des travaux d’exploitation, une étude géomécanique du massif de Kef-Essnoun est devenue nécessaire.

Dans notre étude de classification géomécanique du massif de Kef - Essnoun (partie Nord –Ouest), nous avons adopté les systèmes de classification géomécanique de Bieniawski RMR (Rock Mass Rating), GSI (Geological Strength Index) Introduit par Hoek et al. [1995] et enfin la méthode de SMR (Slope Mass Rating).

Mots clés : caractérisation géomécanique, RMR, RQD, SMR, GSI, projection stéréographique.

Abstract

The Djebel Onk region is located in south-eastern Algeria, 100 km from the Wilaya of Tébessa and 20 km from the Algerian-Tunisian border, on the road between Tébessa and El Oued, and forms the natural geographical boundary between the high plateau of Constantine and the Sahara.

The Kef - Essnoun phosphate quarry is located at the southern foot of Djebel Onk. Following a major landslide in September 2007, protective measures were put in place. En 2013, cracks were observed in the shoulder of the north wall. To prevent this type of instability and ensure the continuity of mining operations, a geo-mechanical study of the Kef-Essnoun massif became necessary.

In our study of the geo-mechanical classification of the Kef - Essnoun massif (north-western part), we adopted the Bieniawski RMR (Rock Mass Rating) and GSI

(Geological Strength Index) geo-mechanical classification systems introduced by Hoek et al [1995], and the SMR (Slope Mass Rating) method.

Key words: geo-mechanical characterization, RMR, RQD, SMR, GSI, stereographic projection.

Sommaire

Liste des tableaux.

Liste des figures.

Natation.

Liste des abréviations.

Introduction général.

Chapitre I : Description des massifs rocheux matrice rocheuse et discontinuités

I.1. Introduction.....	1
I.2. Reconnaissances sur les massifs rocheux.....	1
I.2.1. Généralités.....	1
I.2.1.1. Caractérisation topographique.....	1
I.2.1.2. Caractérisation géologique	1
I.2.1.3. Caractérisation mécanique.....	2
I.2.2 Types de reconnaissances géologiques.....	2
I.2.2.1. Télédétection.....	2
I.2.2.2. Forages et autres essais mécaniques	2
I.2.2.3. Prospection géophysique	3
I.3. Matrice rocheuse	6
I. 3.1. Type géotechnique de la roche.....	6
I.4. Les propriétés physico-mécaniques des roches.....	7
I.4.1. Les propriétés physiques des roches.....	8
I.4.2. Les propriétés mécaniques des roches.....	12
I.4.2.1. Les paramètres mécaniques de la résistance.....	12
I .5. Discontinuités.....	18

Sommaire

I.5.1 .Types de discontinuités.....	18
I.5.2. Caractéristiques des discontinuités.....	22
I.5.3. Paramètres géométriques.....	22
I.5.4. Caractéristiques mécaniques d'une discontinuité.....	30
I.5.5. Comportement des discontinuités naturelles.....	33
I.5.6. Influence de l'eau interstitielle.....	38
I.5.7. La fréquence des discontinuités (λ).....	39
I.5.8. La projection stéréographique des discontinuités.....	39
I.6. La projection stéréographique des discontinuités.....	40
I.7. Conclusion.....	41

Chapitre II : Système de classification géomécaniques

II.1. Introduction	42
II.2. Les buts des systèmes de classification des massifs rocheux	42
II.3. Systèmes de classification des massifs rocheux	42
II.3.1. Systèmes du RQD (Rock Quality Designation).....	44
II.3.1.1. Principe de calcul du RQD.....	44
II.3.1.2. Les inconvénients du système RQD.....	45
II.3.2. Systèmes du RMR (Rock Mass Rating)	45
II.3.2.1. Principe de calcul du RMR.....	46
II.3.2.2. Estimation des caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR.....	48
II.3.2.3. Limitation du système RMR	49
II.3.3. Système du SMR (Slope Mass Rating).....	50

Sommaire

II.3.4. Système Q Barton (1974).....	53
II.3.5. Système du GSI (Geological Strength index).....	58
II.3.5.1. Système du GSI modifié (1999).....	60
II.4. limitation des systèmes de classification	62
II.5. Conclusion	62

Chapitre III : généralités sur les gisements de djebel Onk

III.1. Introduction.....	63
III.2. Généralité.....	63
III.2.1 Historique de site.....	63
III.2.2 Géologie régionale de Djebel el Onk	64
III.2.2.1 Litho stratigraphie régionale.....	64
III.2.2.2 La tectonique régionale.....	64
III.2.2.3 Situation géographique.....	65
III.2.2.4 Aperçu hydrogéologique.....	67
III.3 Géologie local de Djebel El Onk.....	68
III.3.1. Gisement de Kef Essnoun	68
III.3.2. Historique de recherche.....	68
III.3.3. Géologie du gisement.....	68
III.3.3.1 Les teneurs et les réserves géologiques.....	68
III.3.3.2. Infrastructures et cadre économique de la région.....	70
III.3.3.3. Composition minéralogique.....	70
III.4. Présentation de l'entreprise.....	70
III.4.1. Ferphos.....	70

Sommaire

III.4.2. Somiphos.....	71
III.4.2.1 Organisation de Somiphos.....	71
III.5. Méthode d'exploitation.....	71
III.5.1. Introduction.....	71
III.5.2 Généralité sur l'exploitation.....	72
III.5.2.1 Exploitation du phosphate.....	72
III.5.2.2 Les paramètre de la méthode d'exploitation.....	72
III.6. Conclusion.....	75

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

IV.1. Introduction.....	76
IV.2. Description du site d'étude	76
IV.2.1. Présentation de la carrière de Kef Essnoun.....	76
IV.2.2. Type de discontinuités.....	76
IV.2.3.paramètres physico-mécanique des roches.....	77
IV.2.4.La résistance à la compression uniaxiale (Rcs).....	78
IV.3. Classification géomécanique du massif Nord –Ouest de Kef Essnoun.....	79
IV.3.1. Classification RQD.....	79
IV.3.2. Représentation stéréographique.....	80
IV.3.3. Classification RMR.....	86
IV.3.4.Classification SMR.....	90
IV.3.5. Classification GSI.....	92
IV.4. Conclusion.....	94

Conclusion générale.

Sommaire

Références bibliographiques.

Annexes.

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1. Exemples d'ordres de grandeur de valeurs de résistivités.....	4
Tableau I.2. Exemples d'ordres de grandeur de valeurs de vitesses des ondes de compression.....	5
Tableau I.3. Echelle de dureté de Mohs	10
Tableau I.4. Classification des roches en fonction de la résistance à la compression.....	13
Tableau I.5. Classification des roches en fonction de la résistance à la traction.....	15
Tableau I.6. Description de l'espacement des discontinuités.....	25
Tableau I.7. Description des discontinuités selon la mesure des Ouvertures.....	26
Tableau I.8. Classification des discontinuités selon leur extension.....	27
Tableau I.9. Classification des discontinuités en fonction d'ID (d'après B.R.G.M.- Guide de prospection des matériaux de carrière).....	30

Chapitre II

Tableau II.1. Systèmes de classification du massif rocheux	43
Tableau II.2. Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux.....	45
Tableau II.3. Classification RMR.....	47
Tableau II.4. Valeur du paramètre de réduction A6 selon l'orientation du tunnel par rapport à l'indication du pendage	48
Tableau II.5. Qualité de la masse rocheuse selon le RMR.	48
Tableau II.6. Relations entre RMRsec et la résistance à la compression simple	49
Tableau II.7. Notes des paramètres du SMR.	51
Tableau II.8. Description des classes SMR.....	52
Tableau II.9. Paramètre Jr (paramètre de rugosité des joints).....	54
Tableau II.10. Paramètre Ja (paramètre d'altération des joints).....	55

Liste des tableaux

Tableau II.11. Paramètre Jw (paramètre hydraulique)	56
Tableau II.12. Paramètre Jn (nombre de famille de discontinuités).....	56
Tableau II.13. Paramètre de SRF (paramètre de réduction relatif aux contraintes).	57
Tableau II.14. Classification du massif rocheux selon l'indice Q.....	58
Tableau II.15. Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI.....	58

Chapitre IV

Tableau IV.1. Les propriétés physico-mécaniques des différents faciès du flanc Nord de Kef Essnoun.....	78
Tableau. IV.2. les valeurs de la résistance à la compression des différentes lithologies.....	79
Tableau IV.3. Valeur du RQD pour les sondages N°6 et 10 et 19.....	80
Tableau IV.4. RQD des différents faciès.....	80
Tableau. IV.5. Orientation et pendage des discontinuités du massif rocheux de Diffèrent faciès.....	81
Tableau. IV.6. Classification RMR du faciès calcaire Yprésien-Lutétien.....	87
Tableau. IV.7. Classification RMR du calcaire phosphaté.....	87
Tableau. IV.8 . Classification RMR du phosphate.....	88
Tableau. IV.9. Classification RMR du marne.....	88
Tableau. IV.10. Classification RMR du faciès Danien-Montien.....	89
Tableau. IV .11. Classification RMR du massif rocheux de Kef Essnoun.....	89
Tableau IV .12. Orientation des joints et le talus.....	90
Tableau IV.13. SMR du faciès de calcaires Yprésien-Lutétien.....	90
Tableau. IV.14. Classification SMR du faciès calcaire phosphaté.....	90
Tableau. IV.15. Classification SMR du faciès de phosphate.....	90

Liste des tableaux

Tableau IV. 16. Classification SMR du faciès de marne.....	91
Tableau IV.17. Classification SMR du faciès de calcaire Danién-Montien.....	91
Tableau IV.18. Classification SMR des différents faciès.....	91
Tableau IV.19. Classification GSI du massif rocheux de Kef Essnoun.....	92

Chapitre I

Figure I.1. Diagramme contrainte-déformation.....	11
Figure I.2. Dispositif expérimental.....	13
Figure I.3. Schéma de la compression uni-axiale.....	13
Figure I.4. Essai de traction directe.....	14
Figure I.5. Dispositif expérimental.....	15
Figure I.6. Schéma de la Traction indirecte.....	15
Figure I.7. Principe du Cisaillement directe.....	16
Figure I.8. Principe du cisaillement simple.....	17
Figure I.9. Principe de l'essai Triaxial.....	18
Figure I.10. Diaclases.....	19
Figure I.11. Faille.....	20
Figure I. 12. Stratification.....	21
Figure I.13. Plans de schistosité.....	21
Figure I.14. Orientation d'un plan de discontinuité.....	23.
Figure I.15. L'extension.....	24
Figure I.16. Mesure de l'espacement.....	25
Figure I.17. Fissure ouverte et remplie.....	26
Figure I.18. Persistance de différents ensembles de fractures.....	27
Figure I.19. Caractéristiques des discontinuités dans un massif rocheux; traduit de Wyllie et Mah (2004).....	28
Figure I.20. Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC).....	29

Liste des figures

Figure I.21. Courbes de résistance au cisaillement suivant un plan horizontal.....	32
Figure I.22. Schéma de Cisaillement suivant un plan incliné.....	33
Figure I.23. Influence de la rugosité sur les résistances résiduelle et de pics.....	34
Figure I.24. Modèle de fissure à rugosité hétérogène.....	34
Figure I.25. Les mesures de Patton des angles de rugosité (i) pour le premier et le second ordre des projections sur les surfaces des roches rugueuse.....	36
Figure I.26. Modèles schématiques d'imbrication des blocs du massif rocheux, (CFMR-MMR, 2000).....	37
Figure I.27. Morphologie des épontes des discontinuités.....	38
Figure I.28. Mesure de la fréquence de discontinuité.....	39
Figure I.29. Représentation stéréographique.....	40

Chapitre II

Figure II.1. Une carotte	44
Figure II.2. Méthodes de confortement proposées selon la valeur du SMR.	53
Figure II.3. Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse.....	59
Figure II.4. Estimation du GSI modifiée à partir d'une description géologique de la masse Rocheuse.....	61

Chapitre III

Figure III.1. Carte de situation géographique de Djebel Onk	65
Figure III.2. Situation géologique des gisements de phosphate de la région du Djebel-Onk.....	66
Figure III.3. La carte des iso teneurs en P ₂ O ₅ et Mgo en % du gisement de K.E.S	69
Figure III.4. Carte d'iso teneurs en Mgo du gisement de Kef Essennoun	69
Figure III.5. Carte d'iso teneurs en P ₂ O ₅ du gisement du Kef Essennoun	70

Liste des figures

Figure III.6. Opération de chargement (prise dans 18/03/2020)75

Chapitre IV

Figure.IV.1.joint de stratification (photo prise d'un gradin de Kef Es Sennoun).....77

Figure.IV.2.Réseau de diaclases sur les dalles de calcaires Yprésien-Lutitien du gradin de Kef Es Sennoun.....77

Figure.IV.3.Carottes de sondage 6.....79

Figure IV.4. Projection stéréographique (Calcaire Yprésien).....82

Figure IV.5. Projection stéréographique ° (Calcaire Yprésien).....82

Figure. IV.6.Projection stéréographique (phosphate).....83

Figure. IV.7.Projection des stéréographique °(Phosphate).....83

Figure. IV.8. Projection stéréographique (marne).....84

Figure. IV.9. Projection stéréographique° (Marne).....84

Figure IV.10. Projection stéréographique (calcaire danien-montien).....85

Figure IV.11. Projection de stéréographique° (calcaire danien-montien).....85

Figure. IV.12. Valeur de GSI pour les defferent type de roche de kef Essnoun.....93

Notations

n : La porosité.	
Ps : masse volumique.	[g/cm ³]
Ms : la masse du matériau sec.	[g]
Vs : le volume des grains après broyage.	[Cm ³]
Vt : le volume de l'échantillon.	[Cm ³]
Mh : la masse naturelle.	[g]
MSat : la masse de l'échantillon saturée.	[g]
Pd : dépend de la porosité de la roche, par contre ps ne dépend que de la minéralogie.	
W : La teneur en eau.	
Mw : est la masse d'eau.	
Mt : est la masse totale de l'échantillon.	
Ms : est la masse sèche des grains solides.	
Sr : Le degré de saturation.	
Vw: volume de l'eau dans l'échantillon.	[Cm ³]
Vv : volume des vides.	[Cm ³]
ID : Le degré de fissuration des roches.	
L : longueur de la partie étudiée du massif.	[m]
n : nombre de fissures sur la partie mesurée.	
E: Module de Young.	[KN/m ²]
σ : est la contrainte.	
N: Nord.	
O: Ouest	
RC: Résistance à la compression.	[kgf/cm ²]

Notations

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

S : la surface de la section de l'éprouvette sur laquelle on applique l'effort F.

Rt : Résistance à la traction. [kgf/cm²]

Pmax : valeur finale atteinte par l'effort appliqué.

A0 : surface transversale.

Fmax : la charge maximale appliquée.

D et L : dimensions de l'éprouvette cylindrique.

τ : est la résistance au cisaillement.

σ_N : est la contrainte normale.

Φ : L'angle de frottement interne.

Jn : Nombre de famille de discontinuités.

Ja : Paramètre d'altération des joints.

Jr : Paramètre de rugosité des joints.

Jw : Paramètre hydraulique.

Abréviations

FERPHOS : Entreprise nationale du fer et du phosphate.

SOMIPHOS: Société des Mines de Phosphates.

GSI: Geological Strength Index.

JRC: Joint Roughness Coefficient.

SCR: Surface Condition Rating.

SMR: Slope Mass Rating.

RQD: Rock Quality Designation

RMR: Rock Mass Rating.

SRF: Stress Reduction Factor.

SR: Structure Rating.

S.D.O: Société de Djebel Onk.

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

Introduction

Général

Introduction générale

La région de Kef Essnoun est l'un des gisements de phosphate les plus importants du bassin phosphaté de Djebel Onk, et constitue le principal axe de développement du Complexe minier de Djebel –Onk.

La carrière de phosphates de Kef - Essnoun est localisée au pied sud du Djebel Onk. Suite à un glissement de terrain de grande ampleur qui s'y est produit en septembre 2007, des mesures de protection consécutive sont été mises en place, En2013, des fissures sont été observées dans l'épaulement de la paroi Nord. Celles-ci pourraient être désigné d'un autre glissement potentiel, pour éviter tous genre de l'instabilité et a fin d'assurer la continuité des travaux d'exploitation : l'étude géomécanique du massif de kef Essnoun devient nécessaire.

La classification géomécanique des massifs rocheux, 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.

La classification géomécanique 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.

- ◆ Le premier chapitre fait l'objet d'une recherche bibliographique sur la description géotechnique des massifs rocheux fracturés en présentant le comportement physicomécanique des roches ainsi que l'identification des systèmes de fissuration dans un massif rocheux.

Introduction générale

◆ Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la classification des massifs rocheux par les méthodes empiriques les plus utilisées dans le domaine minier. Dans cette partie, on a introduit la littérature des systèmes géomécaniques en montrant la théorie d'application des méthodes suivantes : RQD, RMR, GSI, SMR.

◆ Dans le troisième chapitre, nous avons introduit des Généralités sur le gisement de Kef -Essnoun.

◆ Le quatrième chapitre est consacré à l'application des méthodes de classification géomécanique (RQD, RMR, GSI, SMR) sur les conditions de la carrière Kef – Essnoun.

Chapitre I

Description des massifs
rocheux matrice rocheuse et
discontinuités

I.1. Introduction

Le but essentiel de la caractérisation des massifs rocheux est de fournir à l'ingénieur des Données qualitatives et quantitatives nécessaires pour décrire la structure et évaluer les Propriétés mécaniques et hydrauliques des massifs à l'échelle des volumes sollicités par des Ouvrages [1].

L'étude des discontinuités dans un massif rocheux 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 ses différents paramètres géométriques. En plus de l'analyse géométrique, une étude mécanique est entreprise afin de dégager la nature du comportement et les caractéristiques mécaniques des différentes discontinuités ou familles de discontinuités du massif [2].

I.2. Reconnaissance des massifs rocheux

I.2.1. Généralité

En pratique, la détermination des différents facteurs internes se fait par une étude géologique lato sensu, c'est-à-dire comprenant les faciès lithologiques, structurales, hydrogéologiques, géomorphologiques (utilisant, le cas échéant, les techniques de télédétection), géotechniques...etc ; complétées par un levé topographique d'une précision suffisante [3].

Cette étude doit inclure les aspects suivants :

I.2.1.1. Caractérisation topographique :

Elle est la base de toute étude comportant entre autres [3] :

- a- Plans et coupes en nombre suffisant.
- b- Position de l'instabilité sur l'ensemble du versant.
- c- Dimensions, volumes concernés.
- d- Pente générale du versant.

I.2.1.2. Caractérisation géologique :

Elle se réalise par des données géologiques qui sont obtenues par [3] :

a- La morphologie, les processus dynamiques et typologiques de l'instabilité (mécanismes possibles).

b- La lithologie, l'état d'altération.

c- Le levé structural (familles de discontinuités) : identification, localisation, orientation, fréquence, état d'altération, remplissage et la persistance.

d- L'hydrogéologie : présence ou non des venues d'eau, de nappes (en relation avec les données climatiques), débits et exutoires.

I.2.1.3. Caractérisation mécanique :

Elle concerne généralement [3] :

a- Les matériaux rocheux constitutifs (principalement la résistance à la compression simple et à la traction).

b- Les discontinuités (angle de frottement interne, cohésion).

I.2.2. Types de reconnaissances géologiques

Les données géologiques sont obtenues par un levé de terrain complété par divers types d'investigations, en insistant sur l'aspect lithologique et structural, sans négliger les données

Géomorphologiques et hydrogéologiques [3].

Les méthodes d'investigations peuvent être réparties en trois catégories :

I.2.2.1. Télédétection

C'est une étude des photos aériennes et des images satellites. Elle est particulièrement intéressante pour cartographier les mouvements de terrain en plan et en élévation. En outre, le suivi d'un mouvement lent (s'étendant sur plusieurs années) peut avantageusement être réalisé par des techniques telles que l'interférométrie radar qui autorisent des précisions quasi millimétriques en altitude. Le coût et les délais nécessaires à l'acquisition et au traitement des données réservent ce type d'investigations aux glissements de grandes amplitudes [3].

I.2.2.2. Forages et autres essais mécaniques : Les forages carottés complètent l'information géologique obtenue en affleurement et permettent son extrapolation au sein du massif. Ils permettent une quantification du degré de fracturation du massif, le prélèvement

d'échantillons pour divers essais de laboratoire et la réalisation d'essais hydrauliques et/ou mécaniques in situ. Le coût des forages carottés est en général assez élevé, dépendant des conditions d'accès et du nombre total de forages à réaliser [3].

I.2.2.3. Prospection géophysique

La prospection géophysique comprend un ensemble de méthodes non destructives permettant d'obtenir rapidement une vue globale de certaines caractéristiques du terrain et de déterminer leurs variabilités dans la zone prospectée. Elle apporte des informations et permet en outre de délimiter judicieusement la reconnaissance ponctuelle, implanter les forages et d'interpoler les renseignements obtenus par celles-ci [3].

a- Principe de la méthode

La prospection géophysique mesure les réponses des terrains à des sollicitations physiques (envoi d'un courant, d'une onde,...etc.) ou les variations d'un champ naturel (magnétique, pesanteur,...etc.) afin de déduire leurs caractéristiques [3] :

- Physiques (liées à leur lithologie, structure et la teneur en fluides) ;
- Géométriques (allure des couches) ;
- Mécaniques, hydrauliques et autres informations corrélées aux caractéristiques.

b- Les méthodes géophysiques

Les principales méthodes utilisées sont :

- **La méthode électrique (résistivité) :**

La prospection électrique se base sur la résistivité (électrique) des terrains, notée " ρ ". La résistivité est la propriété physique d'un milieu qui en détermine sa capacité à s'opposer au passage du courant.

La résistivité d'une roche, qui s'exprime en Ohm.m; dépend de sa lithologie, principalement de la teneur en minéraux de type "argile" et de la quantité d'eau qu'elle contient ainsi que de la minéralisation de cette dernière [3] ; [4].

La conductibilité électrique d'une roche dépend ainsi des composantes solides (passage des électrons dans le solide) et des composantes liquides électrolytiques (les ions transportent les charges sous l'effet du champ électrique) [3] ; [4].

Dans l'ensemble, les minéraux constitutifs des roches (quartz, calcite...) sont très résistifs (pratiquement isolants). Cependant les matériaux argileux sont, eux, très conducteurs (faiblement résistifs) [3] .

La résistivité et la conductivité d'une roche dépendra donc principalement :

- De sa teneur en argile.
- De la quantité d'eau qu'elle renferme et de la résistivité de celle-ci (eau douce : ρ de l'ordre de 10 Ohm.m, eau de mer : ρ de l'ordre de 0.2 Ohm.m).

Tableau I.1. Exemples d'ordres de grandeur de valeurs de résistivités [3].

Roche	Résistivité Ohm.m	Roche	Résistivité Ohm.m
Argile	1-20	Schistes sains	100-400
Sable (eau douce)	40-300	Schistes altérés	20-200
Sable (eau de mer)	2-15	Grès sains	200-3000
Sable sec	400-2000	Grès fissurés	100-15000
Limons	20-100	Calcaires sains	1000-5000
Graviers	100-500	Calcaires altérés	20-2000

Il est important de répéter qu'il n'y a pas bijection entre les valeurs de résistivité et la nature des terrains, c'est-à-dire que, connaissant la nature d'un terrain, on pourra en déduire sa résistivité mais qu'à une valeur de résistivité pourront correspondre plusieurs natures de terrains. Il est donc indispensable d'étalonner les mesures électriques par des données géologiques, des reconnaissances par forages ou par d'autres méthodes géophysiques [3] .

• La méthode sismique (réfraction)

La prospection sismique est basée sur la mesure de la vitesse des ondes sismiques (vibrations des particules de terrain), engendrées par un ébranlement provoqué à la surface du sol (par l'impact d'un marteau, par une explosion ou autre système) [3].

Les ondes ainsi générées peuvent être :

- Des ondes de volume, se propageant dans la totalité du sous-sol :
 - ondes longitudinales (de compression), P.
 - ondes transversales (de cisaillement), S.
- Des ondes de surface (onde de Love et de Rayleigh), se propageant à l'interface de deux milieux (air et sol par exemple).

Les célérités des divers types d'ondes sismiques permettent de les différencier. Les ondes de volume (de compression) étant les plus rapides. Cette particularité fait que ce sont ces ondes qui sont les plus aisées à détecter, arrivant en premier aux éléments récepteurs et sur lesquelles se base la sismique réfraction [3]; [4].

