



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département des mines et de la géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master académique

Filière : Génie minier

Option : Exploitation des mines

Caractérisation et classification géomécanique du massif rocheux cas de Kef-Essnoun Djbel el Onk

Présenté et