Les célérités des ondes longitudinales sont en fonction de la nature et de la compacité (densité, fissuration) du matériau traversé. Plus un matériau est fissuré (ou peu compact), plus la vélocité est petite. En pratique, la vitesse des ondes de compression dans un milieu est la moyenne entre les vitesses dans les différents composants du milieu : matériaux "intacts" et fissures (ou vides) plus ou moins remplies d'air, d'eau ou de différents matériaux. La prospection sismique réfraction informe donc sur le degré de fissuration du massif rocheux [3]; [4].

Tableau I.2. Exemples d'ordres de grandeur de valeurs de vélocité des ondes de compression [3].

Roche	Vitesse des ondes de Compression (m/s)	Roche	Vitesse des ondes de Compression (m/s)
Remblais	200-800	Schistes "sains"	1500-3000
Limons	300-800	Grès "sains"	1800-5000
Sables secs	400-1200	Calcaires "sains"	2500-6000
Sables (sous eau)	1000-1800	Air	330-360
Graviers secs	200-1500	Eau	1450-1550
Graviers (sous nappe)	1200-1900	Glace	3700-3900

Comme pour les valeurs des résistivités, il est important de répéter qu'il n'y a pas bijection entre les valeurs des vitesses sismiques et la nature/compacité des terrains. Il est donc

indispensable d'étalonner les mesures sismiques par des données géologiques, des reconnaissances par forages ou par d'autres méthodes géophysiques [3].

Sans oublier de mentionner le radar de subsurface, cette méthode électromagnétique est particulièrement bien adaptée à la détection de joints argileux dans les massifs calcaires. Bien que sa profondeur de pénétration est très limitée dans le cas de couverture conductrice. Elle est cependant de plus en plus utilisée pour l'investigation des massifs rocheux calcaires ou gréseux [3].

D'autres méthodes existent mais ne seront pas abordées car elles sont moins fréquemment utilisées pour les études de stabilité. Citons, parmi elles [3] :

- Méthodes gravimétriques : Utilisées pour la recherche de cavités (karstiques et autres).
- Méthodes électromagnétiques : Orientées vers l'hydrogéologie et la prospection minière .
- Diagraphies : Appliquent les différentes méthodes géophysiques dans les forages carottés ou destructifs.

Toutes ces méthodes ont leurs champs d'application et leurs limitations. Elles ne peuvent être mises en œuvre et interprétées qu'en tenant compte du contexte géologique.

I.3. la matrice rocheuse

La matrice rocheuse est définie comme un volume de roche intacte qui possède des propriétés homogènes et non coupée par des discontinuités. La matrice rocheuse fait ainsi référence aux blocs non-fracturés situés entre les discontinuités structurales. En fonction des caractéristiques du massif rocheux et de son histoire géologique, la taille de ces blocs peut varier de quelques millimètres à plusieurs mètres. [5]

I.3.1 Type géotechnique de la roche

Le type de la roche est indiscutablement le paramètre le plus important, qui définit toutes les autres caractéristiques de la matrice et du massif. Les propriétés les plus importantes de la matrice rocheuse d'un point de vue de la stabilité des talus sont :

- La dureté de la roche, qui peut s'exprimer par le paramètre de résistance à la Compression simple de l'échantillon;

- Le caractère et le degré d'altération, de fracturation et la solubilité de la roche;
- L'aptitude au gonflement, la plasticité, etc. En fonction de ces paramètres, Fisse ko

(1965) propose de partager les roches en 5 classes :

- Les roches dures, avec RC (résistance à la compression) > 80 MPA, peu altérables, non gonflantes : les roches magmatiques et métamorphiques et certains calcaires et grès, pas fracturés, pas ou peu altérés.
- Les roches semi dures, avec $8 < RC < 80$ MPA, fracturées, intensivement altérables, non gonflantes, non plastiques : roches magmatiques et métamorphiques altérées, grès argileux, schistes, argilites, pyélites, marnes, conglomérats calciques, calcaires détritiques, charbons .
- Les roches faibles (argileuses), avec $RC < 8$ MPA, gonflantes, plastiques, très fortement altérables : roches magmatiques et métamorphiques très fortement altérées ou complètement désintégrées, ainsi que les roches de la seconde classe altérées, toutes les argiles, lœss, sables argileux, les limons, craies, certains alluvions et moraines .
- Les roches non cohérentes, sans cohésion, dont les angles de frottement et de talus naturel sont de $28-38^\circ$, non plastiques, non gonflantes : les zones caillouteuses au pied des talus des roches des deux premières classes, graviers et sables purs.
- Les vases, les tourbes, et les sols mouvants, avec une cohésion < 20 KPa, le frottement interne absent en état saturé. [6]

I.4. Les propriétés physico-mécaniques des roches

Les propriétés physico-mécaniques des roches et des sols sont une source capitale dans la compréhension de leur comportement dont la complexité est avérée, elles ont une grande influence sur la stabilité des talus et des pentes. Parmi les propriétés physiques les plus importantes nous citerons :

- La masse volumique.
- La porosité.
- L'humidité.
- La dureté...

Quant aux propriétés mécaniques, elles consistent en:

- La résistance à la compression,
- La résistance à la traction
- La résistance au cisaillement (l'angle de frottement interne et la cohésion)

I.4.1. Les propriétés physiques des roches

a. La porosité

La porosité n est, par définition, le rapport du volume des vides V_v de la roche au volume total V_t

$$n = V_v / V_t \quad (\text{I.1})$$

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

Les essais géotechniques au laboratoire militaire de Canada ont établi une classification des roches selon leur porosité comme suit :

- 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 : $p > 20 \%$.

b. Masses volumiques

On appelle masse volumique d'un matériau ρ_s la masse de l'unité de volume de la roche (g/cm^3). On définit, suivant l'état du matériau :

$$\rho_s = MS / VS; \rho_d = MS / Vt; \rho_h = Mh / Vt; \rho_{sat} = MSat / Vt \quad (\text{I.2})$$

Avec :

MS : la masse du matériau sec ; en grammes [g].

VS : le volume des grains après broyage ; cm^3 .

V_t : le volume de l'échantillon ; cm³.

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.

c. La teneur en eau

La teneur en eau w est le rapport de la masse d'eau (M_w) à la masse du solide (M_s).

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

M_w : masse d'eau.

M_t : masse totale de l'échantillon.

M_s : masse sèche des grains solides.

d. Le degré de saturation

C'est le rapport du volume de l'eau contenue dans l'échantillon au volume des vides. [7]

$$S_r = \left(\frac{V_w}{V_v} \right) * 100 \quad (\text{I.4})$$

Avec :

V_w : volume de l'eau dans l'échantillon, cm³.

V_v : volume des vides, cm³.

e. 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.

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 [8].

Tableau I.3: Echelle de dureté de Mohs.

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

Il existe aussi des pointes de métal numérotées et créées spécialement pour cela : chacune a une dureté égale à un des minéraux de l'échelle de Mohs : ils sont très pratiques pour mesurer la dureté, surtout quand le scientifique travaille en exploration sur le terrain.

Cette mesure de la dureté est essentiellement réservée aux pierres calcaires. La détermination de la largeur d'une rayure fournit pour chaque matériau une valeur chiffrée de la dureté. Ceci présente l'avantage de pouvoir mettre en relation les valeurs de dureté avec celles se rapportant à des caractéristiques physiques et mécaniques [9].

La caractéristique de dureté s'obtient par la mesure de la largeur d'une rayure faite sur la surface rectifiée d'un bloc de pierre.

La valeur obtenue est en relation avec la difficulté de taille et l'usure des instruments. La largeur des rayures varie en général de 0,1 mm pour les pierres les plus dures à 3,5 mm pour les plus tendres.

f. Module de Young

Le physicien britannique Thomas Young (1773-1829) avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction σ appliquée à un matériau et la déformation ϵ 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.

La loi d'élasticité est la loi de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (I.5)$$

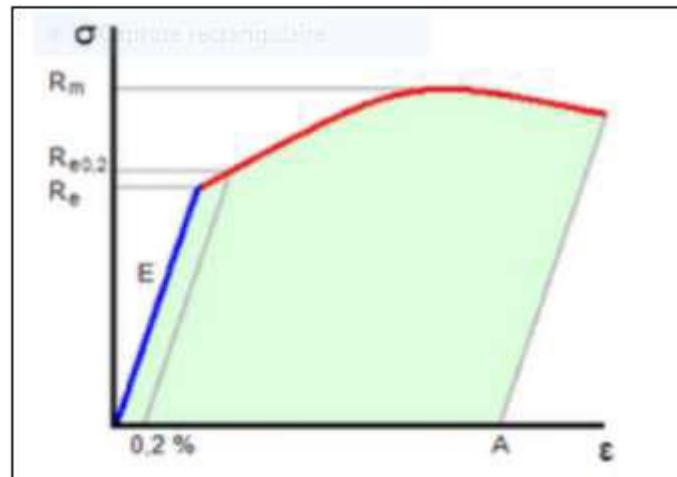


Figure I.1. Diagramme contrainte-déformation.

Avec :

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 ne soit atteinte [10].

g. 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) [11].

h. 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.

En France, pour la réutilisation en terrassement des matériaux rocheux, il a été défini un coefficient de dégradabilité, fondé sur l'évolution granulométrique de granulats après des cycles d'immersion-séchage conventionnels : l'essai met bien en évidence le caractère évolutif des roches marneuses ou schisteuses [11].

I.4.2. Les propriétés mécaniques des roches

Les caractéristiques mécaniques des roches sont: la résistance à la compression, à la traction, à la flexion, au cisaillement, les déformations, l'élasticité, la plasticité, le module de Young (module d'élasticité), le coefficient de poisson, l'angle de frottement interne, la cohésion, la vitesse de propagation longitudinale et transversale...

I.4.2. 1. Les paramètres mécaniques de la résistance

A : Résistance à la compression

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'élançement L/D (L : hauteur, D : diamètre) compris entre 2 à 2,5 avec deux faces planes, lisses et parallèles obtenues par une rectification soignée [12].

L'échantillon est ensuite placé entre les plateaux d'une presse et la force axiale est augmentée jusqu'à la rupture de l'éprouvette. On appelle résistance à la compression (notée RC) la contrainte maximale supportée par l'échantillon avant la rupture lors d'un essai de compression. La valeur maximale F de la force permet de calculer la résistance en compression uni-axiale RC de la roche :

$$RC = F/S \text{ [en kgf/cm}^2\text{]} \quad (I.6)$$

Avec:

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

S : surface de la section de l'éprouvette sur laquelle on applique l'effort F.

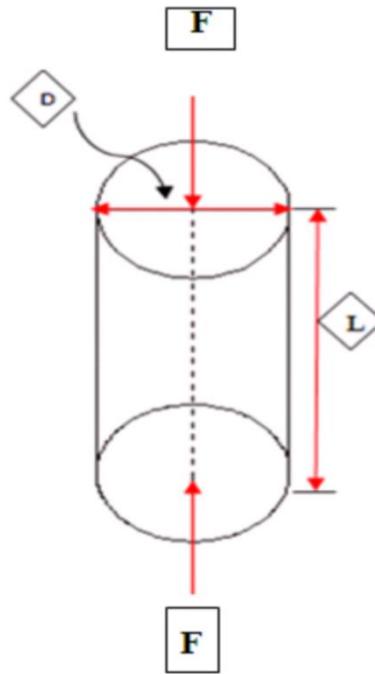


Figure I.2. Dispositif expérimental.

Figure I.3. Schéma de la compression uni-axiale.

Le tableau I.4 donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la compression proposée par la société internationale de mécanique des roches [12].

Tableau I.4: Classification des roches en fonction de la résistance à la compression.

Roches	Faiblement résistantes	Moyennes	Résistantes	Très Résistantes
RC (MPA)	< 5	20	60	>60

B : Résistance à la traction

1. Traction directe

En soumettant une éprouvette cylindrique à une traction uni-axiale, la résistance à la traction simple est égale à la contrainte limite de traction qui produit la décohésion des échantillons des roches massives. [12]

$$R_t = P_{max} \times 1 / A_0 \text{ [Kgf/ cm}^2\text{]} \quad \text{(I.7)}$$

Avec:

P_{max} : Valeur finale atteinte par l'effort appliqué;

A₀ : surface transversale.

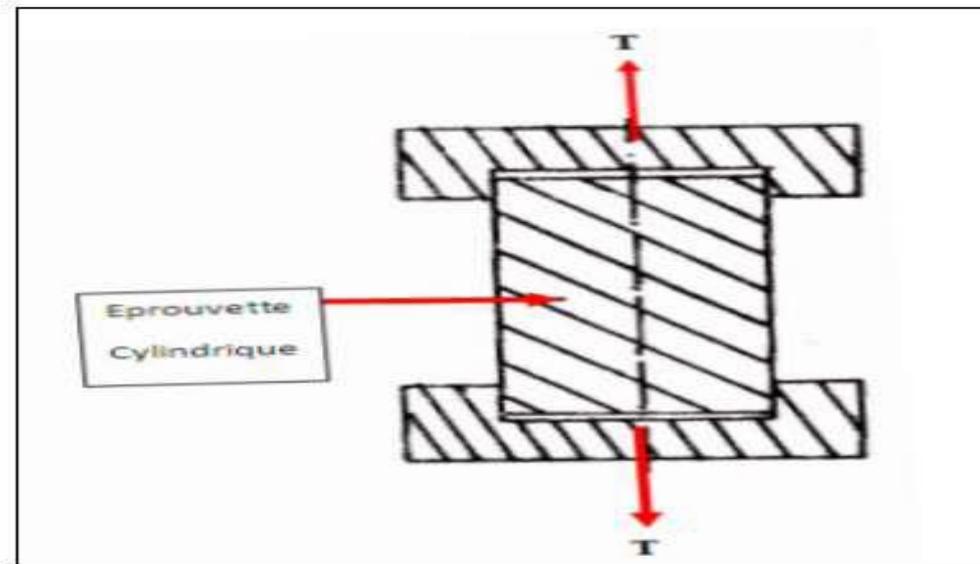


Figure I.4. Essai de traction directe.

2. Traction indirecte

L'essai de résistance à la traction indirecte, dit aussi essai brésilien, est réalisé en comprimant entre les plateaux de la presse une éprouvette cylindrique le long de deux génératrices opposées. La rupture est obtenue par traction au centre de l'éprouvette. On évite ainsi les difficultés de collage des têtes nécessaires dans les essais de traction directe.

Si **F** est l'effort fourni par la presse au moment de la rupture, **D** le diamètre de l'éprouvette et **L** sa hauteur, la résistance à la traction indirecte est donnée par la formule suivante [12]:

$$R_t = (2F_{\max}) / (\pi \cdot D \cdot L) \quad \text{(I.8)}$$

Avec:

F_{max} : la charge maximale appliquée.

D et **L** : dimensions de l'éprouvette cylindrique.



Figure I.5. Dispositif expérimental.

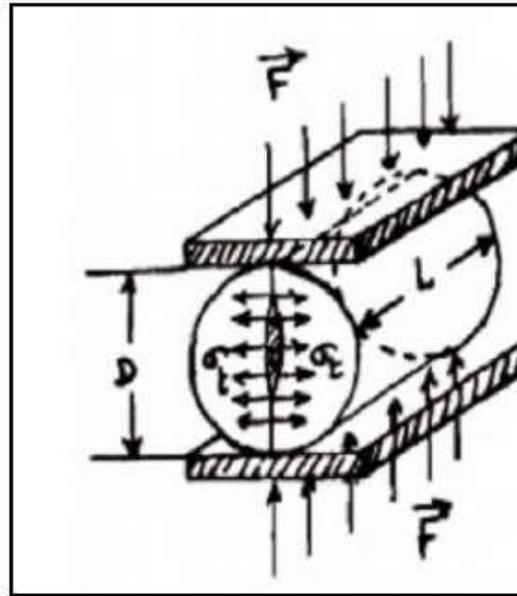


Figure I.6. Schéma de la Traction Indirecte.

Le tableau I.5 donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la traction proposée par la société internationale de mécanique des roches [12].

Tableau I.5: Classification des roches en fonction de la résistance à la traction.

Roches	Faiblement	Moyennes	Résistantes	Très
Rt (MPa)	0.40	1.50	4.00	>20

3. La résistance au cisaillement

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. Elle représente la contrainte tangentielle limite avant la rupture dans un essai de cisaillement [13].

On distingue :

- Cisaillement direct;
- Cisaillement simple;
- Cisaillement triaxial.

a. Cisaillement direct

En mécanique des sols, les premiers types d'essai sont historiquement les essais de cisaillement direct. L'appareillage nécessaire pour effectuer cet essai est la boîte de Casa grande. Le principe consiste à cisailer une éprouvette suivant un plan déterminé à l'avance en exerçant un effort normal constant et un effort tangentiel croissant. Les contraintes appliquées sont totales au départ.

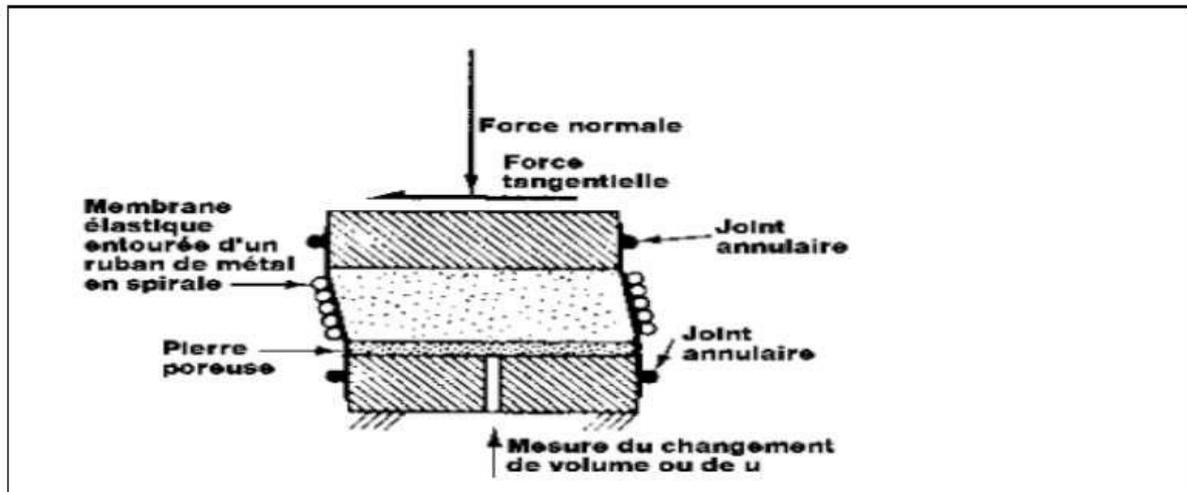


Figure I.7. Principe du Cisaillement directe.

b. Cisaillement simple

Comparable à l'essai de cisaillement direct. Le cisaillement est appliqué en haut et en bas de l'échantillon. Cet essai permet d'éviter le problème de concentration des contraintes rencontré dans l'essai de cisaillement direct. Il permet aussi d'effectuer des essais drainés et non drainés ainsi que des chargements dynamiques ou statiques. Dans cet essai, il y a rotation des

contraintes comme dans le cisaillement direct.

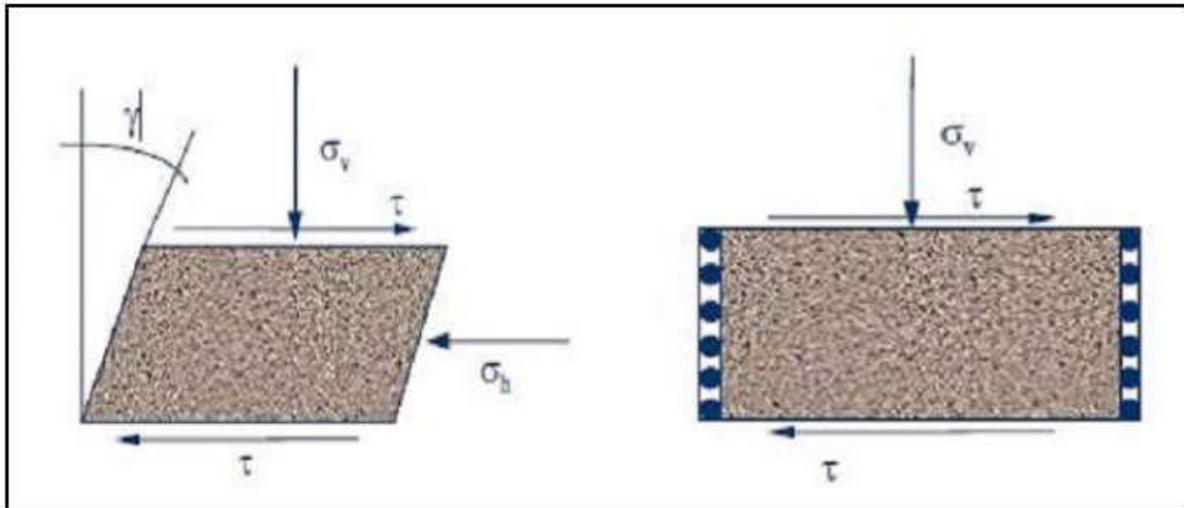


Figure I.8.Principe du cisaillement simple.

c. Cisaillement triaxial

L'essai triaxial est un test standard de laboratoire en mécanique des sols. L'appareil triaxial classique permettant d'effectuer cet essai a été conçu initialement par Bishop & Henkel. Cet essai triaxial permet de contrôler les contraintes principales.

Il est réalisé en soumettant un échantillon cylindrique à une pression hydrostatique de confinement σ_c (contrainte dans la cellule). Une contrainte dévia-torique est appliquée verticalement.

Puisque aucune contrainte extérieure de cisaillement n'est appliquée, les contraintes horizontale et verticale sont des contraintes principales [13].

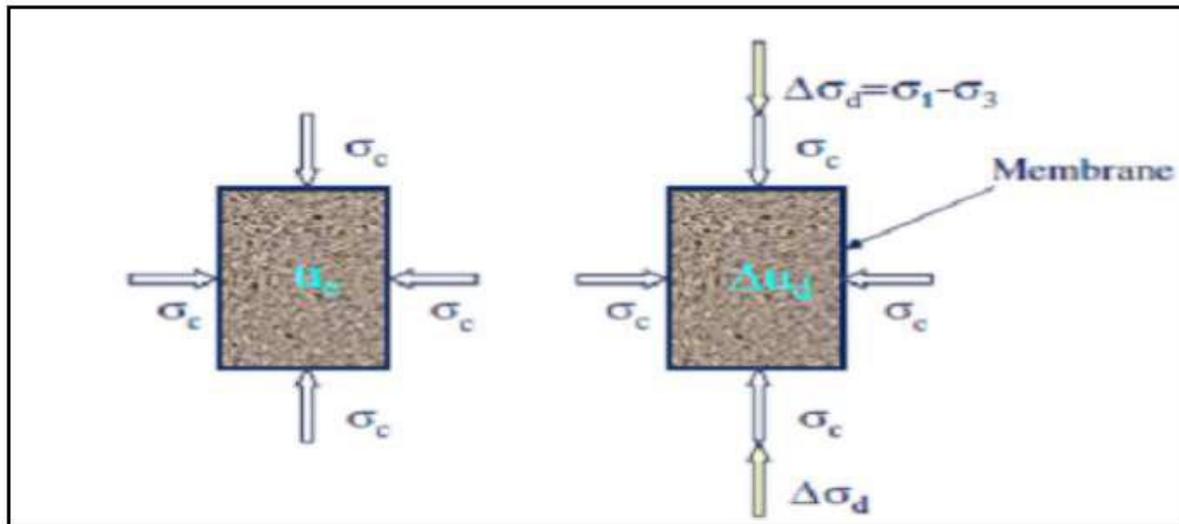


Figure I.9. Principe de l'essai Triaxial.

I .5. Discontinuités

Le terme discontinuité est utilisé pour désigner toute surface qui interrompt physiquement la continuité d'une matrice rocheuse et de ses propriétés mécaniques, hydrauliques et thermiques. Cette surface est en général assimilable, sur une certaine étendue, à un plan.

Les discontinuités représentent des types de surfaces très variées dont l'identification géologique, depuis l'échelle millimétrique jusqu'à l'échelle kilométrique, apporte des informations importantes sur le nombre de leurs paramètres géométriques et mécaniques.

I.5.1 Types de discontinuités

Les principales discontinuités dans les massifs rocheux se présentent sous les formes

- **Les diaclases:** Elles correspondent à une rupture de type fragile. Elles peuvent être des plans liés à la diagenèse et au retrait de la roche pour certains ou d'origine tectonique pour d'autres. Quoi qu'il en soit, dans les roches stratifiées, les diaclases se présentent pratiquement toujours sous la forme de deux familles orthogonales entre elles et perpendiculaires aux plans de stratification. Les diaclases découpent ainsi des éléments parallélépipédiques facilitant les chutes de blocs;



Figure I.10. Diaclases [14]

- **Les failles (fractures)** : Ce sont des surfaces de rupture générées par les effets de cisaillement issus des contraintes de compression (failles inverses ou normales selon l'orientation des contraintes principales) ou par traction.

Le déplacement des lèvres de part et d'autre du plan de la rupture (le rejet) peut avoir une amplitude nulle ou atteindre plusieurs kilomètres. Les plans de failles sont souvent marqués

par des stries indiquant le sens du mouvement.



Figure I.11. Failles [14]

- **Joints de stratification** : Ils marquent une discontinuité dans le phénomène de sédimentation des formations sédimentaires. Ils présentent une forte extension et souvent une faible ondulation [2]. Ils sont plus ou moins réguliers séparant les strates. Ils créent une interface de deux matériaux rocheux et ces derniers peuvent être soulignés comme de minces dépôts argileux ou schisteux favorisant le glissement. Les joints de stratifications caractérisées par un plan de rupture préférentiel dans les roches sédimentaires et glissement bancs sur

bancs;



Figure I. 12. Stratification [14]

- **La schistosité** : Elle résulte de la réorientation des minéraux constitutifs dans une direction perpendiculaire à celle des contraintes de compression auxquelles le massif a été soumis.



Figure I.13. Plans de schistosité [14]

I.5.2. Caractéristiques des discontinuités

Une famille de discontinuités est caractérisée par:

- a) **Son orientation** : elle est définie par celle du plan à laquelle elle est assimilée ;
- b) **Sa fréquence** : elle est inverse à l'espacement moyen entre deux discontinuités de la même famille et sa continuité.

Ces deux caractéristiques permettent de définir un bloc élémentaire permettant d'apprécier les dimensions des blocs susceptibles de s'ébouler.

c) **Sa morphologie**: rugosité, altération, remplissage... .

d) **Ses propriétés mécaniques**: L'angle de frottement, la dureté des épontes....

I.5.3. Paramètres géométriques

Beaucoup de discontinuités sont le résultat d'une ou plusieurs actions mécaniques que le massif a subi au cours de son histoire tectonique. A chacune de ces actions, on peut associer une ou plusieurs familles de discontinuités.

L'étude statistique fait apparaître généralement les familles de discontinuités qui existent dans le massif. Parfois, il est cependant nécessaire de renoncer à représenter le système de discontinuités par un ensemble de familles directionnelles. Les discontinuités sont toujours assimilées à des surfaces planes. On définit pour une discontinuité ou une famille de discontinuités les paramètres géométriques suivants :

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 (Figure I.14).

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 [2].

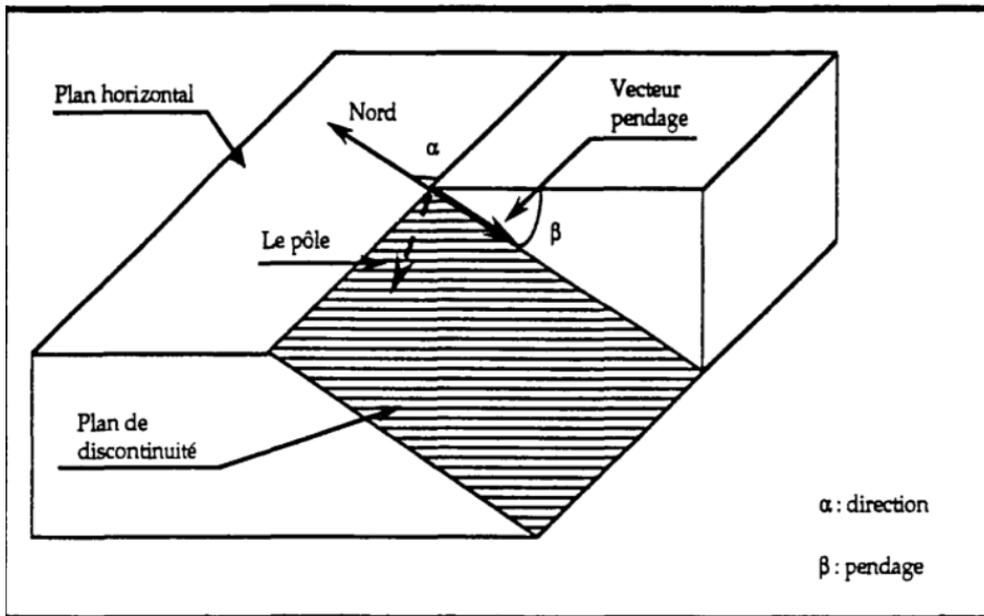


Figure I.14. Orientation d'un plan de discontinuité. [2]

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** : La projection stéréographique des discontinuités sur un canevas, permet de faire un classement des discontinuités en familles directionnelles. Une étude statistique permet d'identifier les familles et de dégager une loi de distribution des discontinuités au sein de chaque famille. L'orientation et le pendage peuvent être traités comme une seule variable (vecteur) ou séparément.

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.

L'extension peut être estimée à partir de la distribution de la longueur de trace de la discontinuité. [2]

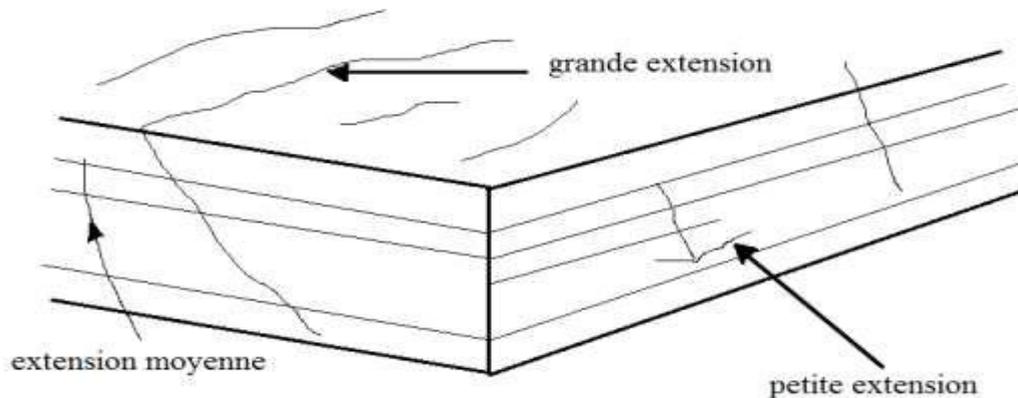


Figure I.15. L'extension.

C. L'espace des joints et densité

L'espace représente la distance perpendiculaire entre les joints de telle façon à obtenir le véritable écart entre les plans. On mesure souvent l'espace apparent et on mesure l'espace des joints qui varie selon les différentes faces et directions de mesure.

Cet espace contrôle la taille des blocs individuels et le mode de rupture et l'écoulement. 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 et souvent, la densité est estimée à partir de l'espace 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 continuité in situ du massif. [2]

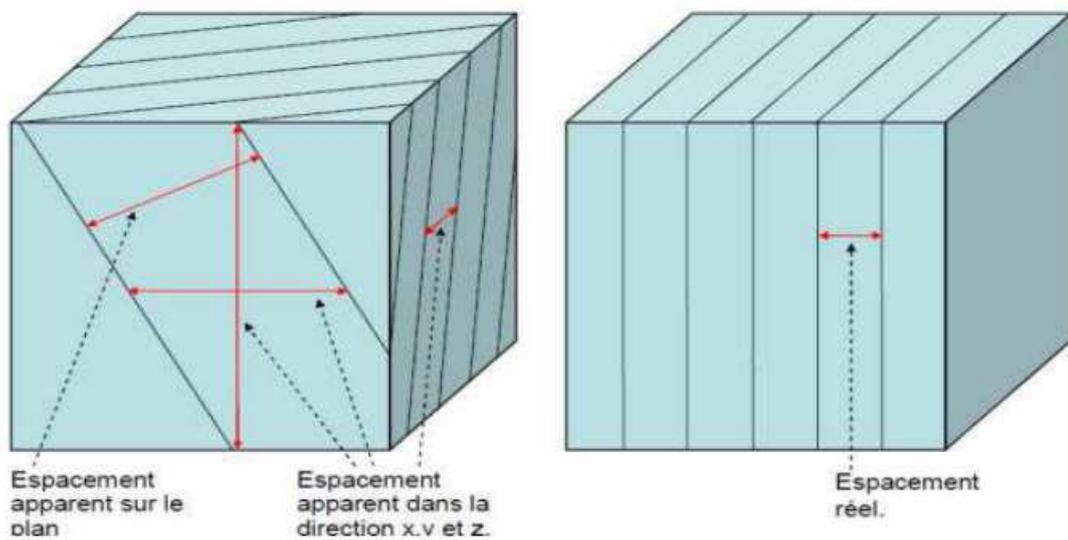


Figure I.16. Mesure de l'espace. [15]

Tableau I.6: Description de l'espace des discontinuités [15].

Espace des discontinuités (m)	Description
<0.02	Espace extrêmement étroit
0.02-0.06	Espace très étroit
0.06-0.2	Espace étroit
0.2-0.6	Espace modéré
0.6-2	Espace large
2-6	Espace très large
>6	Espace extrêmement large

D. Ouverture

C'est la distance qui sépare les deux lèvres d'une discontinuité. Elle est très difficile à évaluer à cause du remplissage de la discontinuité et de sa rugosité, elle est déterminante pour

l'écoulement et le comportement mécanique des fissures [2].

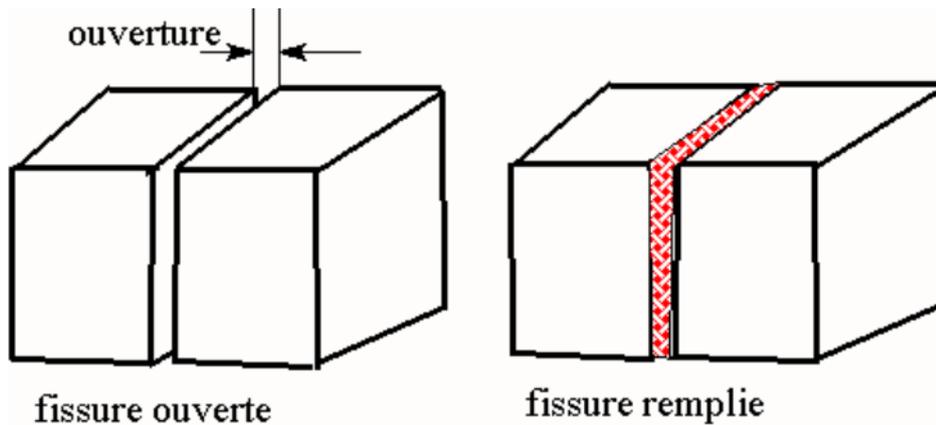


Figure I.17. Fissure ouverte et remplie [3]

En général, les propriétés du matériau 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, ...).

Tableau I.7: Description des discontinuités selon la mesure des ouvertures [15].

Ouverture Dispositif	Description	Dispositif
< 0.1 millimètre	Très étroit	Dispositif fermé
0.1 – 0.25 millimètre	Etroit	
0.25 – 0.5 millimètre	Partiellement ouvert	
0.5 – 2.5 millimètres	Ouvert	Dispositif espacé
2.5 – 10 millimètres	Largement ouvert	
1 – 10 centimètres	Très largement ouvert	Dispositif ouvert
10 – 100 centimètres	Extrêmement ouvert	
>1 mètre	Caverneux	

E. Persistance

C'est la mesure de la longueur continue ou de la surface d'une discontinuité. La longueur des traces des discontinuités est la seule quantification possible de la dimension des

discontinuités sur le terrain.

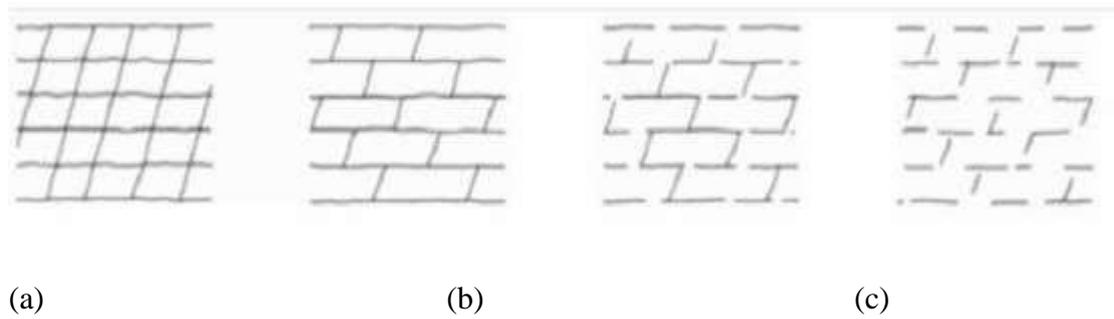


Figure I.18. Persistence de différents ensembles de fractures [15].

(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 persistances des discontinuités selon la longueur de leurs traces.

Tableau I.8: Classification des discontinuités selon leur extension [15].

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

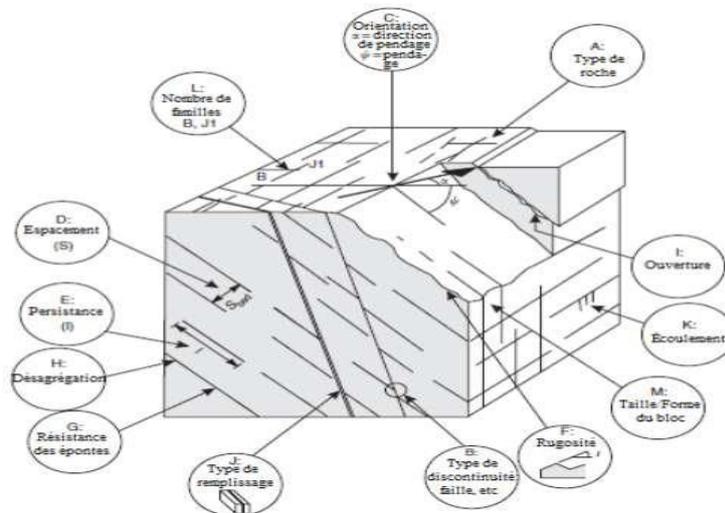


Figure I.19. Caractéristiques des discontinuités dans un massif rocheux; traduit de Wyllie et Mah (2004) [16].

F. Rugosité

La rugosité d'une surface de discontinuité est souvent un élément important en matière de résistance au cisaillement, en particulier là où la discontinuité est sans déplacement et imbriquée. La rugosité devient moins importante lorsque la discontinuité est remplie. 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 frôle du doigt la surface, celle-ci est rugueuse comme du papier de verre à gros grains. Les aspérités peuvent être visuelles.
- √ **Légèrement rugueuse** : la surface est rugueuse comme du papier de verre à grain plus fins. 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 (Voir Figure. I.20).

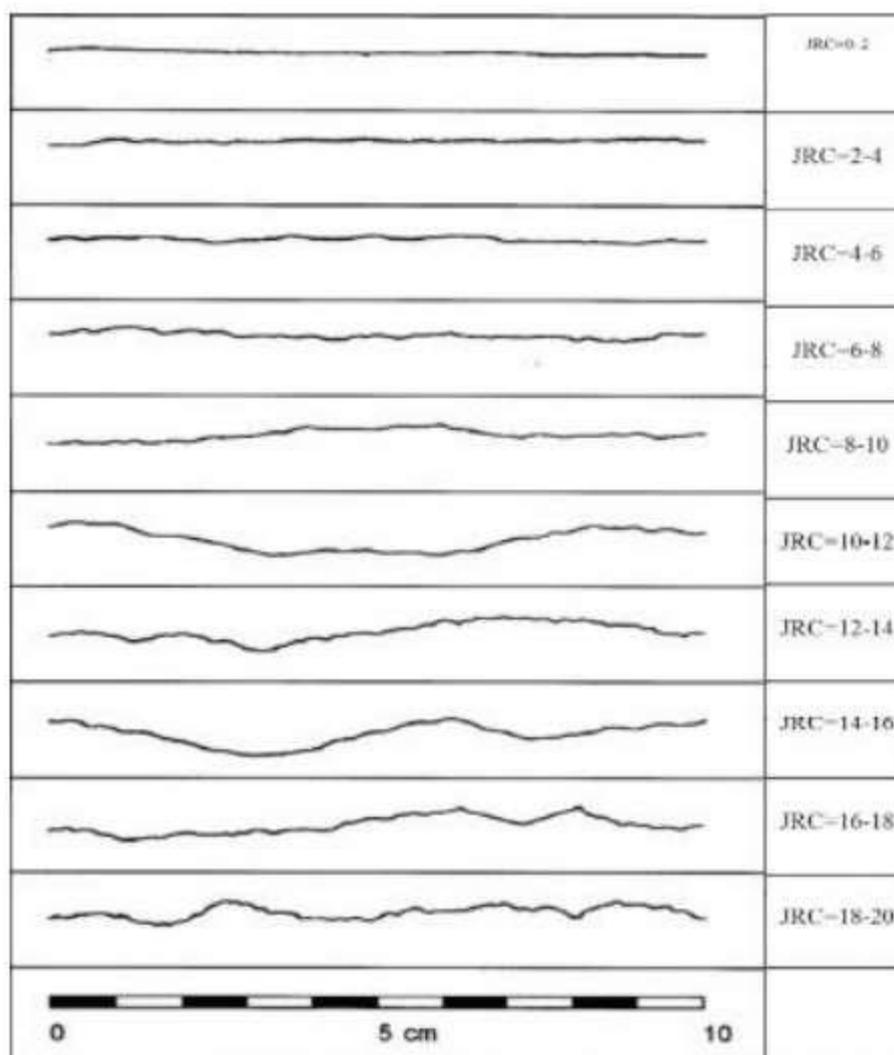


Figure I.20. Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC).

G. Nombre de familles de discontinuités

Organisation des discontinuités en familles directionnelles Les discontinuités d'un massif rocheux n'ont pas une orientation arbitraire, mais sont souvent organisées en familles dont le nombre est lié aux phénomènes géologiques et mécaniques qui se sont produits lors de la formation puis de l'histoire tectonique du massif. L'étude de la répartition d'une population de discontinuités en familles directionnelles se fait sur la base du traitement des paramètres azimut et pendage, mais d'autres paramètres géométriques, tels que l'extension et l'ouverture, peuvent également être pris en compte.

H. Le degré de fissuration des roches

Les fissures ou les discontinuités sont la clef du comportement des roches et des massifs rocheux. On peut les définir comme des vides plats dont le rapport de l'épaisseur à la longueur est de l'ordre de 10^{-3} . Sous l'effet des charges, ces fissures se referment progressivement, donc avec un changement de géométrie et, comme pour les sols, avec une non-linéarité entre efforts et déformations, du moins tant que les fissures ne sont pas complètement fermées, ce qui se produit à des pressions variables selon les roches et leur état de fissuration, mais qui peut être de l'ordre de 25 à 50 MPA pour un calcaire (soit la pression géostatique correspondant à une profondeur de 1000 à 2000 m) [17]. La présence des fissures a une importance considérable (à l'échelle du joint de grains). L'indice de fissuration ID est égal à la distance moyenne entre les fissures :

$$ID = L / n \quad (\text{I.9})$$

Avec :

L : longueur de la partie étudiée du massif en mètre [m].

n : nombre de fissures sur la partie mesurée.

Le tableau I.9: Classification des discontinuités en fonction d'ID (d'après B.R.G.M. - Guide de prospection des matériaux de carrière) [18].

Classe	Intervalle moyen en [m]	Densité des discontinuités
ID1	>200	Très faible
ID2	60 à 200	Faible
ID3	20 à 60	Moyenne
ID4	6 à 20	Forte
ID5	< 6	Très forte

I.5.4. Caractéristiques mécaniques d'une discontinuité [19]

Le comportement mécanique d'une discontinuité est très complexe en comparaison avec celui de la roche intacte. Une fissure ne présente aucune résistance en traction et sa résistance

au cisaillement est très faible. Ses caractéristiques mécaniques dépendent de la rugosité de ses surfaces de son ouverture et des matériaux de remplissage éventuels (quartz, calcite, argile,...). Le comportement au cisaillement des discontinuités des roches est un phénomène complexe qui traduit l'influence de nombreux paramètres.

L'appréciation de la résistance au cisaillement des discontinuités et la détermination de la marge de sécurité par rapport à la rupture sont des questions essentielles pour l'étude des problèmes de stabilité. Parmi les principaux paramètres qui influent sur le comportement au cisaillement des discontinuités, on peut citer :

- Les caractéristiques géométriques des surfaces en contact (rugosité, irrégularité).

La nature des épontes et leur degré d'altération.

- L'épaisseur et la nature du matériau de remplissage.
- Le niveau des contraintes normales au moment du cisaillement.
- Le niveau des contraintes normales préexistantes.
- La présence d'eau dans la discontinuité ou la teneur en eau du matériau de remplissage.
- L'amplitude du déplacement tangentiel et l'existence éventuelle de mouvements antérieurs suivant la même discontinuité.
- L'orientation du cisaillement.

a) Cisaillement suivant un plan horizontal

Considérons le cas d'une surface de rupture parfaitement horizontale qui ne renferme ni ondulations ni rugosité. On applique pour chaque spécimen d'un ensemble d'échantillons, une contrainte normale σ de part et d'autre du plan de discontinuités et une contrainte de cisaillement τ qui entraîne un déplacement u mesuré, (figure I.21, a)

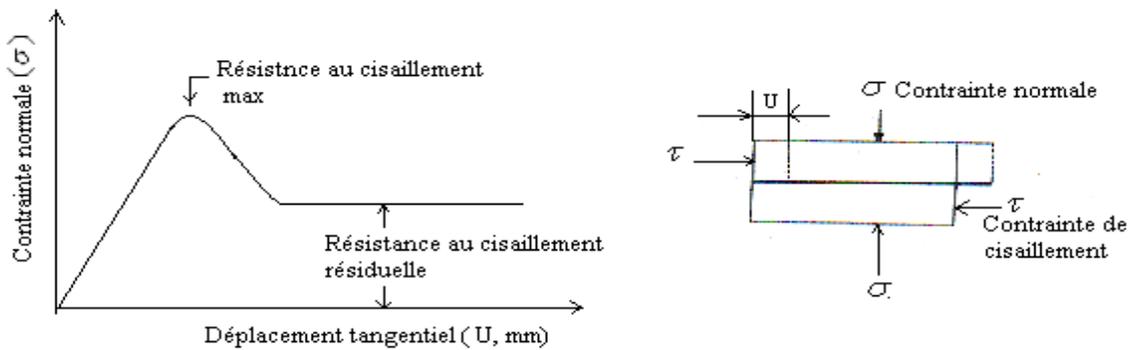
Pour des petits déplacements, le spécimen possède une élasticité et la contrainte de cisaillement augmente linéairement en fonction du déplacement, Une fois les forces de résistance surmontées, la courbe devient non linéaire et atteint son sommet qui correspond à la valeur maximale de la contrainte au cisaillement. Ensuite l'effort de cisaillement provoque des nouveaux mouvements de déplacement puis il diminue rapidement et se maintient à une valeur constante qui constitue la contrainte au cisaillement résiduelle (voir figure I.23, b).

Si les valeurs maximales de résistance obtenues des tests de charriage pour des valeurs de σ normale sont jointes, elles formeront la courbe suivante qui sera approximativement linéaire, la pente est égale à l'angle de frottement interne ϕ et la projection sur l'axe des ordonnées, nous donne la valeur de la force de cohésion (figure I.21, c).

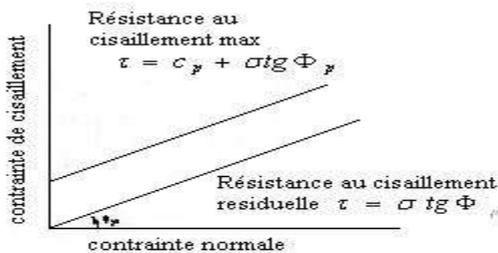
La limite au cisaillement est définie par la formule suivante:

$$\tau = c + \sigma n \operatorname{tg} \phi \quad (\text{I.10})$$

a)



b)



c)

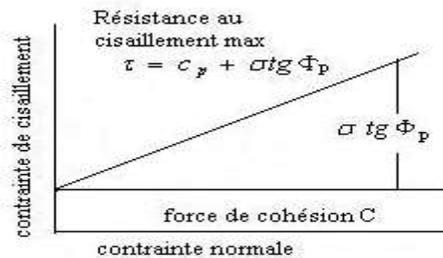


Figure I.21. Courbes de résistance au cisaillement suivant un plan horizontal. [15]

b) Cisaillement sur un plan incliné

Nous allons considérer maintenant le cas où la surface de discontinuités est inclinée suivant un angle ψ par rapport à la direction de la contrainte de cisaillement (figure I.22)

Dans ce cas, la contrainte de cisaillement et la contrainte normale agissent sur la surface de glissement suivant les équations suivantes :

$$\tau_i = \tau \cos 2i - \sigma n \sin i \cos i \quad (\text{I.11})$$

$$\sigma_i = \sigma \cos 2i + \sigma n \sin i \cos i \quad (\text{I.12})$$

L'on suppose la cohésion nulle, la résistance au cisaillement sera égale à :

$$\tau_i = \sigma_i \operatorname{tg} \varphi \quad (\text{I.13})$$

En substituant les équations (I.8) et (I.9) dans l'équation (I.10) on aura la relation qui détermine τ en fonction de $n \sigma n$ et la somme des angles $(i + \varphi)$, cette dernière est dite angle de frottement interne effectif :

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} (\varphi + i) \quad (\text{I.14})$$

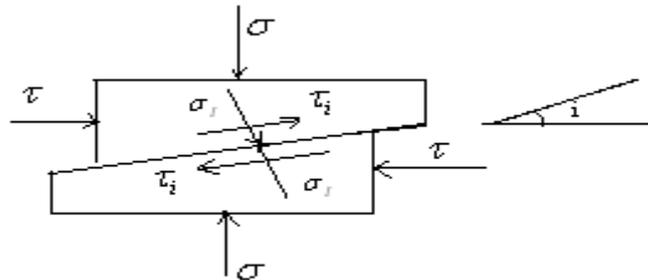


Figure I.22. Schéma de Cisaillement suivant un plan incliné.

I.5.5 Comportement des discontinuités naturelles

A. La rugosité

Des essais de laboratoire effectués sur des discontinuités créées artificiellement et comportant des rugosités différentes dans des roches identiques ne montrent pas de différence significative de l'angle de frottement résiduel après un déplacement tangentiel relatif important des épontes. Sur la (Figure I.23) sont montrés les résultats d'essais de cisaillement en laboratoire effectués sur des échantillons de roches identiques comportant des discontinuités régulières obtenues par sciage et des discontinuités à forte rugosité (fissures de traction).

L'évolution vers la résistance résiduelle résulte à la fois d'un processus d'abrasion et de polissage qui détermine une évolution de la rugosité des épontes au cours du cisaillement.

δ mm

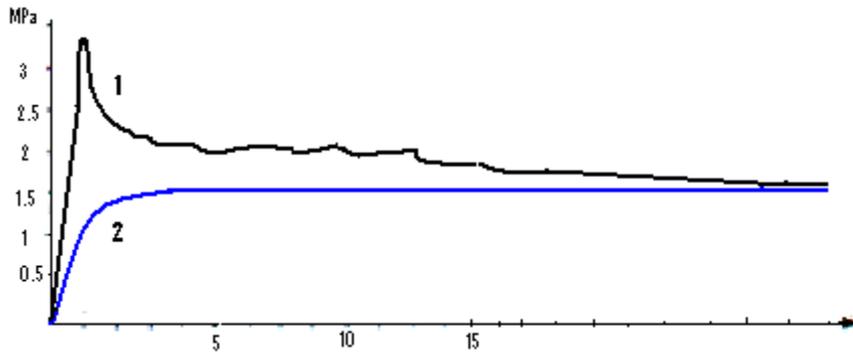


Figure I.23. Influence de la rugosité sur les résistances résiduelle et de pics.

- 1- discontinuités régulières (surface sciée).
- 2- discontinuités à forte rugosité (fissures de traction).

Dans le cas d'une discontinuité naturelle présentant une hétérogénéité de rugosité, un modèle comportant une succession de zones de forte rugosité et de zones de faible rugosité est montré sur la (Figure I.24). On remarque que la rupture des ponts de matière d'une fissure discontinue conduit à une fissure de rugosité hétérogène.

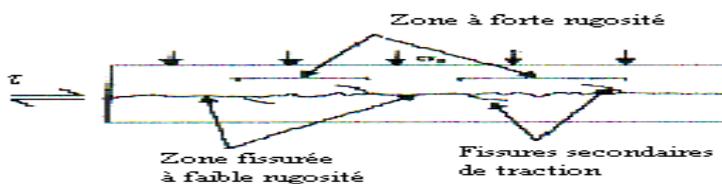


Figure I.24. Modèle de fissure à rugosité hétérogène.

Le dépassement de la résistance au cisaillement des zones de plus faible rugosité entraîne un report des efforts sur les zones de plus forte rugosité, intervient ensuite la dilatation entraînant l'affaiblissement progressif du terrain dans le sens du cisaillement. La résistance au cisaillement passe par un maximum et décroît ensuite jusqu'à la résistance résiduelle des épontes. Patton a démontré la signification pratique de cette relation par des mesures des valeurs moyennes de l'angle (i) à partir des traces ou profil de la surface d'enrochement.

Patton a trouvé que l'inclinaison de la trace d'engrènement est approximativement égale à la somme de la moyenne de l'angle (i) et l'angle de base du frottement interne, déterminé à l'aide du diagramme de Mohr, et il a trouvé que plus la surface d'engrènement est rugueuse plus la pente est raide.

Ainsi un aspect très important durant le cisaillement dans le domaine des discontinuités par rapport à la direction de la contrainte du cisaillement τ est le fait que n'importe quel déplacement de cisaillement (u) est accompagné d'un déplacement normal (U) comme représente dans la (figure I.22).

Le cas d'un spécimen comportant plusieurs engrènements l'aspect expliqué ultérieurement impliquerait que le volume du spécimen se dilaterait. Cette dilatation joue un rôle important dans le comportement durant le cisaillement des surfaces des roches.

A.1. Mesure de la rugosité des surfaces

Comme nous avons vu, la détermination de l'angle (i) peut être réalisée à partir des projections (profils) des surfaces d'engrènement. Ces projections sont en nombre de deux :

Projection de premier ordre qui est la projection de toute une ondulation régulière soit elle ou pas (figure I.25, a)

Projection de deuxième ordre représentant l'engrènement des ondulations elles-mêmes (figure I.25, b).

Cependant il n'est pas pratique de mesurer que les projections du premier ordre, c'est -à dire i (moyen) par rapport à la direction des surfaces d'engrènement

A.2. Mesure de l'angle de frottement interne

L'angle de frottement interne (Φ) est déterminé à l'aide du diagramme de Mohr construit à partir des résistances de la roche à la compression et à la traction.

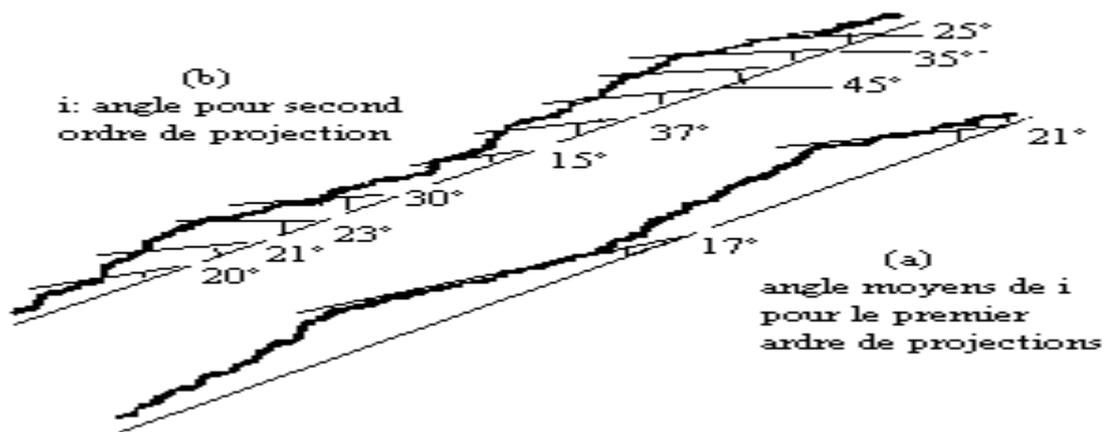


Figure I.25. Les mesures de Patton des angles de rugosité (i) pour le premier et le second Ordre des projections sur les surfaces de la roche rugueuse.

B. Imbrication

La maçonnerie de pierres de tailles (ou de briques ou de parpaings) comporte des assises comparables aux couches des roches sédimentaires diaclases, mais d'une couche à la suivante le maçon prend soin de décaler les joints perpendiculaires, pour obtenir une meilleure stabilité (par la liaison entre les blocs voisins d'une même assise). C'est une première forme d'imbrication (le mot vient des tuiles romaines d'un toit qui se recouvrent en partie).

Plus généralement l'imbrication d'un assemblage de blocs élémentaires, tant en maçonnerie que dans le massif rocheux, tient à ce que les formes des blocs sont étroitement complémentaires. Lorsque les joints d'une famille sont décalés, les deux formes d'imbrication s'additionnent. Les maçonneries des incas exploitent une imbrication plus poussée encore à trois dimensions, qui assure une résistance exceptionnelle aux séismes;

(Figure

I.26.).

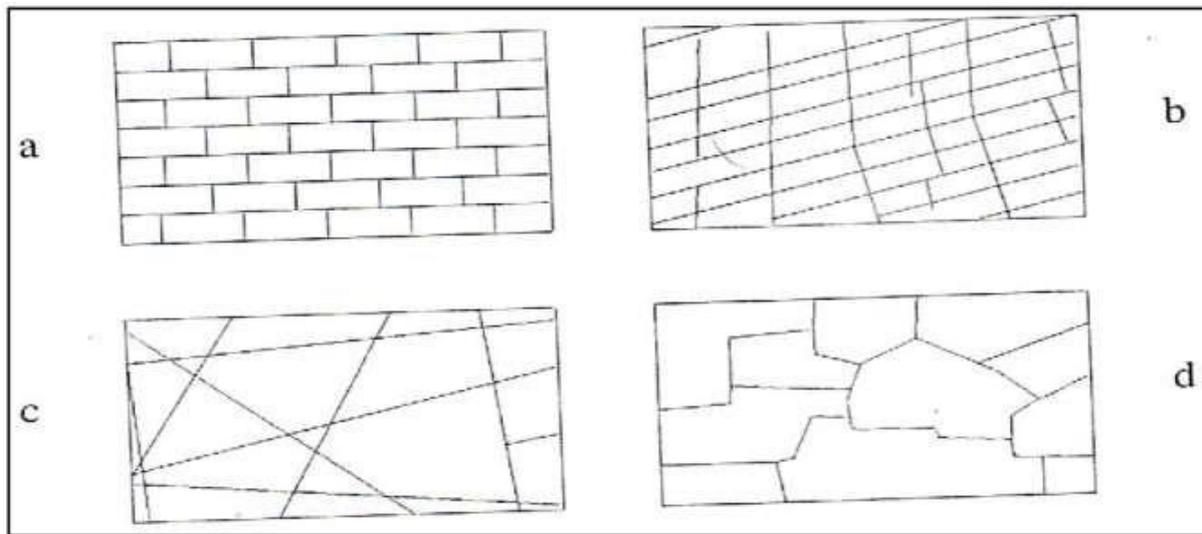


Figure I.26. Modèles schématiques d'imbrication des blocs du massif rocheux,
(CFMR-MMR, 2000).

- a. pierre de taille ou brique.
- b. affleurement de calcaires diaclases.
- c. affleurement de granite diaclases.
- d. maçonnerie inca (la pierre aux douze angles Cuzco).

Elle cause les courbes de cisaillement des discontinuités naturelles dans les roches présentent un pic de résistance d'autant plus marqué que les aspérités sont plus développées et bien imbriquées (figure I .26).

L'imbrication des aspérités accroît la simultanéité des cisaillements qui se développent au niveau des aspérités et entraînent une augmentation de la résistance apparente de l'échantillon. Toute cause tendant à réduire la complémentarité des deux surfaces en contact entraîne une réduction de la résistance du pic. Le développement relatif des épontes provoqué par une extérieurement (ébranlement, pression interstitielle,...) entraîne une réduction du degré d'imbrication des aspérités et une réduction corrélative de la résistance de pic, ceci souligne l'influence défavorable sur la résistance au cisaillement de tout déplacement relatif des épontes. La mobilisation de la résistance de pic nécessite généralement un faible déplacement tangentiel (de l'ordre du millimètre à quelques centimètres). Ce déplacement est d'autant plus faible que la rugosité des épontes est plus importante et que les aspérités sont plus imbriquées.

Par ailleurs, il semble que le déplacement tangentiel correspondant à la résistance de pic soit sensible à l'effet d'échelle et augmente avec la dimension des discontinuités.

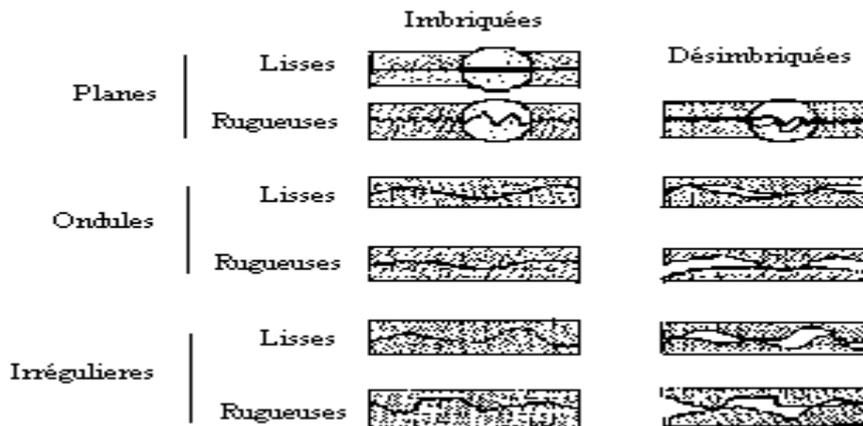


Figure I.27. Morphologie des épontes des discontinuités.

I.5.6. Influence de l'eau interstitielle

Une des caractéristiques les plus importantes de la surface de la terre est l'abondance de l'eau, tant sous forme liquide, que solide ou gazeuse. La circulation de cette eau dans les massifs rocheux est liée essentiellement à l'existence des discontinuités qui constituent des cheminements préférentiels. La présence d'eau dans les discontinuités entraîne une réduction de leur résistance au cisaillement. Trois facteurs semblent avoir un rôle :

a) Les pressions interstitielles

Elles provoquent l'ouverture rapide des fissures de la roche d'une part et modifient la distribution des contraintes normales sur les plans des fissures d'une autre part. Toute augmentation de la pression interstitielle diminue les contraintes effectives.

$$\sigma' = \sigma - p \quad (I.15)$$

Les valeurs des efforts tangentiels restant inchangées, l'obliquité des contraintes qui s'exercent sur les discontinuités se trouve augmentée par l'introduction des pressions interstitielles. Les pressions interstitielles peuvent affecter la stabilité des massifs rocheux.

b) La présence de l'eau

Dans les roches entraîne d'une manière générale une réduction de leurs caractéristiques mécaniques, en particulier la résistance au cisaillement des discontinuités décroît avec la résistance à la compression simple σ_c du matériau formant les épontes.

c) La variation de l'angle de frottement résiduel φ_r

Pour les roches fragiles : il semble que l'on observe que faible réduction de l'angle de frottement résiduel dans le cas des discontinuités très irrégulières par contre les surface lisses présentant une faible rugosité montrent une tendance inverse.

I.5.7. 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.

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 [20].

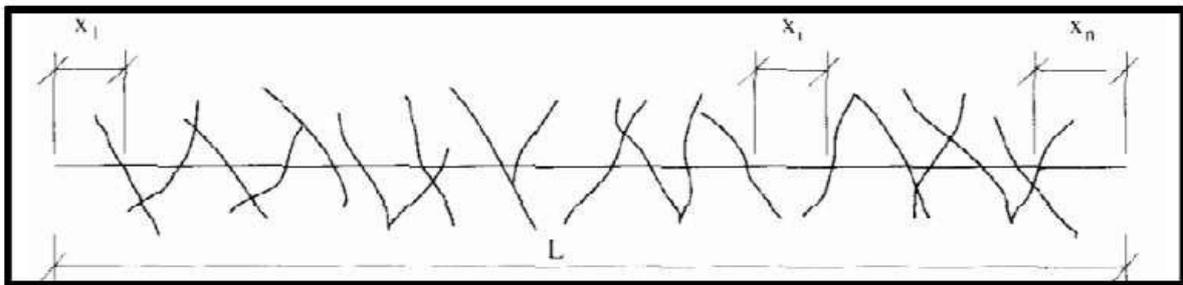


Figure I.28. Mesure de la fréquence de discontinuité [20].

I.5.8. La projection stéréographique des discontinuités

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.

Cette projection possède toutefois des défauts, elle dilate ou comprime les angles selon l'orientation. L'analyse de la projection stéréographique permet de déterminer le nombre de familles de fractures ainsi que l'orientation des pôles moyens de chaque famille de discontinuités identifiées. Une fois que les fractures sont regroupées en familles, les valeurs

moyennes de pendage et de direction de pendage et leurs fonctions de densité probabiliste peuvent être déterminées.

I.6. Représentation des orientations sur des diagrammes

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 Wolf (qui correspond à la projection stéréographique Diagramme iso angulaire). Mais en général, on utilise le canevas de Schmidt (Lambert Diagramme iso aire) 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.

Sur le plan équatorial figurent les projections des grands cercles et des petits cercles tracés sur l'hémisphère inférieur.

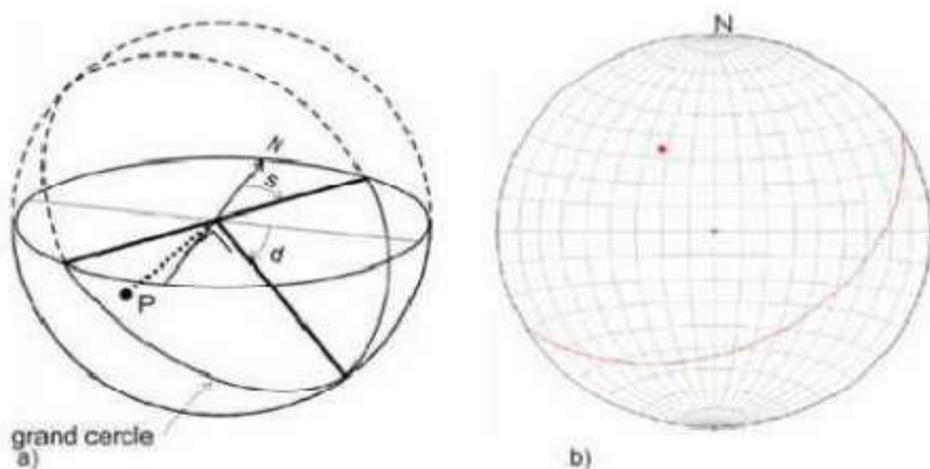


Figure I.29. Représentation stéréographique [15].

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

b) : canevas de Schmidt.

I.7. Conclusion

Les discontinuités représentent une caractéristique intrinsèque des massifs rocheux. Le comportement mécanique d'un massif rocheux est influencé par la géométrie et les caractéristiques mécaniques des discontinuités plutôt que par les caractéristiques propres de la matrice rocheuse. Les discontinuités sont caractérisées par une conductivité hydraulique par conséquent elles influent sur les caractéristiques mécaniques des massifs rocheux d'où la déstabilisation de ce dernier.

Étant donné l'importance de la présence de discontinuités sur les caractéristiques mécaniques des massifs rocheux et afin de pouvoir quantifier cet effet, nous avons besoin de connaître les caractéristiques géométriques des discontinuités et leurs caractéristiques mécaniques.

Chapitre II

Systemes de classifications
géomécaniques des massifs
rocheux

II.1. Introduction

Les systèmes de classification des massifs rocheux ont tout d'abord un rôle de synthétisation des données récoltées sur le terrain. En effet, il semble avantageux de disposer d'un outil permettant de regrouper de manière structurée toutes les informations fournies par les observations, les mesures et les comptes rendus des géologues.

Le rôle principal qu'on attribue généralement aux systèmes de classification des massifs rocheux est celui d'aide à la conception d'ouvrages en milieux rocheux. Ces systèmes sont en effet à la base des méthodes de dimensionnement empiriques. Leur rôle consiste de combiner les informations provenant d'observations, de mesures ou encore de l'expérience de manière à fournir des estimations quantitative et qualitative sur la situation du massif et le type du soutènement adéquat [21].

Toutefois, il est assez délicat de ne se fier qu'à cette approche, aussi détaillée soit elle.

II.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 [22].

II.3. Systèmes de classification des massifs rocheux

Il existe 16 systèmes de classification des massifs rocheux qui ont été développés pour leur utilisation en génie civil et minier, et ce, en se basant, en grande partie, sur la fissuration et le comportement mécanique de ces massifs. Malgré que ces systèmes soient largement utilisés en ingénierie, leur habilité à considérer la résistance anisotropique et l'effet d'échelle demeure limitée [21].

Tableau II.1. Systèmes de classification du massif rocheux [23].

Système de Classification	Référence	Pays d'origine	Applications
Rock Loads	Terzaghi, 1946	E.U.A	Tunnels avec support en acier
Stand-up	Time Lauffer, 1958	Autriche	Tunnels
New Austrian tunnelling method (NATM)	Rabcewicz, 1964/1965, 1975	Autriche	Tunnels
Rock Quality Designation (RQD)	Deere, 1968	E.U.A	Carottes de forage, Tunnels
Rock Strength Rating (RSR)	Wickham et al, 1972	E.U.A	Tunnels
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973, 1974, 1976, 1979 Bieniawski, 1989	Afrique du Sud E.U.A	Tunnels, mines, SLOPES
Extensions du système RMR	Laubscher 1977, 1984 Ghose and Raju. 1981 Kendorski et al. 1983 Serafim and Pereira, 1983. Gonzales de Vallejo, 1983 Unal, 1983 Romana, 1985 Newman et Bieniawski, 1985	Afrique du Sud Inde E.U.A Portugal Espagne E.U.A Espagne E.U.A	Mines Mines de charbon Mines en roche dure Fondations Tunnels Support du toit/charbon Stabilité des pentes Mines de charbon
Rock Mass Quality	Barton et al. 1974	Norvège	Tunnels, chambres
Strength-Size	Franklin, 1975	Canada	Tunnels
Ramamurthy & Aurora Classification (RAC)	Ramamurthy et Aurora, 1993	Inde	Roche intacte
Geological strength index (GSI)	Hoek et al. 1995	Canada	Mines
Rock mass index system (RMI)	Palmström, 1995	Norvège	Tunnels, TBM, mines

Les systèmes de classification des massifs rocheux fracturés les plus répandus sont :

- ❖ RQD (Rock Quality Designation) d'après Deere (1968);
- ❖ RMR (Rock Mass Rating) d'après Bieniawski (1989);
- ❖ GSI (Geological Strength Index) d'après Hoek- Brown (1995);
- ❖ Q Barton (1974);
- ❖ SMR (slop mass rating) d'après Romana (1985).

II.3.1. La méthode RQD (Rock Quality Designation)

C'est une méthode proposée par Deere en 1964 et obtenue à partir de carotte de forage géologique, c'est un indice représentant l'évaluation du pourcentage des carottes récupérées sur une longueur de course précise.

II.3.1.1. Principe de calcul du RQD

Le calcul de RQD est basé sur un procédé qualitatif, seule la somme des longueurs de morceaux de plus de 10 cm (4 pouces) est conservée. Cette somme est divisée par la longueur de course de la carotte de forage. Ce paramètre est défini comme suit :

$$\text{RQD} = \frac{\sum L_i > 10\text{cm}}{L_t} \quad (\text{II. 1})$$

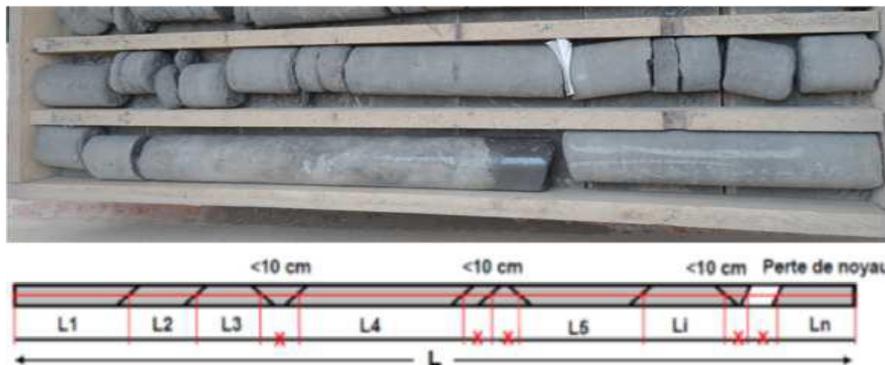


Figure II.1. Une carotte [15].

Tout calcul du RQD doit être réalisé selon différentes longueurs de course de carotte de forage afin de séparer les différents plans de sédimentations, zones de faiblesse, des structures locales, ...etc.

La relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif peut être établie selon la proposition de Deere en 1988. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.2. Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux [24].

RQD	Qualité des roches
<25	Très médiocre
25-50	Médiocre
50-75	Moyenne
75-90	Bonne
90-100	Excellente

L'indice fonctionne adéquatement pour différentes techniques de forage ou différentes grandeurs de diamètre de forage, à moins que cette technique cause une perte considérable du taux de récupération de la carotte ou cause des brisures mécaniques excessives [24].

II.3.1.2. Les inconvénients du système RQD

- ✓ Le RQD peut donner des résultats différents en fonction de l'orientation du trou de forage géologique par rapport au massif rocheux ;
- ✓ La mesure des espacements des joints est ainsi sensible à la direction ce qui ne permet pas d'évaluer les conditions d'espacement des discontinuités hautement anisotrope.

Pour ces raisons on ne peut constituer adéquatement un outil exclusif de système de classification des roches. Le système RQD est utilisé dans d'autres classifications en tant que paramètre principalement en raison de sa force descriptive du système de discontinuités du massif [25].

II.3.2. Classification RMR (Rock Mass Rating)

Le RMR a été développé par Bieniawski dans les années 1970. Il est basé sur l'expérience professionnelle de l'auteur dans des tunnels de faible profondeur pour des massifs sédimentaires.

Un certain nombre de paramètres est évalué à l'aide d'un tableau qui attribue un nombre de points en fonction de leur valeur. La somme de tous les points permet d'obtenir la valeur RMR totale.

Depuis son apparition, le système initial a reçu de nombreuses modifications et extensions, par Bieniawski, 1974 ; 1976 ; 1979 et dernièrement en 1989 :

- ❖ En 1974, Bieniawski présente la première modification qui est un réarrangement des paramètres de la classification (il passe de 8 à 6 paramètres).
 - ❖ En 1976, Bieniawski effectue des modifications par rapport au design de support de terrain, réduit le nombre de classes de roche à 5 groupes dominants de 20 points chacun et introduit le concept de rugosité.
 - ❖ En 1979, Bieniawski réajuste pour la dernière fois la valeur du coefficient pour l'eau, la condition et l'espacement de joints.
- En 1989, Bieniawski a joint des directives de sélection du patron du support de terrain pour une combinaison de boulons mécanique, béton projeté et arche d'acier selon la qualité du massif rocheux. Dans le domaine minier, plusieurs facteurs influencent ces directives de support de terrain telles que la forme, la grandeur, profondeur de l'excavation ainsi que la technique utilisée. Beaucoup de précautions doivent être apportées lors de l'application du RMR pour le design de support dans le domaine minier.

Lors de chaque modification, il y a eu une redistribution des valeurs pour les différents paramètres. Pour cette raison, l'utilisateur du système doit mentionner quelle version est utilisée afin de bien classer le terrain [26].

II.3.2.1. Principe de calcul du RMR

Se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants :

- ✓ A1 : Résistance en compression uniaxiale de la roche intacte ;
- ✓ A2 : RQD (Rock Quality Index) ;
- ✓ A3 : Espacement moyen des discontinuités ;
- ✓ A4 : Condition des discontinuités (ouverture, persistance, rugosité...) ;
- ✓ A5 : Les conditions hydrogéologiques du massif rocheux ;
- ✓ A6 : Orientation des discontinuités par rapport aux directions représentatives du problème traité.

Les notes A1, A2 et A5 correspondant aux paramètres établies pour l'ensemble du massif rocheux, alors que A3, A4 et A6 sont évaluées pour chaque famille de discontinuités.

Le calcul se base sur la sommation des divers paramètres afin de produire une cote finale du RMR de base comprise entre 8 et 100 points.

$$\text{RMR de base} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 \quad (\text{II.2})$$

Tableau II.3. Classification RMR [26].

PARAMETRES		COEFFICIENTS							
1	Résistance de la roche (MPa)	Indice de 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	154	<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		>2 m	0,6-2 m	0.2-0,6 m	0,06-0,2 m	<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		

Inspiré par un des paramètres dans le système de classification RSR (Rock Structure Ratin) de Wickham et al. 1972, Bieniawski suggère un paramètre de réduction tenant compte de l'orientation du tunnel par rapport à l'indication du pendage. Le paramètre A6 est négatif afin de réduire la qualité du massif rocheux. La classification doit tenir compte de l'influence de conditions externes applicables à l'ingénierie :

$$\text{RMR modifié} = \text{RMR de base} + A6$$

(II.3)

Tableau II.4. Valeur du paramètre de réduction A6 selon l'orientation du tunnel par rapport à l'indication du pendage, [26].

Pendage et direction des discontinuités		Très favorable	Favorable	Bonne	Défavorable	Très défavorable
Note	Tunnel	0	-2	-5	-10	-12
	Fondation	0	-2	-7	-15	-25
	Talus	0	-5	-25	-50	-60

Bieniawski (1976) présente une classification et description pour le massif rocheux selon l'indice RMR final. Cette classification comprend 5 groupes d'intervalle de 20 points par classe dont la description rocheuse variant entre roches de très faible qualité à très bonnes roches.

Tableau II.5. Qualité du massif rocheux selon le RMR [26].

Note globale	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Classe du massif rocheux	I	II	III	IV	V
Description du massif Rocheux	très bon rocher	bon rocher	Rocher Moyen	Rocher Médiocre	rocher très médiocre

II.3.2.2. Estimation des caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR

Le RMR permet aussi d'estimer des paramètres mécaniques des massifs comme le temps de soutien moyen, la cohésion et l'angle de frottement du massif rocheux. Plusieurs auteurs ont proposé des relations entre ces paramètres et la valeur du RMR.

Il existe des corrélations qui permettent d'estimer la cohésion, l'angle de frottement ainsi que le module de Young [27] :

a- La cohésion :

$$C_{eq} \text{ (kPa)} = 5 \text{ RMR}, \quad \text{(II. 4)}$$

b- L'angle de frottement :

$$\varphi_{eq}(\text{°}) = 0,5 \text{ RMR} + 8,3 \pm 7,2 \quad \text{(II.5)}$$

c- Le module de Young :

$$E_{eq} \text{ (GPa)} = 10(\text{RMR}-10)/40, \quad \text{(II.6)}$$

Stille et al. (1982) ont proposé d'utiliser les équivalences du Tableau II.6 pour estimer la résistance à la compression simple du massif rocheux.

Tableau II.6. Relation entre RMR sec et la résistance à la compression simple (Stille et al.1982).

RMRsec	RMRsec= A1 + A2 + A3 + A4				
	<21	21 -40	41 – 60	61 – 80	>80
Rc(MPa)	0,5	2,5	5	2	30

II.3.2.3. Limitations du système RMR

- ❖ Dans le domaine minier, le paramètre de l'orientation des discontinuités (A6) est ignoré, le système conservé redevient le RMRde base. Cette correction est apportée principalement pour ignorer les conditions environnementales résultant en une classification dépendante du massif rocheux uniquement [22].
- ❖ Les contraintes sont ignorées comme paramètre du système RMR, il estime le système RMR adéquat pour un projet jusqu'à une contrainte verticale de 25 MPa. Mais souvent dans le domaine minier, les exploitations souterraines ont des niveaux de contraintes supérieurs [22].

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 [26].

II.3.3. Système 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 :

$$\text{SMR} = \text{RMR de base} + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4 \quad (\text{II.7})$$

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).

$$F1 = (1 - \sin A)^2 \quad (\text{II.8})$$

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 :

$$F2 = \tan^2 \beta_j \quad (\text{II.9})$$

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 II.7 :

Tableau II.7. Notes des paramètres du SMR [28].

SMR= RMR de base + (F1*F2*F3) + F4						
Facteurs d'ajustement liés aux joints (F1, F2, F3).		α_j =Direction du pendage des joints β_j =Pendage du joint α_s =Direction du pendage du talus β_s =Pendage du talus				
		Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable
Rupture plane $ \alpha_j - \alpha_s $ =		>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°
Basculement $ \alpha_j - \alpha_s - 180° $ =						
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 de F2	Rupture plane	0.15	0.4	0.7	0.85	0
	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 II.8. Description des classes SMR [28].

Description des classes SMR										
Classe	Va	Vb	Iva	IVb	IIIa	IIIb	IIa	Iib	Ia	Ib
Description	Très mauvais		Mauvais		Moyen		Bien		Très bien	
Stabilité	Complètement Instable		Instable		Partiellement Stable		Stable		Complètement Stable	
Rupture	Grand plan		Plan ou grand dièdre		Quelques joints ou beaucoup de dièdres		Quelques Blocs		Aucune	
Support	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.).

PROBABLE FAILURES ACCORDING SMR VALUES										
PLANE FAILURE	VERY BIG		MAJOR		MANY		MINOR		NONE	
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-70	70-80
WEDGE FAILURE	POSSIBLE		MAJOR		MINOR		NONE		NONE	
TOPPLING	POSSIBLE		MAJOR		MINOR		NONE		NONE	
MASS FAILURE	POSSIBLE		MAJOR		MINOR		NONE		NONE	
SMR →	0	10	20	30	40	45	50	55	60	70
REEXCAVATION			REEXCAVATION WALLS							
DRAINAGE			SURFACE DRAINAGE DEEP DRAINAGE							
CONCRETE					SHOTCRETE DENTAL CONCRETE RIBS and/or BEAMS TOE WALLS					
REINFORCEMENT							BOLTS ANCHORS			
PROTECTION								TOE DITCH TOE or SLOPE FENCES NETS		
NO SUPPORT									SCALING NONE	
SUGGESTED SUPPORT METHODS										

Figure II.2. Méthodes de confortement proposées selon la valeur du SMR [28].

II.3.4. Système Q Barton (1974)

La classification NGI (Norwegian Geotechnical Institute) est introduite par Barton et al. en 1974. Elle est définie par l'indice de qualité du massif rocheux Q, qui tient compte :

- De l'indice du degré de fracturation et de la grosseur des blocs qui constituent le massif, exprimé par le rapport RQD/Jn (Jn : nombre de famille de discontinuités).
- De la résistance au cisaillement des discontinuités exprimée par le rapport Jr/Ja (Jr : paramètre de rugosité des joints, Ja : paramètre d'altération des joints).
- Du facteur relatif à des contraintes actives exprimé par le rapport Jw/SRF (Jw : paramètre hydraulique, SRF : paramètre de réduction relatif aux contraintes).

$$Q = RQD/jn * jr / ja * jw / srf \quad \text{(II. 10)}$$

$$Q' = RQD/jn * jr / ja \quad \text{(II. 11)}$$

La classification attribue une échelle de la qualité du massif rocheux allant de 0,001 à 1000. Lorsque le rapport Jw/SRF = 1, l'indice de qualité du massif rocheux est exprimé par Q'.

Tableau II.9. Paramètre Jr (paramètre de rugosité des joints), [29].

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

Tableau II.10. Paramètre Ja (paramètre d'altération des joints), [29].

	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 frottement	Sable, silt, calcite etc. (non radoucissant)	3
		Enduits cohésion, épaisseur < 1- 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	

Tableau II.11. Paramètre Jw (paramètre hydraulique), [29].

Influence de l'eau en charge	Jw	Pression d'eau approximative (kgf/cm ²)
- 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
<p>Note :</p> <p>(i) les 4 derniers indices sont des estimations grossières. Augmenter la valeur de JW en cas de mise en place d'un dispositif de drainage .</p> <p>(ii) les problèmes particuliers liés à la formation de glace ne sont pas pris en compte.</p>		

Tableau II.12. Paramètre de Jn (nombre de famille de discontinuités), [29]

Nombre de famille de diaclases	Jn
Massif, peu ou pas de diaclases	0.5-1
Une famille de diaclases	2
Une famille et diaclases aléatoires	3
Deux familles de diaclases	4
Deux familles et diaclases aléatoires	6
Trois familles de diaclases	9
Trois familles et diaclases aléatoires	12
Quatre familles et plus, diaclases aléatoires très nombreuses	15
Roche concassée, semblable à un sol	20
<p>Note :</p> <p>1. Pour une intersection, utilisez 3 xJn</p> <p>2. Pour un portail, utilisez 2 x Jn</p>	

Tableau II.13. Paramètre de SRF (paramètre de réduction relatif aux contraintes), [29].

Ouvrage recoupant zone de faiblesse provoquant 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.				
		$S_c/\alpha L$	$\alpha q/\alpha c$	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 $5 < \alpha < 1/\alpha < 3 < 10$, réduire αc à $0.75 \alpha c$. Pour $\alpha < 1/\alpha > 10$, 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.				
			$\alpha \theta/\alpha c$	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

Tableau II.14. Classification du massif rocheux selon le Q [29].

Valeur de Q	Classe	Qualité du massif rocheux
400-1000	A	Exceptionnellement bon
100-400	A	Extrêmement bon
40-100	A	Très bon
10-40	B	Bon
4-10	C	Moyen
1-4	D	Mauvais
0.1-1	E	Très mauvais
0.01-0.1	F	Extrêmement mauvais
0.001-0.01	G	Exceptionnellement Mauvais

II.3.5. Système du GSI (Geological Strength Index)

Introduit par Hoek - Brown en 1995, le GSI est un nombre sans dimension, déterminé empiriquement, il varie entre 5 et 85, et qui peut être estimé à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in situ. La méthode GSI s'appuie donc sur une observation directe de la structure du massif rocheux.

Tableau II.15. Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI, [30].

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

Ayant calculé le RMRde base et Q' le GSI peut être déterminé par les corrélations suivantes :

$$\text{GSI} = \text{RMRde base} - 5 \text{ si } \text{RMRde base} > 23 \quad (\text{II.12})$$

$$\text{GSI} = 9 (\text{Log } Q' + 44) \text{ si } \text{RMRde base} < 23 \quad (\text{II.13})$$

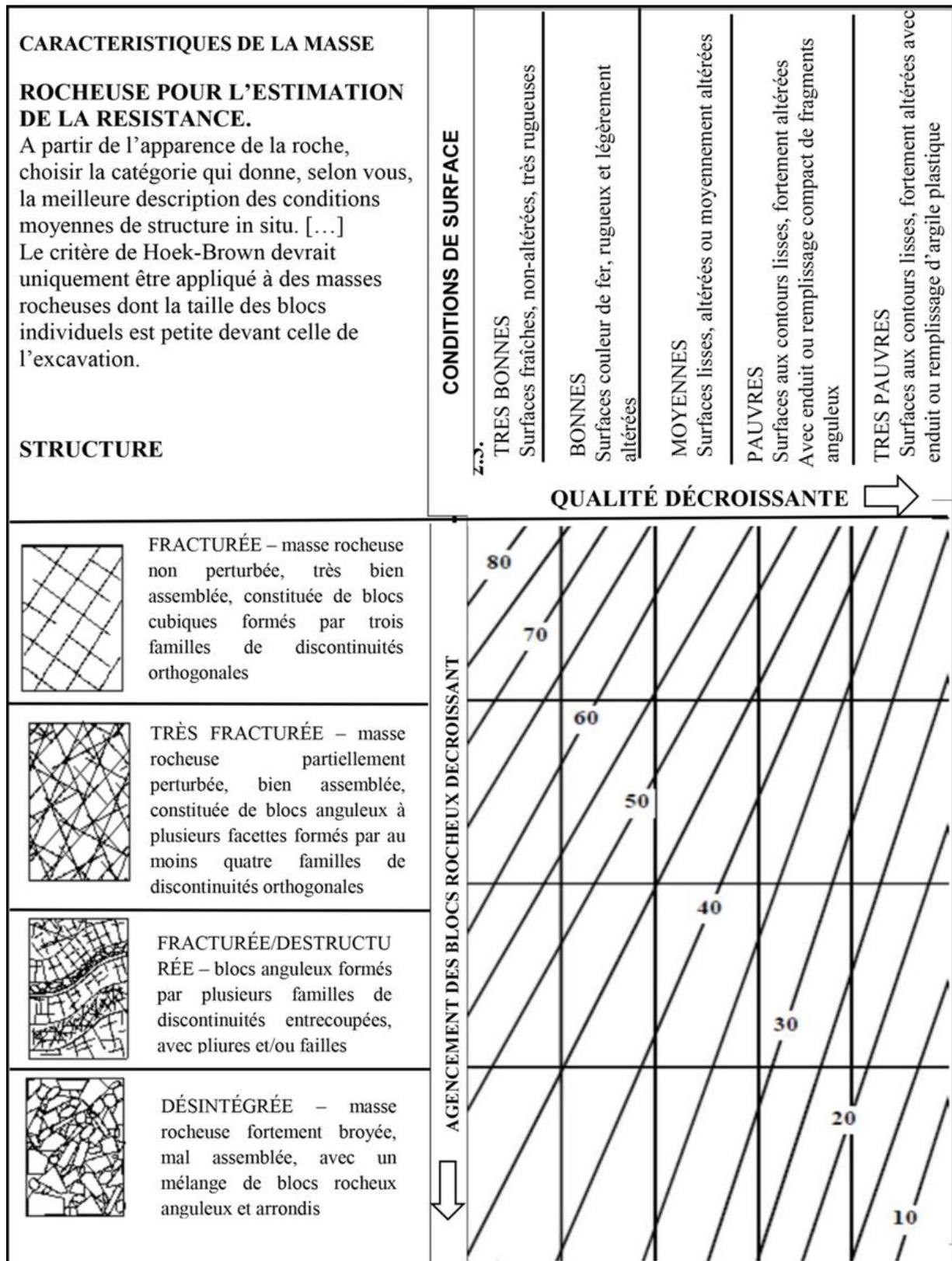


Figure II.3. Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse

[30]

II.3.5.1. Système GSI modifié (1999)

Sonmez et Ulusay (1999) ont proposé des perfectionnements à la classification GSI qu'ils estiment trop approximative. A leur avis, le manque de paramètres permettant de décrire les conditions de surface des discontinuités et la structure de la masse rocheuse empêche d'obtenir des valeurs plus précises du GSI. Pour ces raisons, ils ont suggéré l'introduction de deux paramètres additionnels :

a- SCR (Surface Condition Rating) :

Cet indice s'obtient par sommation de 3 coefficients décrivant la rugosité, l'altération et le remplissage des joints :

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad \text{(II.14)}$$

R_r , R_w et R_f peuvent être estimés à partir de la figure (II.3).

b- SR (Structure Rating) :

La dimension des blocs peut être un indicateur très important du comportement mécanique de la roche : de grands blocs sont en général moins déformables et moins rotationnels que des blocs plus petits [30].

La courbe semi-logarithmique située en haut à gauche de la figure II.4 permet de déduire une valeur du SR, à partir de la mesure de la densité volumique des joints (J_v).

A l'aide de ces deux paramètres supplémentaires, Sonmez et Ulusay estiment que l'apport d'informations concernant les propriétés structurelles de la roche permet de déterminer une valeur plus précise pour le GSI.

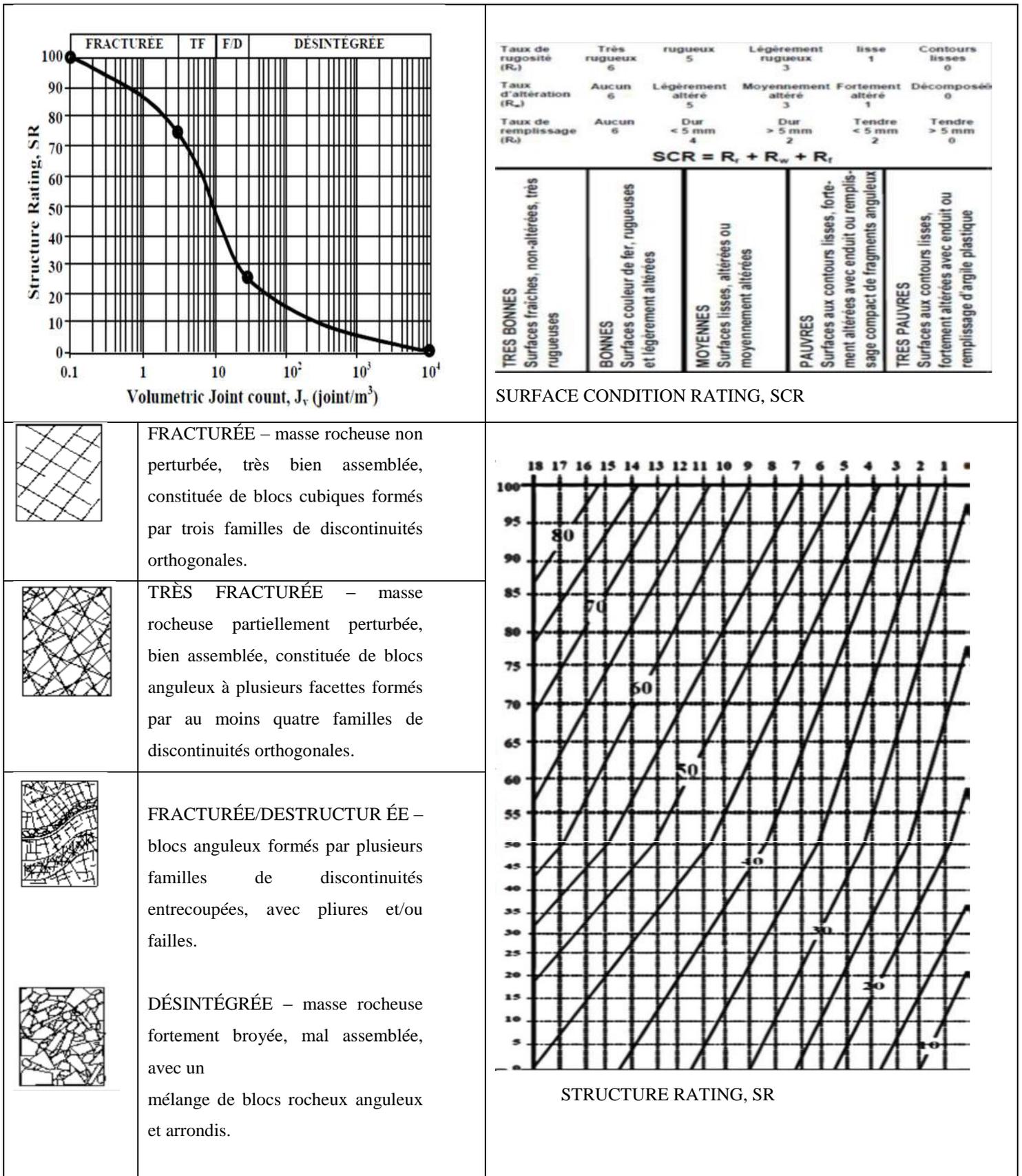


Figure II.4. Estimation du GSI modifié à partir d'une description géologique de la masse rocheuse [31].

II.4. limitation des systèmes de classification

Les classifications quantitatives des massifs rocheux fracturés sont utilisées depuis 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 [22].

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

- 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 [22].
- Les propriétés complexes du massif rocheux, en particulier son anisotropie et son comportement différé (dépendant du temps) ne sont pas pris en compte.
- Les paramètres de déformabilité et de résistance qui en résultent sont relatifs à un milieu isotrope [22].
- Le RMR et le Q-system ne sont pas adaptés au cas de roches tendres [22].

II.5. Conclusion

Les systèmes de classification des massifs rocheux sont des méthodes empiriques qui déterminent les propriétés du massif en fonction de plusieurs facteurs affectant sa stabilité. Ces facteurs sont reliés notamment à la résistance de la matrice rocheuse, la présence de l'eau et la description des discontinuités (nombre de Familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage,...etc).

Chapitre III

Généralités sur les gisements de djebel Onk

III.1.Introduction

L'industrie phosphatée algérienne est née à la fin du XIXème siècle avec la découverte et la mise en exploitation de plusieurs gisements à l'Est du pays (El Kouif, Mzaita, Ras El Oued, Bordj El Ghedir). En 1962 commença l'exploitation du plus grand gisement algérien de phosphate, Le Djebel Onk.

Les phosphates de la région du Djebel Onk font partie d'une succession d'assises sédimentaires, développées dans l'Est et le Sud-est constantinois (Algérie), Elle présente une série tertiaire au passage entre le Paléocène et l'Eocène inférieur.

III.2. Généralité

III.2.1. Historique de site

Les phosphates Algériens ont été découverts à BOUGHARI par PH.THOMAS en 1873. Dans la période (1907 -1908) L.JOLEAU à découvert le gisement de Djebel Onk, des informations plus complètes ont été présentées par D.DUSSERT, mais surtout FLANDRIN en 1948 qui contribua à l'apport des nouvelles plus détaillées.

Ce n'est qu'en 1931 que ces phosphates font l'objet d'une première concession par la compagnie des phosphates de CONSTANTINE qui était le principal producteur en Algérie suite à laquelle fût créer la société S.D.O en 1936.

De 1961 à 1963, des essais de prospection radio métrique aéroportée sont effectués au-dessus du gisement de Djebel Onk.

En 1963, les études géologique et minière précédant l'exploitation du gisement de Djemi Djema sont réalisées par la société SERMI, pour la société de DJEBEL-ONK (rapports de G.RANCHIN, 1963, A.B.C) parallèlement, la société française SOFREMINE (1962 rédige un avant-projet d'exploitation du gisement de KEF ESSENOUN).

Ce n'est qu'en mois de Février 1965 que débute l'exploitation de Djemi Djema (SOCIETE DU DJEBEL-ONK) qui aurait dû relayer, en 1963, la fin de l'exploitation de DJEBEL-KOUIF commencée en 1894.

En 1971 à 1974, les travaux de recherche et de prospection sur les phosphates dans l'Est de l'Algérie qui ont été relancé par la SONAREM, sont suivis par une compagne de

Chapitre III : généralités sur les gisements de djebel Onk

prospection et d'évaluation du district minier de Djebel Onk. (1977 - 1979) : S-3 - K, S-4 - K, S-5 - K. Tranchées dans les dressants.

De 1985 - 1987, l'EN FERPHOS a confié à l'EREM des travaux de recherche et d'évaluation des ressources en phosphate de tous les gisements potentiels de la région du Djebel -Onk, notamment le gisement de KEF ESSENOUN a été reconnu en détail par l'EREM au cours de l'année 1986, grâce à 32 sondages carottés notés S-2 à S-46 réalisés à la maille de 250 x 300 m et 22 tranchées réalisées dans les dressants de KEF ESSENOUN, notées Tr 22 à Tr 44.

En Novembre 1989, l'EN FERPHOS fait connaître son cahier des charges pour des études de développement du Complexe minier de Djebel Onk.

En Avril 1992, signature du contrat entre l'EN FERPHOS et le consultant BRGM/SOFREMINES concernant le rassemblement des éléments techniques et économiques permettant d'arrêter un projet de développement de l'exploitation des gisements de phosphate de Djebel Onk.

En 1993, BRGM a fourni un rapport d'expertise géologique de tous les gisements de Djebel Onk [32].

III.2.2. Géologie régionale de Djebel el Onk

III.2.2.1. Litho stratigraphie régionale

La carte géologique montre que la série sédimentaire affleurant de la région du Djebel Onk comprend une sécession stratigraphique allant du Crétacé supérieur (Maestrichtien) à l'Eocène moyen (Lutétien), cette série est marine, recouverte en discordance par une épaisse série Sablo Argileuse continentale d'âge Miocène, puis le quaternaire (Alluvions, Eboulis) [32].

III.2.2.2. La tectonique régionale

La région du Djebel Onk appartient, avec l'Atlas Tunisien, à l'extrémité orientale de l'Atlas saharien.

La série Crétacé supérieur du bassin de Djebel Onk est structurée en une suite d'anticlinaux et de synclinaux dissymétriques, généralement faillées dans leurs flancs (Failles

Chapitre III : généralités sur les gisements de djebel Onk

normales, failles inverses), d'axe le plus souvent SW- NE, et décroches par des accidents transverses N120 a N140E [32].

III.2.2.3. Situation géographique

La région est située à 100 km au Sud de la wilaya de Tébessa et à 20km de la frontière Alger-Tunisienne, sur la route qui relie Tébessa a El oued.

Cette région constitue la limite géographique naturelle entre les Hauts Plateaux Constantinois et le Domaine Saharien.

Topographiquement : le massif du Djebel Onk forme un ensemble calcaire de 20km de longueur qui culmine à 1198m d'altitude au Djebel Tarfaya, les altitudes les plus basses au pied du Djebel Onk sont d'environ 635m.

Les gisements de Djemi Djema et Kef Essenoun, actuellement sont exploités en carrières par Somiphos immédiatement au Sud du massif du Djebel Onk, n'est distant que de 4 km de la ville de Bir El Ater [32].

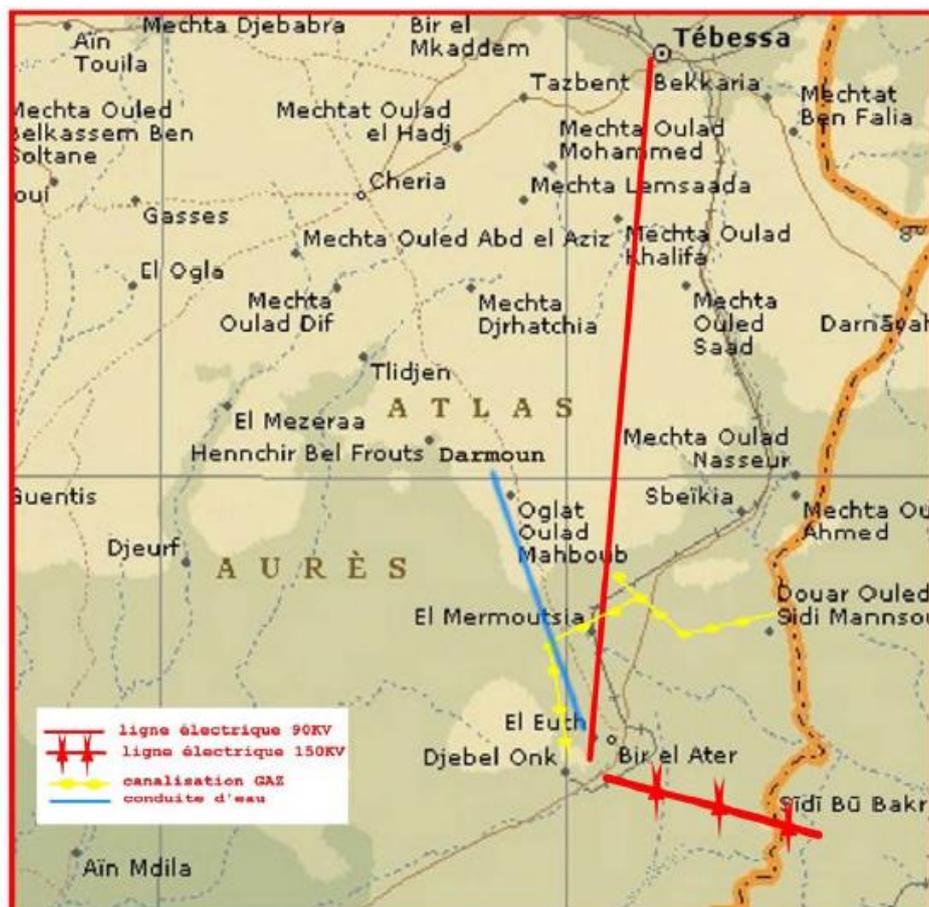


Figure III .1 Carte de situation géographique de Djebel Onk.

Chapitre III : généralités sur les gisements de djebel Onk

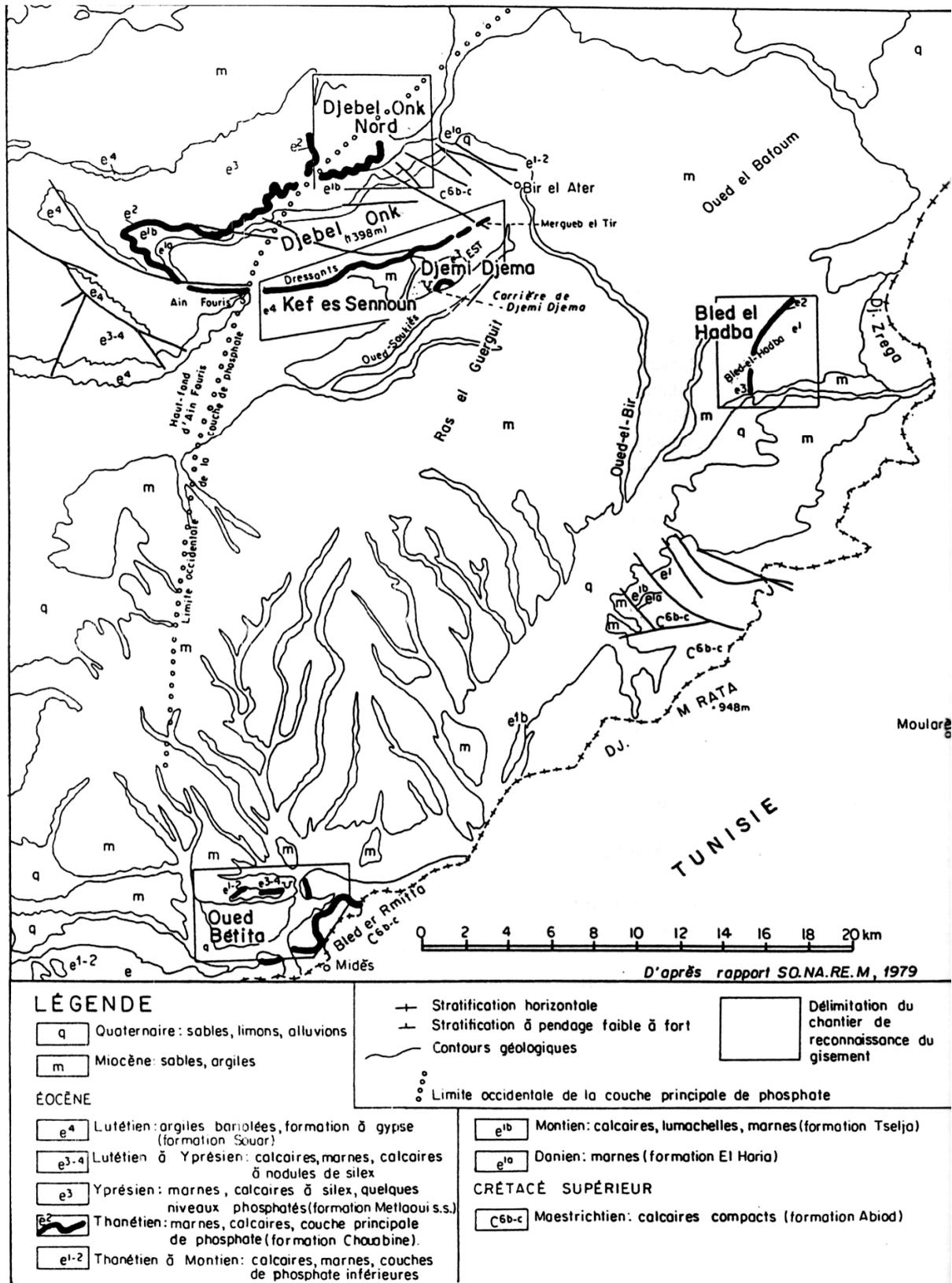


Figure III.2 Situation géologique des gisements de phosphate de la région du Djebel-Onk

III.2.2.4. Aperçu hydrogéologique

A. Climatologie

D'après l'analyse hydrogéologique de la région de Djebel-Onk et en particulier la zone d'activité Kef -Essenoun réalisée par la DED.

L'observation des données hydrométriques, sur une période de 22 ans (1986-2008). Nous indiquons que la région de Kef -Essenoun est Caractérisée par un climat Subaride à aride avec un hiver froid et un été chaud et sec.

La période de sécheresse s'étale sur toute l'année.

B. Température

Sur une moyenne de 5 années, les températures ont la même évolution, en hiver elles fluctuent autour de 7 °C. La température augmente progressivement à partir du mois de mai, jusqu'à atteindre des niveaux très hauts (45°C) en été, et diminue progressivement en automne.

C. Pluviométrie

La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 88 mm, L'évapotranspiration est de l'ordre de 87 mm ce qui représente 100 % des précipitations.

Les précipitations durant le mois d'été sont extrêmement rares. Les périodes sans pluies pendant plus d'un mois sont fréquentes. Les périodes pluvieuses varient entre 66 et 107 jours / an, Les orages sont importants et fréquents particulièrement durant le mois d'Août et de Septembre. La neige et le gel sont rares, mais la température descend souvent en dessous de 0°C en hiver.

D. Vents

Dans la région les vents dominants ne sont pas dirigés vers les habitations, ils soufflent du secteur 0 et 0.N-0, une dominante secondaire provient du S.S-E. La vitesse moyenne des vents est comprise entre 1 et 3m/s [33].

III.3. Géologie local de Djebel El Onk

III.3.1. Gisement de Kef Essnoun

●Situation géographique

Le gisement est situé 6km au Sud de la Ville de Bir El Ater, et a 2 km à l'Ouest du gisement de Djemi Djema.

Topographiquement, la zone du gisement, située au pied du Djebel Kef Essennoun, constitue un plateau descendant en pente douce vers le Sud-Ouest.

Les cotes topographiques varient de 720m au Sud –Ouest à 810m au Nord-Est (dressants Nord) [33].

III.3.2. Historique de recherche

Le gisement de Kef Essennoun a été reconnu en détail par l'EREM, au cours de l'année 1986, grâce à 32 sondages carottes réalisées a la maille 250X300 m.

En outre, l'E.R.E.M a réalisé dans la zone des dressants 22 tranchées.

Des données plus anciennes proviennent des recherches réalisées par G.Ranchin en 1963 (puits, descenderie Dubuc, tranchées dans les dressants), ainsi que 3 sondages et tranchées des dressants réalisés par la SONAREM (1977-1979) [32].

III.3.3. Géologie du gisement

III.3.3.1. Les teneurs et les réserves géologiques

Les moyennes des teneurs en P₂O₅ sont assez constantes sur toute l'étendue du gisement et oscillent entre 25.05 et 27.94 %. Les moyennes en MgO sont faibles et constantes pratiquement sur toute l'étendue du gisement, elles sont comprises entre 2 et 3% avec une moyenne générale 2.61%.

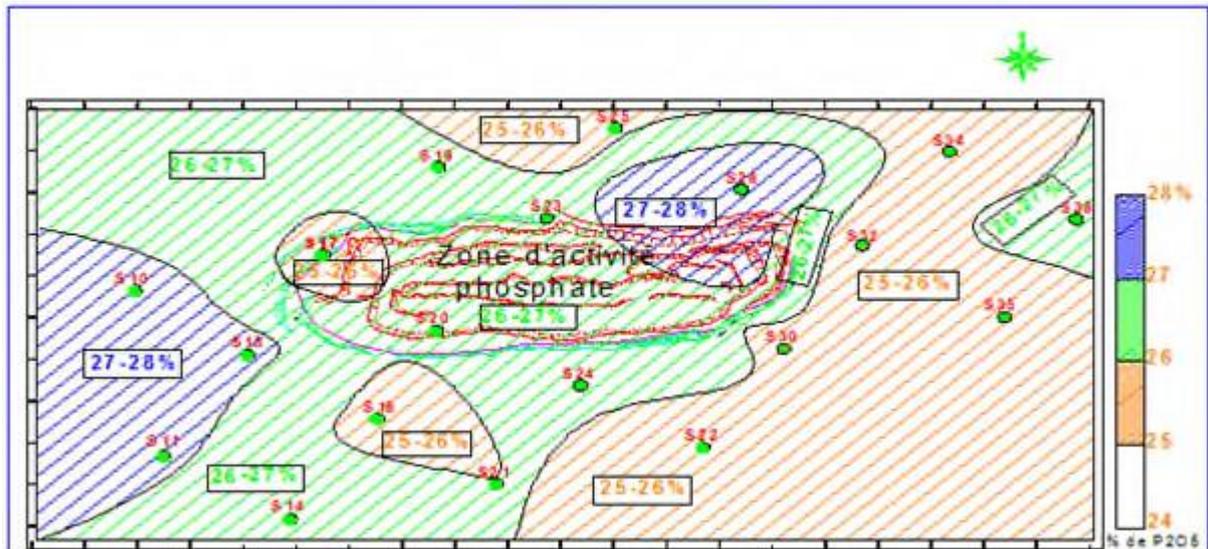


Figure III.3. La carte des iso teneurs en P₂O₅ et MgO en % du gisement de K.E.S.

Le gisement de Kef-Essenoun est subdivisé en trois blocs de calcul de réserves qui sont de l'ordre de 317 Millions de Tonnes dont :

- 168 M T réserves prouvées, de minerais situés sous des ratios linéaires de 1,32 à 4,5.
- 50 M T réserves probables, situés sous de ratios linéaires plus élevés de 4,3 à 6,5.
- 99 M T réserves possibles, situés sous de ratios linéaires supérieurs à 5.

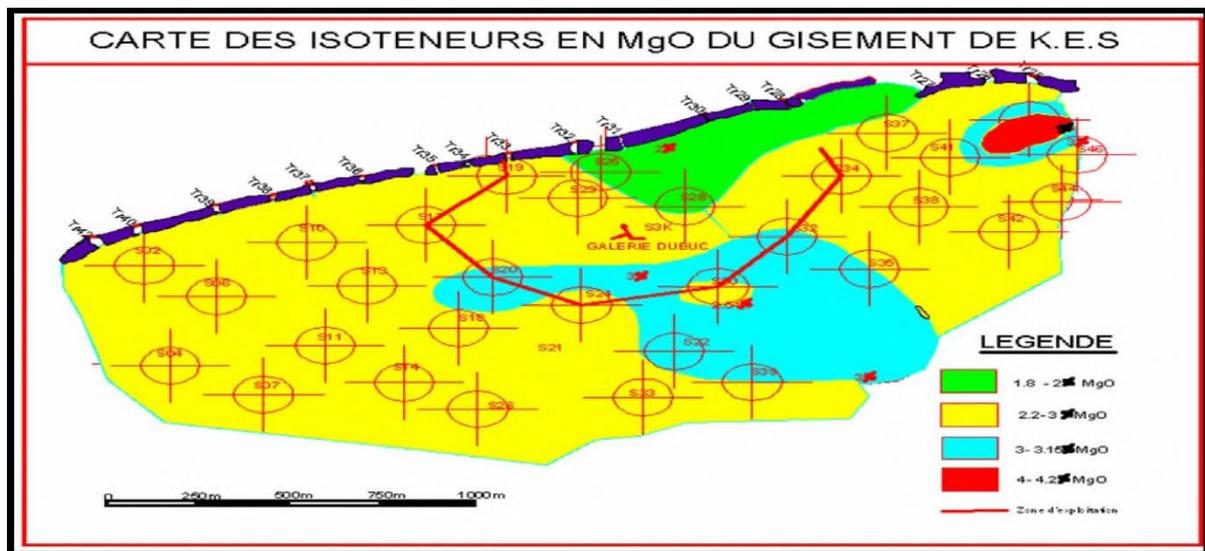


Figure III.4. Carte d'iso teneurs en MgO du gisement de Kef Essenoun

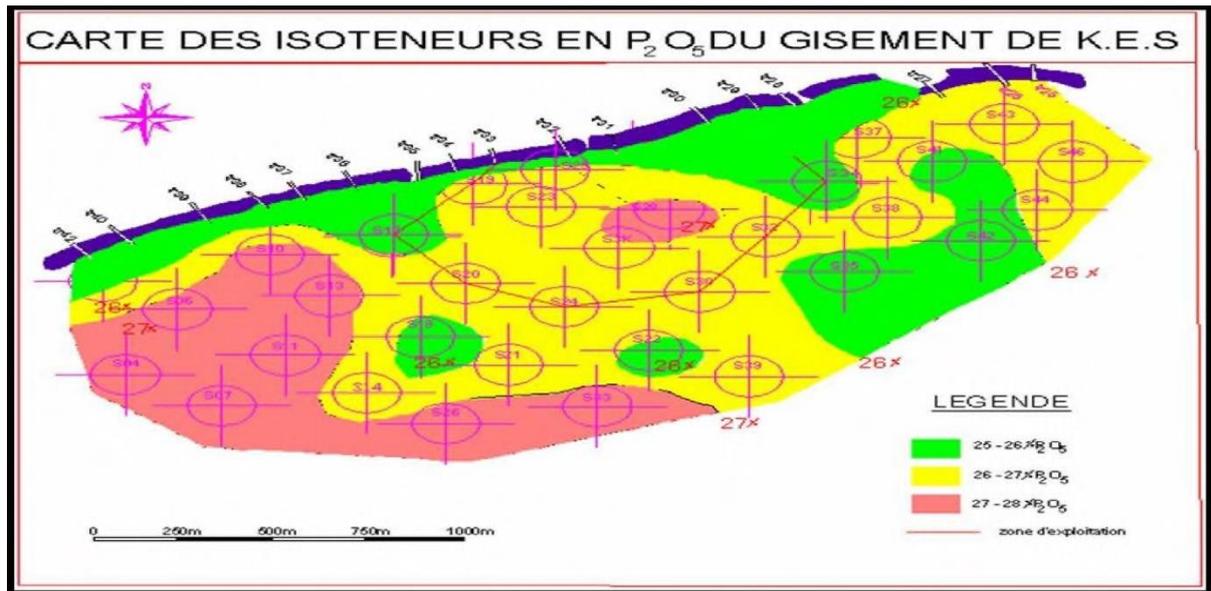


Figure III.5. Carte d'isoteneurs en P_2O_5 du gisement du Kef Essennoun.

III.3.3.2. Infrastructures et cadre économique de la région

Le gisement de djebel Onk se caractérise par l'absence des habitations, le point le plus proche c'est la ville de Bir-EL Ater à 6Km, on note seulement la présence de la route nationale N° 16 reliant Bir – El Ater et El Oued, et les poteaux électriques.

III.3.3.3. Composition minéralogique

A djebel-Onk et partout dans les autres gîtes; la couche minéralisée (phosphate) est de type sédimentaire stratiforme d'une grande étendue et d'une puissance évaluée à plus de 28 m.

Le minerai du gisement de Djebel Onk est constitué de phosphate à gangue carbonatée, il appartient au groupe fluor apatite carbonaté ci-joint ci-dessous la composition minéralogique de minerai gisement Kef-Essennoun [33].

III.4. Présentation de l'entreprise

III.4.1. Ferphos

L'entreprise nationale du fer et du phosphate) est l'une des plus importantes entreprises minières en Algérie. Dans ses activités d'exploitation des mines de phosphate, de fer et de pouzzolane, FERPHOS utilise les technologies et procédés les plus récents, recherche l'excellence, emploie les hommes qualifiés et motivés.

Chapitre III : généralités sur les gisements de djebel Onk

III.4.2. Somiphos

Société des Mines de phosphates Filiale de FERPHOS group. Créée en janvier 2005, suite à la réorganisation de FERPHOS spa, SOMIPHOS est une société par action à capital public, détenu à 100% par FERPHOS group, Elle a pour objet la recherche, l'exploitation, le traitement, l'enrichissement, la transformation le transport et la commercialisation des phosphates et produits connexes ou analogues.

III.4.2.1. Organisation de Somiphos

SOMIPHOS extrait le phosphate brut du sol grâce à des carrières à ciel ouvert dans le bassin phosphate de Djebel Onk.

Le minerai est par la suite criblé, lavé et séché. Le minerai traité. Est alors expédié aux installations portuaires d'Annaba, soit par voie ferrée où par transport routier .la totalité de la production est exportée, comme matière première, à destination de plusieurs pays à travers le monde.

Le complexe du Djebel Onk est la principale Stratégique Business Unité den FERPHOS pour la production de phosphate.

Composé de deux mines à ciel ouvert et d'une usine de traitement de phosphate, le complexe du Djebel Onk jouit, dans le cadre de l'organisation de FERPHOS, d'une autonomie de gestion administrative et financière lui permettant d'être à l'écoute et plus proches de leurs exigences.

Le complexe du Djebel Onk est en phase finale de certification aux normes de L'international Standardisation Organisation, ISO 9001 Version 2000 (Système de Management de Qualité) et SIO 14001 (Système de Management Environnemental).

III.5. Méthode d'exploitation

III.5.1. Introduction

La mine de Kef Essnoun est une mine à ciel ouvert, constituée de plusieurs gradins en forme d'une fosse. Le facteur de recouvrement est de un pour deux, c'est-à-dire que pour chaque gradin de minerai abattu, il faut abattre deux gradins de stériles. Pour cela, on trouve les gradins de stériles dans la périphérie et les gradins de minerais dans le centre de la fosse.

III.5.2.Généralité sur l'exploitation

La méthode d'exploitation consiste en la réalisation d'une succession des travaux miniers afin d'assurer la découverte et l'extraction en qualité et quantité planifiée dans les meilleurs conditions. la méthode d'exploitation du gisement de Kef-Essnoun est celle avec un seul bord exploitable, suivants des normes :

- ❖ La hauteur des gradins : 15 m ;
- ❖ La largeur de plateforme : 30 m ;
- ❖ Respecter la distance de la décharge...etc.

III.5.2.1.Exploitation du phosphate

L'extraction du phosphate est le premier maillon de la chaîne de production.

- ✚ 1^{ère} opération: Terrassement par bulldozer ;
- ✚ 2^{ème} opération: Foration avec des sondeuses ;
- ✚ 3^{ème} opération: usage de l'explosif.

A. Régime de travail

1. Stérile : 2×8 continue ;
2. Phosphate : 3×8 continue ;
3. Chargement et Transport pour le stérile: Nombre de poste / j = 02 continue ;
4. Chargement et Transport pour le phosphate: Nombre de poste / j = 03 continue ;
5. Foration : Nombre de poste / j = 02 continue.

III.5.2.2.Les paramètres de la méthode d'exploitation

A. Paramètres des chantiers : (Kef-Essnoun)

Hauteur du gradin :

- Pour le stérile : 15m ;
- Pour le phosphate : 15 m ;
- Pour le stérile : 85°.

Inclinaison des talus gradins :

- Pour le phosphate : 85°

Largeur de plateforme :

- Pour le stérile : >30 m ;
- Pour le minerai : > 30 m.

Angle de bord exploitable = 70° ÷ 75° .

Stabilité des bords des cotés ouest elle est bonne.

La largeur de la berne de sécurité = 20m.

B-Principaux processus

La fragmentation des roches se fait par les travaux de forage et de tir pour le stérile et le phosphate.

1. Foration

Les processus de foration font l'objet d'une étude comparatif pour deux types de sondeuse avec différents diamètres à savoir :

- $\emptyset = 165$ mm ;
- $\emptyset = 125$ mm

a- Les paramètres de foration utilisés (Kef Essnoun)

Nombre de poste :

- ❖ Pour le stérile : 02 ;
- ❖ Pour le phosphate : 03.

La durée de poste :

- ❖ pour le stérile : 08h ;
- ❖ Pour le phosphate : 08h.

Rendement théorique des sondeuses :

- pour le stérile : 45 m/h ;
- Pour le phosphate : 45 m/h.

Rendement pratique des sondeuses :

- Pour le stérile : 30 ÷ 50 m/h ;
- Pour le phosphate : 30 ÷ 50 m/h.

Nombres des sondeuses utilisées :

- Pour le stérile : 02 ;
- Pour le phosphate : 03.

2. Foration secondaire

- ❖ Pour la foration secondaire (banquette hors gabarit et pied) ;
- ❖ Foration des blocs hors gabarit.

3. Travaux de tir

Les explosifs utilisés à Djebel Onk sont :

Anfomile 25 Kg.

Marmanite Ø80; Ø65 ; Ø50.

Cordeau 12 g/t ; 20 g/t.

Mèche lente ; relais (détonateur à micro retard) ; détonateur.

Fils électrique.

Exploseur.

DEMR (détonateur électrique à micro retard).

DEI (détonateur électrique instantané).

Testeur.

4. Processus de chargement des roches

Le chargement de la masse rocheuse sera assuré par des pelles hydrauliques CATERPILARD ET LIHEBERR sur CHENILLE (à une capacité de godet de 6 m³) Le calcul de nombre des engins de chargement se basé sur les objectifs ciblés (Kef Essnoun).



Figure III.6.Opération de chargement (prise le 18/03/2020).

5. Processus Transport de la masse rocheuse

Le transport de la masse rocheuse sera assuré par des camions avec une capacité de la benne 50 T. Le calcul des engins de transport est basé sur des objectifs ciblés (Kef Essnoun).

III.6. Conclusion

Le gisement de Kef Essnoun est situé sur le flanc méridional de l'anticlinal de Djebel Onk. Il est caractérisé par un faciès phosphaté d'une épaisseur atteignant les 50m et un recouvrement de stérile constitué généralement par une série calcaro-dolomitique à silex de l'Yprésien et surmonté localement par les calcaires de Lutétien puis par les sables du Miocène et les alluvions du Quaternaire. Son épaisseur totale varie de 40 m à 198 m. De plus, la région est caractérisée par un réseau hydrographique généralement sec.

Le choix des paramètres d'exploitation de la mine de Kef Essnoun dépend généralement des caractéristiques des terrains et de la sécurité du travail. L'étude de ses caractéristiques concernant les conditions géologiques, hydrogéologiques et les paramètres d'exploitation ont permis d'obtenir une image aussi complète que possible sur les caractéristiques des massifs rocheux traversés afin d'évaluer leurs stabilité.

Chapitre IV

Classification géomécanique du massif rocheux

IV.1. Introduction

La classification des massifs rocheux a un intérêt fondamental lors de l'étude de faisabilité et de dimensionnement préliminaire d'un projet, surtout quand les informations mécaniques, hydrologiques et l'état de contraintes in-situ du massif rocheux ne sont pas disponibles.

Les systèmes de classification prennent en considération plusieurs facteurs affectant la stabilité des massifs rocheux. Ces facteurs sont reliés notamment à la résistance de la matrice rocheuse, la présence de l'eau et la description des discontinuités (nombre de familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage...).

La classification géomécanique 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. Dans ce travail, nous nous basons sur la méthode (Bieniawski [1973 RMR (Rock Mass Rating) et GSI (Géological Strenght Index) introduit par Hoek et al. [1995].

IV.2. Description du site d'étude

IV.2.1. Présentation de la carrière de Kef Essnoun

La carrière de Kef Essnoun se situe dans un site géologiquement diversifié dont la topographie connaît une certaine horizontalité. Le massif rocheux de Kef Essnoun est composé de différents faciès représentés par : Calcaire,..... dont il est caractérisé par une différente fracturation entre les formations géologiques du site.

IV.2.2. Type de discontinuités

Les principales discontinuités présentes dans les massifs rocheux de Kef Essnoun :

♦Joints de stratification



Figure.IV.1.joint de stratification (photo prise d'un gradin de Kef Es Sennoun).

◆ Les Diaclases



Figure.IV.2.Réseau de diaclases sur les dalles de calcaires Yprésien-Lutitien du gradin de Kef Es Sennoun.

IV.2.3.paramètres physico-mécanique des roches

Les paramètres utilisés ont été relevés à la base des données disponibles et communiquées par l'entreprise. (CERAD) Ils proviennent des essais antérieurs effectués au niveau d'un laboratoire suivant la norme de l'AFNOR Eurocode 07 (XP P 94-010).

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

Les propriétés physico-mécaniques du flanc Nord de Kef Essnoun sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.1. Les propriétés physico-mécaniques des différents faciès du flanc Nord de Kef Essnoun. (CERAD)

Propriétés	Unités de Mesure	Calcaire yprésien	Calcaire phosphaté	Phosphate	Marnes	Calcaire Danio-montien
La résistance à la compression uniaxiale de la roche intacte	MPa	75	32	23	7	38
Masse volumique insaturé (ρ_{unsat})	KN/m ³	27	26	21	23	27
Masse volumique saturé (ρ_{sat})	KN/m ³	27.46	26.5	24.81	24	27.46
Cohésion (C)	KN/m ²	5400	2300	2300	160	3600
Angle de frottement interne (φ)	°	37	37	37	16	37
Dilatance (Ψ)	°	7	7	7	0	7
Module de Young E	KN/m ²	27000	24000	24000	1000	27000
Coefficient de poisson (ν)	/	0,250	0,28	0,28	0,25	0,25

IV.2.4.La résistance à la compression uniaxiale (Rcs)

Le tableau suivant résume les valeurs de la résistance à la compression des différents faciès de Quartier de Kef Es Sennoun ;

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

Tableau. IV.2. les valeurs de la résistance à la compression des différentes lithologies.

Faciès	Résistance à la compression uniaxiale (MPa)
Calcaire Yprésien-Lutétien	57
Phospho- calcaire	32
Phosphate	23
Marne	7
Calcaire Dano-Montien	38

IV.3. Classification géomécanique du massif Nord –Ouest de Kef Essnoun

Il est important de connaître précisément le massif, afin d'établir son influence sur les résultats de l'étude de sa stabilité.

IV.3.1. Classification RQD

RQD des différents sondages :

Les valeurs du RQD pour les sondages N°6 et 10 et 19 ont été calculées par **CERAD**.

Kef Essnoun N°6 (pendage 90°) et profondeur 155.6 m.

Kef Essnoun N°10 (pendage 90°) et profondeur 134 m.

Kef Essnoun N°19 (pendage 90°) et profondeur 112 m.



Figure.IV.3.Carottes de sondage 6.

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

Tableau IV.3. Valeur du RQD pour les sondages N°6 et 10 et 19.

Sondage	Couches	RQD (%)	Qualité de la roche
N° 06	Calcaire Yprésien-Lutétien	75	Moyenne
	Calcaire phosphaté	60	Moyenne
	Phosphate	79	Bonne
	Marnes	50	Médiocre
	Calcaire Danien-Montien	81	Bonne
N° 10	Calcaire Yprésien-Lutétien	72	Moyenne
	Calcaire phosphaté	63	Moyenne
	Phosphate	76	Bonne
	Marnes	48	Médiocre
	Calcaire Danien-Montien	85	Bonne
N° 19	Calcaire Yprésien-Lutétien	70	Moyenne
	Calcaire phosphaté	61	Moyenne
	Phosphate	78	Bonne
	Marnes	45	Médiocre
	Calcaire Danien-Montien	83	Bonne

Tableau IV.4. RQD des différents faciès.

Faciès	RQD (%)	Qualité de la roche
Calcaire (Yprésien-Lutétien)	72	Moyenne
Calcaire phosphaté	61	Moyenne
Phosphate	78	Bonne
Marnes	48	Médiocre
Calcaire (Danien-Montien)	83	Bonne

IV.3.2. Représentation stéréographique

Tableau. IV.5. Orientation et pendage des discontinuités du massif rocheux de Diffèrent facies

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

Faciès de Calcaire Yprésien		Faciès de phosphate		Faciès de marne		Faciès de Calcaire Danien-Montien	
Pendage	Direction du pendage	pendage	Direction du pendage	pendage	Direction du pendage	pendage	Direction du pendage
70°	N295°	35°	N220°	45°	N20°	65°	N20°
70°	N300°	30°	N220°	55°	N25°	40°	N325°
70°	N305°	35°	N200°	40°	N350°	30°	N360°
60°	N300°	40°	N205°	35°	N20°	45°	N300°
70°	N305°	55°	N345°	70°	N335°	45°	N300°
65°	N120°	35°	N210°	60°	N20°	60°	N300°
60°	N305°	40°	N230°	55°	N30°	90°	N350°
75°	N300°	60°	N220°	45°	N20°	30°	N340°
70°	N290°	45°	N350°	40°	N355°	85°	N360°
70°	N290°	40°	N340°			65°	N315°
70°	N200°					90°	N360°
65°	N300°					35°	N300°
65°	N200°						

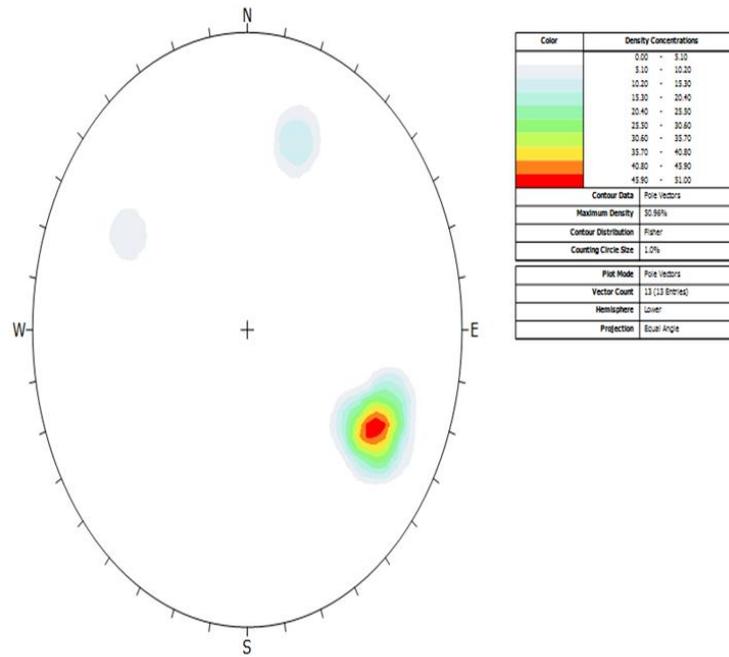


Figure IV.4. Projection stéréographique (Calcaire Yprésien)

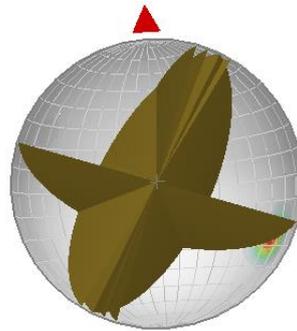


Figure IV.5. Projection stéréographique ° (Calcaire Yprésien)

La projection stéréographique montre l'existence de 3 familles de discontinuités.

- La première famille est orientée vers N 300 _ 25

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

- La deuxième famille et orienté ver N 110 _ 20
- La troisième famille et orienté ver N 200 _ 30

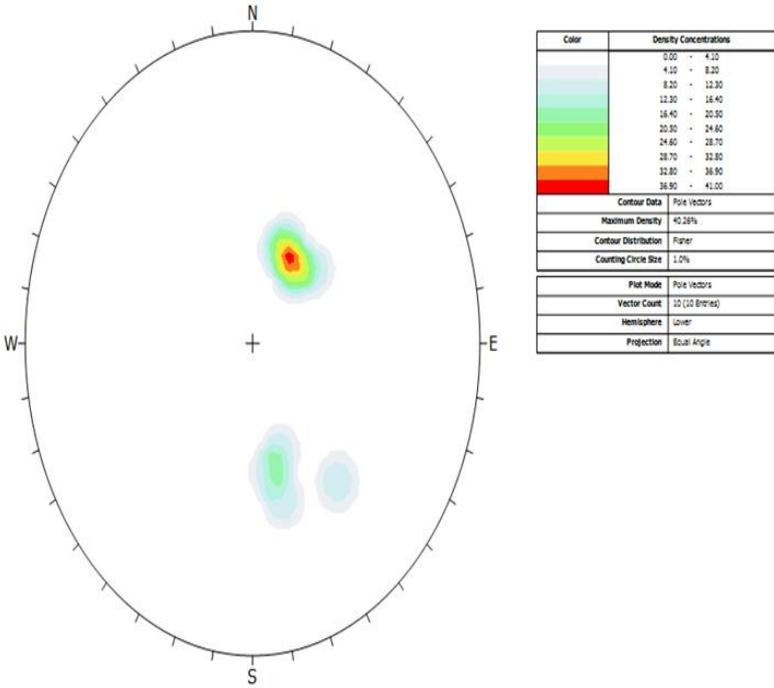


Figure. IV.6.Projection stéréographique (phosphate)

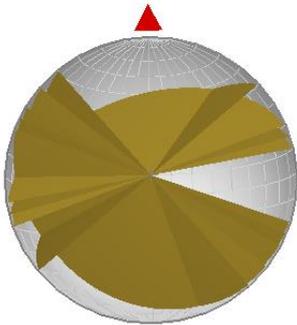


Figure. IV.7.Projection des stéréographique °(Phosphate)

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

La projection stéréographique montre l'existence de 3 familles de discontinuités.

- La première famille est orientée vers N 220 _ 20
- La deuxième famille est orientée vers N 340 _ 20
- La troisième famille est orientée vers N 320 _ 35

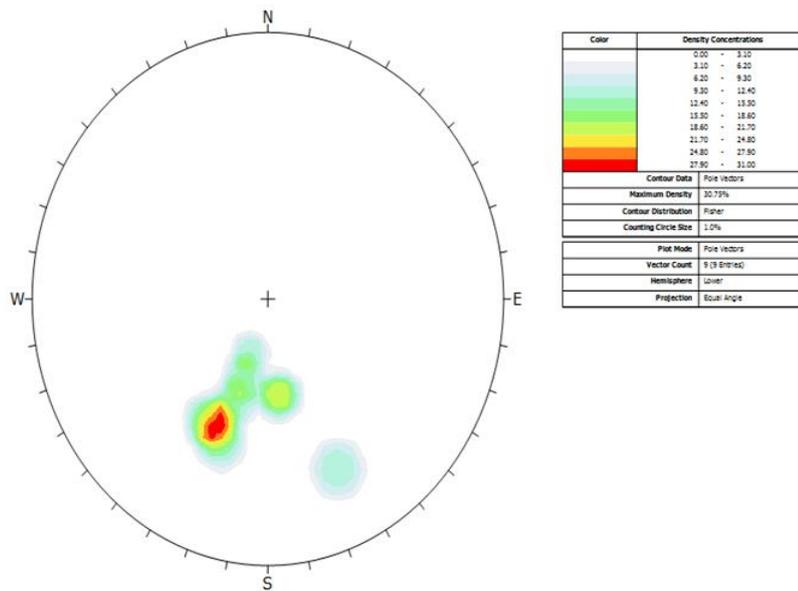


Figure. IV.8. Projection stéréographique (marne)

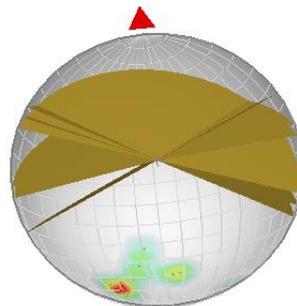


Figure. IV.9. Projection stéréographique^o (Marne)

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

La projection stéréographique montre l'existence de trois familles de discontinuités.

- La première famille est orientée vers N 250 _ 20
- La deuxième famille est orientée vers N 350 _ 15
- La troisième famille est orientée vers N 330 _ 30

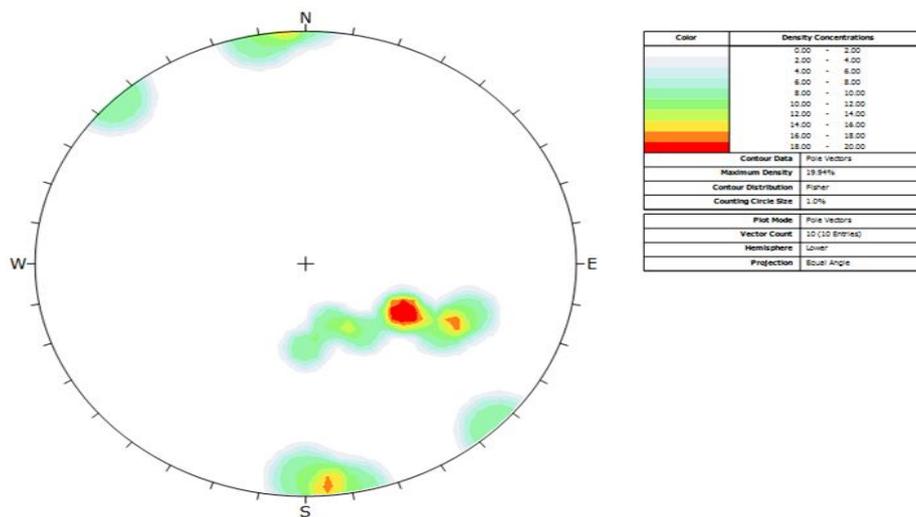


Figure IV.10. Projection stéréographique (calcaire danien-montien)

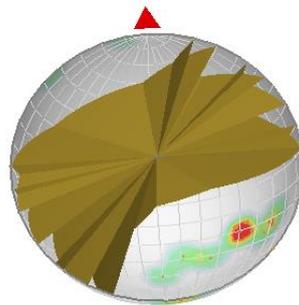


Figure IV.11. Projection de stéréographique° (calcaire danien-montien)

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

La projection stéréographique montre l'existence de 3 familles de discontinuités.

- La première famille et orienté ver N 300 _ 20
- La deuxième famille et orienté ver N 360 _ 50
- La deuxième famille et orienté ver N 320 _ 50

IV.3.3. Classification RMR

Se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants :

- ◆ A1 : Résistance en compression uniaxiale de la roche intacte.
- ◆ A2 : RQD (Rock Quality Index).
- ◆ A3 : Espacement moyen des discontinuités.
- ◆ A4 : Condition des discontinuités (ouverture, persistance, rugosité...).
- ◆ A5 : Les conditions hydrogéologiques du massif rocheux.
- ◆ A6 : Orientation des discontinuités par rapport aux directions représentatives du problème traité.

En utilisant les observations des différentes formations rocheuses rencontrées sur terrain et les résultats obtenus par les analyses de laboratoire, on a attribué une note à chacun des paramètres dont se base la classification du RMR.

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

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

Tableau. IV.6. Classification RMR du faciès calcaire Yprésien-Lutétien.

Faciès	Calcaire Yprésien-Lutétien					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD (%)	Espacement des joints (m)	Nature des joints	Hydrogéologie	RMR _{de} Base
Mesure	57	72	0,6-2 m	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte Non altérées	Complètement Sec	75
Valeurs extrêmes de la classification	50-100	50-75				
Note	7	13	15	25	15	

Tableau. IV.7. Classification RMR du calcaire phosphaté.

Faciès	Calcaire phosphaté					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD (%)	Espacement des joints (m)	Nature des joints	Hydrogéologie	RMR de base
Mesure	32	61	0,6-2 m	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte non altérées	Complètement Sec	72
Valeurs extrêmes de la classification	25-50	50-75				
Note	4	13	15	25	15	

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

Tableau. IV.8 .Classification RMR du phosphate.

Faciès	Phosphate					
Paramètre	Rc (MP)	RQD (%)	Espacement des joints (m)	Nature des joints	Hydrogéologie	RMR _{de} base
Mesure	23	78	0,6-2 m	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte non Altérées	Complètement Sec	74
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	75-90				
Note	2	17	15	25	15	

Tableau. IV.9. Classification RMR du marne.

Faciès	Marne					
Paramètre	Rc (MP)	RQD (%)	Espacement des joints (m)	Nature des joints	Hydrogéologie	RMR _{de} base
Mesure	7	48	<0.0.6	Surfaces lustrées ou remplissage <5 mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	Complètement Sec	40
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	25-50				
Note	2	8	5	10	15	

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

Tableau. IV.10. Classification RMR du faciès Danien-Montien.

Faciès	calcaire Danien-Montien					
Paramètre	Rc (MP)	RQD (%)	Espacement des joints (m)	Nature des joints	Hydrogéologie	RMR _{de} base
Mesure	38	83	0,6-2 mm	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Epente non altérées	Complètement Sec	76
Valeurs extrêmes de la classification	25 -50	75-90				
Note	4	17	15	25	15	

Tableau. IV .11. Classification RMR du massif rocheux de Kef Essnoun.

Faciès	RMR _{de} base	Classe du massif Rocheux	Description du Massif rocheux
calcaire Yprésien- Lutétien.	75	II	Bon rocher
calcaire phosphaté	72	II	Bon rocher
Phosphate	74	II	Bon rocher
Marne	40	III	Rocher moyen
calcaire Danien- Montien	76	II	Bon rocher

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

• **Tableau IV .12.** Orientation des joints et le talus.

	Calcaire Yprésien- Lutétien	Calcaire phosphaté	phosphate	marne	Calcaire Danien -Montien
Direction du pendage des joints (α_j)	N230°	N230°	N280°	N280°	N230°
Pendage du joints (β_j)	20°SW	20°SW	20°SE	30°SE	20°SW
Direction du - pendage du talus (α_s)	N210°	N210°	N260°	N260°	N210°
Pendage du talus (β_s)	75°	75°	80°	65°	80°

IV.3.4.Classification SMR

Tableau IV.13.SMR du faciès de calcaires Yprésien-Lutétien.

Faciès	Calcaire Yprésien-Lutétien					
Paramètre	RMR _{de base}	F1	F2	F3	F4	SMR
Note	75	0.7	0.4	-60	-8	50.2

Tableau. IV.14. Classification SMR du faciès calcaire phosphaté.

Faciès	calcaire phosphaté.					
Paramètre	RMR _{de base}	F1	F2	F3	F4	SMR
Note	72	0.7	0.4	-60	-8	47.2

Tableau. IV.15. Classification SMR du faciès de phosphate.

Faciès	phosphate.					
Paramètre	RMR _{de base}	F1	F2	F3	F4	SMR
Note	74	0.7	0.4	-60	-8	49.2

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

Tableau IV. 16. Classification SMR du faciès de marne.

Faciès	marne.					
Paramètre	RMR _{de base}	F1	F2	F3	F4	SMR
Paramètre	40	0.7	0.4	-60	-8	35.2

Tableau IV.17. Classification SMR du faciès de calcaire Danien-Montien.

Faciès	calcaire Danien-Montien.					
Paramètre	RMR _{de base}	F1	F2	F3	F4	SMR
Paramètre	76	0.7	0.4	-60	-8	51.2

Tableau IV.18. Classification SMR des différents faciès.

Faciès	Calcaire Yprésien-Lutétien	Calcaire Phosphaté	Phosphate	marne	Calcaire Danien-Montien
SMR	50.2	47.2	49.2	35.2	51.2
Classe	II	II	II	III	II
	Bien	Bien	Bien	Moyen	Bien
Description	Description : rupture possible ; Stabilité : instable ; Rupture : rupture possible au niveau de la couche des marnes ; Méthode de confortement : reprofilage.				

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux

IV.3.5. Classification GSI

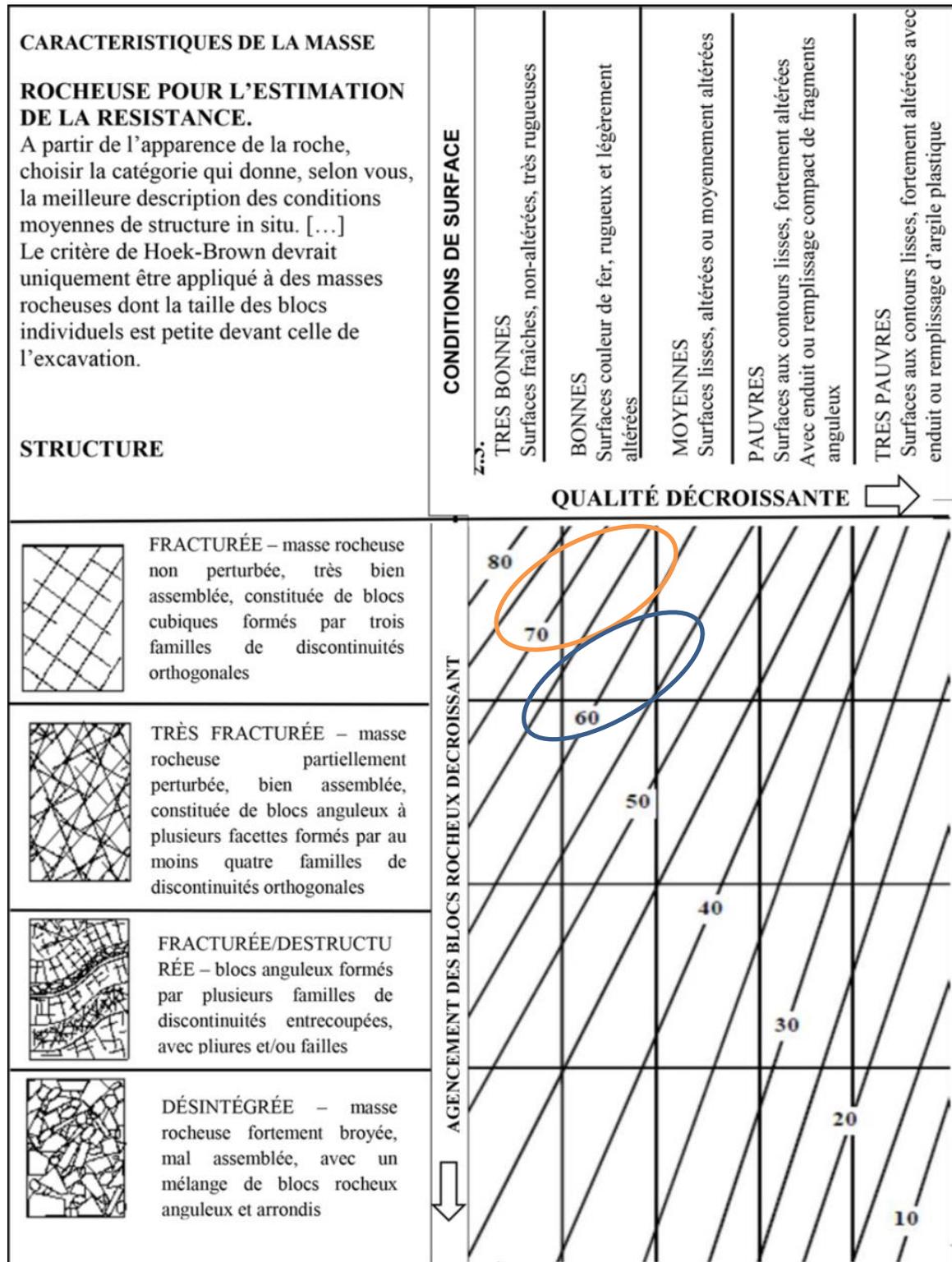
Des investigations menées sur le site ont permis d'estimer la valeur de GSI en se basant sur le critère de Hoek et Brown qui s'appuie sur une observation directe de la structure du massif rocheux.

D'après les résultats de la campagne d'observation menée dans le site d'étude (Annexes 1), le GSI est présenté, pour les différents faciès, dans les tableaux ci-dessous :

Tableau IV.19. Classification GSI du massif rocheux de Kef Essnoun

Faciès	GSI	Qualité du massif rocheux
calcaire Yprésien-Lutétien	70	Bonne
calcaire phosphaté	67	Bonne
Phosphate	69	Bonne
Marne	35	Mauvaise
calcaire Danién-Montien	71	Bonne

Chapitre IV: classification géomécanique du massif rocheux



Calcaire Yprésien-Lutétien  calcaire phosphaté 

Figure. IV.12. Valeur de GSI pour les defferent type de roche de kef Essnoun

IV.4. Conclusion

La classification géomécanique de Bieniawski se basant d'abord sur le premier indice RMR, (rock mass rating) qui permet d'évaluer la qualité intrinsèque du massif rocheux, le RMR fait intervenir : la résistance à la compression de la matrice rocheuse, l'espacement des discontinuités les conditions des discontinuités (rugosité, continuité, ouverture et remplissage).

Selon Bieniawski : le massif rocheux de kef-Essnoun est classé comme moyen rocher (calcaire, phosphate) à faible rocher les marnes ;

- ◆ Les valeurs du RQD (Rock Quality Designation), varient entre 48% et 83% en fonction des faciès constituant le massif, estimant que la qualité est médiocre pour les marnes Thanétien inférieur, moyenne pour les calcaires Yprésien Lutétien et les calcaires phosphatés et bonne pour les phosphates et les calcaires Danien-Montien.
- ◆ La méthode de classification RMR (Rock Mass Rating) classe le massif comme étant celui formé de roches de qualité moyenne pour les marnes du Thanétien inférieur à bonne pour les calcaires Yprésien-Lutétien, calcaires phosphatés, phosphates et calcaires Danien-Montien)
- ◆ L'étude stéréographique du massif rocheux de Kef Essnoun a montré que ce massif est formé par des réseaux de discontinuités avec présence de discontinuités diffuses.
- ◆ La méthode de SMR (Slope Mass Rating) a confirmé les constatations des autres classifications concernant la qualité du massif et l'existence d'une instabilité.
- ◆ La classification GSI a montré que la qualité du massif varie de mauvaise pour les marnes à bonne pour les autres faciès.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les systèmes de classification des massifs rocheux ont tout d'abord un rôle de synthétisation des données récoltées sur le terrain. En effet, il semble avantageux de disposer d'un outil permettant de regrouper de manière structurée toutes les informations fournies par les observations, les mesures et les comptes rendus des géologues.

Dans notre étude de classification géomécanique du massif de Kef Essnoun (partie N-O) on a adopté les systèmes de classification géomécanique de Bieniawski RMR, (Rock Mass Rating), GSI (Geological Strength Index) introduit par Hoek et al. [1995] et la méthode SMR (Slope Mass Rating).

Selon Bieniawski, le massif rocheux de Kef-Essnoun est classé comme moyen roché (calcaire, phosphate) et les marnes à faible roché.

- L'étude stéréographique du massif rocheux de Kef Essnoun a montré qu'il est formé par des réseaux de discontinuités avec présence de discontinuités diffus
- La méthode de SMR (Slope Mass Rating) a confirmé les constatations des autres classifications concernant la qualité du massif et l'existence d'une instabilité.
- La classification GSI (Geological Strength Index) pour les calcaires et le phosphates a montré que ces derniers sont classés dans la masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée en blocs cubiques de discontinuités orthogonales et de bonne qualité du massif.
- La classification GSI pour les marnes a fait ressortir que ces dernières sont considérées comme blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités et de mauvaise qualité.

Conclusion générale

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Antoine P., [1992], “Les problèmes posés par l'instabilité des versants de grandes ampleur - aspects géologiques -“, Bull Ass, Int. Géol, Ing, p.1.
- [2] : 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, p. 5.
- [3] : Schroeder Ch., [2010], “Etude de stabilité des parois rocheuses“, Revue de société Belge de géologie de l'ingénieur et de mécanique des roches (SBGIMR), p. 15-18, 21-29, 34.
- [4] : Duffaut P., [2003], “Manuel de mécanique des roches“, tome 2, Comité français de mécanique des roches, collection science de la terre et de l'environnement, p. 32-37.
- [5] : HOANG, Thi Thanh Nhan, [2010], «Etude du comportement d'un milieu rocheux fracturé », Thèse doctorat de l'école des ponts Paris Tech.
- [6] : POROKHOVOÏ, Evgueni, [1995], « Stabilité à long terme des talus de mines à ciel ouvert dans les massifs de roches basiques et ultrabasiques », Thèse doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [7] : Françoise Homand et Pierre Duffaut, [2000],« Manuel de mécanique des roches», Les presses de l'école des Mines Paris.
- [8] : DELAGE, P; CUI, Y.J ; « Comportement mécaniques des sols non saturés » C302; Technique de l'ingénieur, traité construction ; 19 pages ; 1999.
- [9] : DEGOUTTE, G ; ROYET, P ; « Aide-mémoire de mécanique des sols » ; Réédition ; 99 pages ; 2005.
- [10] : SAROUT, J ; « Propriétés physiques et anisotropie des roches argileuses : Modélisation Micromécanique et Expériences Triaxiales ». Thèse de doctorat de l'université Paris XI ORSAY ; 241 pages ; 2006.
- [11] : DJEBROU, B; « traitement du sol par colonne ballastes dans la région de Blida», mémoire de fin d'étude de l'Université SAAD DEHLAB BLIDA ; 102 pages ; 2007.

[12] : LAVASSEUR, M ; « Contribution des systèmes d'information géographique à l'analyse quantitative de l'aléa 'glissement de terrain' Exemple d'application au secteur de Ville de La Baie, Québec », Mémoire de maîtrise de l'université du Québec INRS.E.T ; 213 pages ; 2003.

[13]: Blanchier A .thiard B et Wber P, Theorie du Travail une explosif l'. (Théorie de dynamitage). Mines & Carrières. Octobre 1991.

[14] : GUITTARD, J. 2005.et VIRELY, D. Rapport synthèse sur le site du tunnel de St Béat

[15] : Zhao J., [2008], « Propriétés des discontinuités », part 3, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.

[16] : AZEALDEEN SALIH HASSAN AL-JAWADI «EVALUATION OF THE ROCK MASS AT THE BEKHME DAM SITE NORTH EAST IRAQ». Thèse de doctorat de Mosul University College of Science.

[17] : SOUKATCHOFF, V.M ; « Cours de géotechnique » de l'école nationale supérieure des mines de Nancy ; 100pages ; 2007.

[18] : PHILIPPONAT, G ; « Fondations et ouvrages en terre » ; Edit ioEyrolles, Paris ; 402 pages ; 1979.

[19]: J.-A. FLEURISSON Centre de Géologie de l'Ingénieur École des mines de Paris
École nationale des ponts et chaussées Université de Marne-la Vallée, Bâtiment IFI 5, bd
Descartes Champs-sur-Marne 77454 Marne-la-Vallée Cedex 2
fleurisson@cgi.ensmp.fr''Structures géologiques et stabilité des pentes dans les massifs rocheux : description, analyse et modélisation''.

[20] : Hudson J. A., [1993], "Comprehensive rock engineering - principales, practice and Project -", Rock Testing and Site Characterization, oxford – Pergamon Press -, Vol 3, p. 553-555.

[21] : MACIEJA., [Avril 2012], "Modification des classifications mécaniques pour les massifs rocheux schisteux", Thèse de maîtrise des sciences appliquées de l'université de

MONTRÉAL, spécialité de génie minéral, p. 7-15.

[22] : 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.

[23] : Palmstrom A., [1995], “A rock mass characterisation system for rock engineering purposes“, Thèse de post de doctorat de l'université Oslo Norvège, p.15.

[24] : Deere, D. U., [1988], “The Rock Quality Designation (RQD) index in practice“, In Rock classification systems for engineering purposes, edition Kirkaldie L., Philadelphia p 91-101.

[25] :Palmstrom A et al., [2001], “The reliability of rock mass classification used in underground excavation and support design“, Geo-Eng, University of Melbourne, p. 35.

[26] : Bieniawski Z.T., [1989], “Engineering rock mass classifications a complete manual for Engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering“, New-York, Wiley-Interscience, p. 52-56, 58, 59, 73-81.

[27]: Gadri L., [2012], « Etude de la déformation et de la rupture des massifs fissurés par la méthode des éléments finis », Thèse présenté en vue de l'obtention du diplôme de doctorat, université Badji Mokhetar, Annaba;

[28] : Romana M., [1985], “A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating“ in Comprehensive Rock Engineering, edition Oxford, Pergamon Press, p. 575-580.

[29] : Barton N et al., [1974], “Engineering classification of Rock Masses for the Design“, support. Rock Mechanics, Vol 6, p.189-206.

[30] : Hoek E. et Brown E.T., [1995], “Practical estimates of rock mass strength”. Int Rock Mech Min Sci, volume 34, p. 1165–1170.

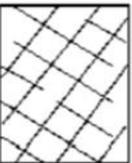
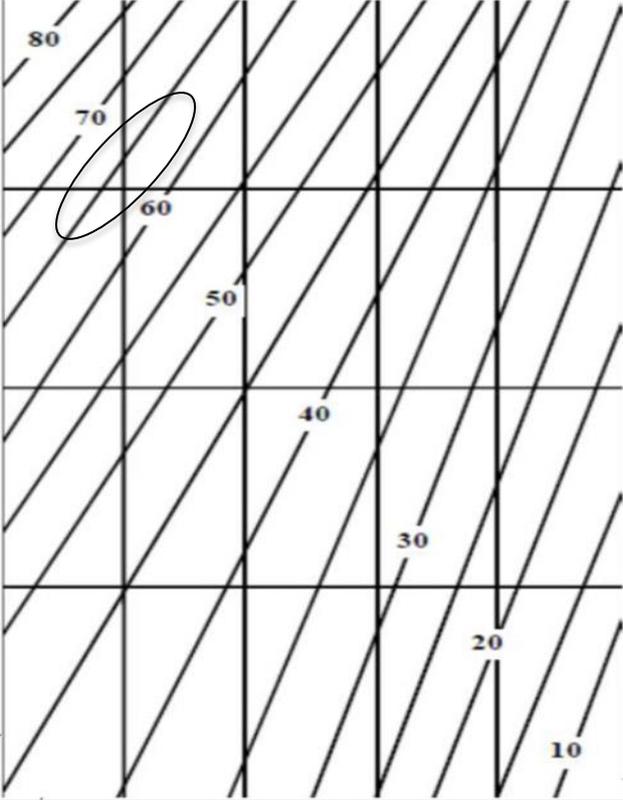
[31] : Sonmez H. et Ulusay R., [1999], “Modifications to the GeologicalStrength Index (GSI) and their applicability to stability of slopes“, Int. Rock Mech. Min. Sci, volume 36, 757-760.

[32] : Prian, G. P. et Cortiel Ph., [1993] - Etude de développement du gisement de phosphate de Djebel Onk (Algérie). Rapport d'expertise géologique, B.R.G.M. France, p. 11-29, 133-149, 169-173, inédit.

[33] : Ranchin G., [1963], "Etude géologique et minière du gisement de Djebel el Onk". Rapport S.E.R.M.I., Paris.

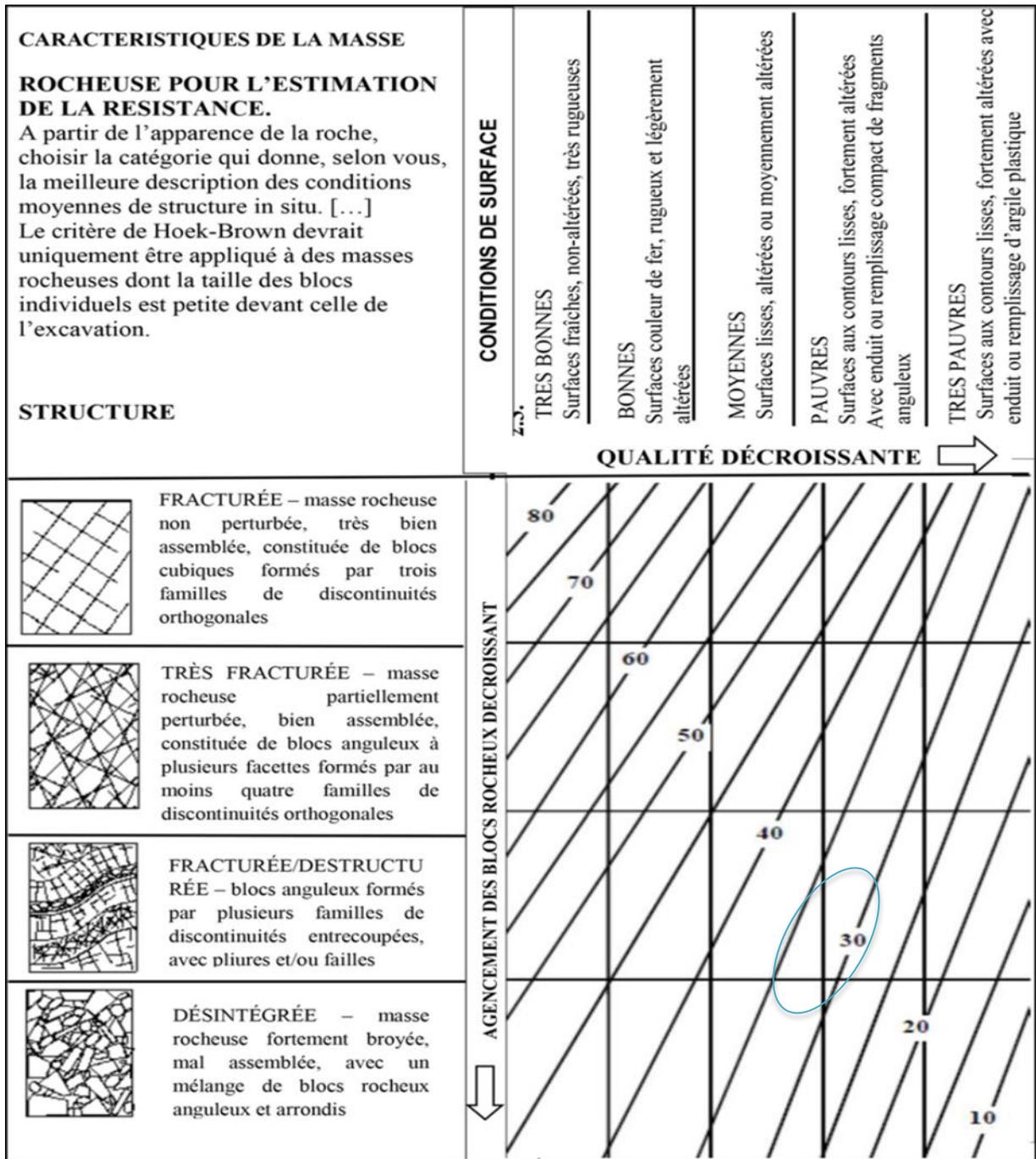
Annexes

Annexe 01 : Valeur de GSI pour les defferent type de roche de kef Essnoun

<p>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE</p> <p>ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE. 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. [...] 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: right;">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> 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>	<p>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DÉCROISSANT ↓</p> 

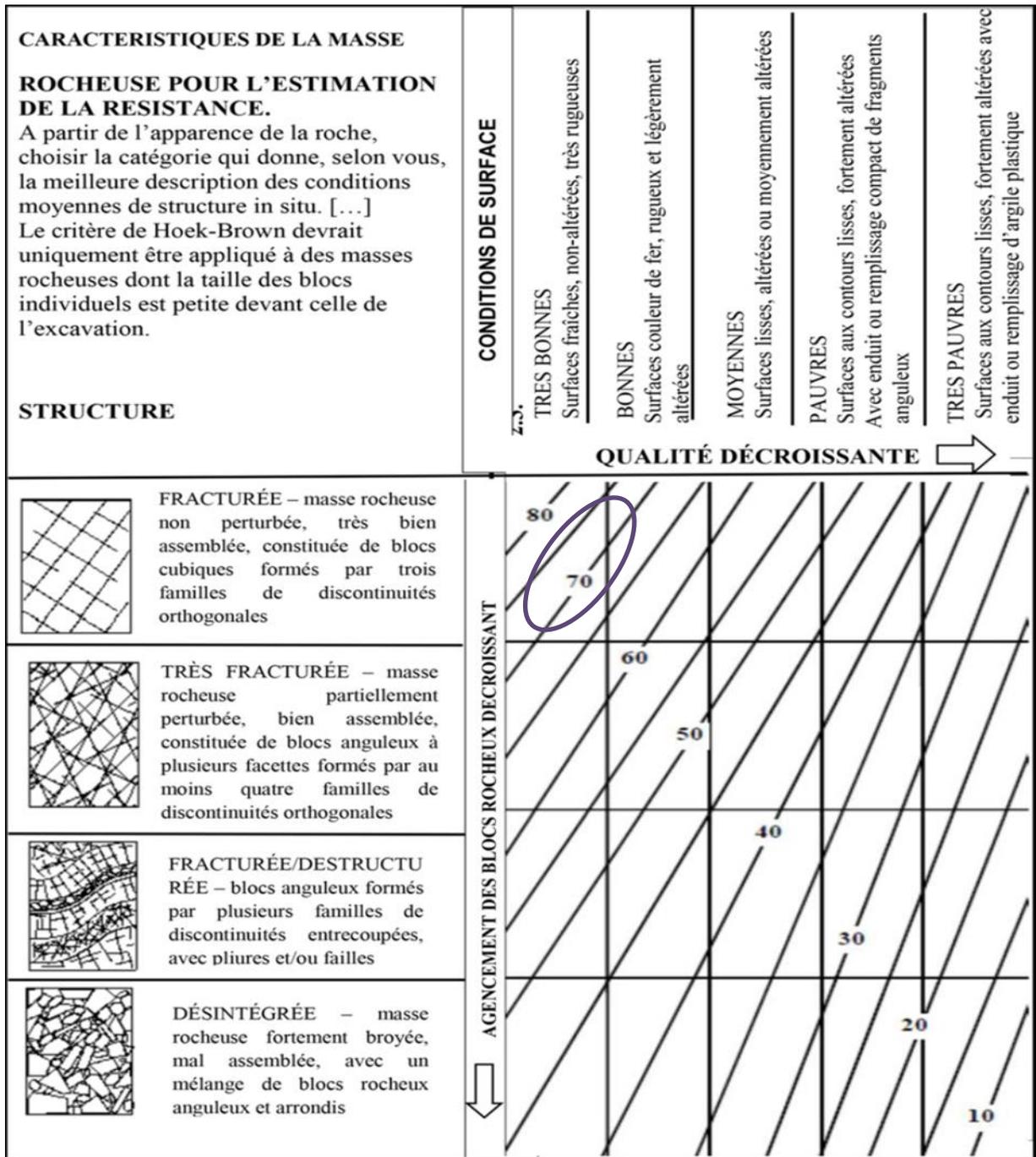
Phosphate





Marne





Calcaire Danien-Montien



Annexe 02 : Situation géographique

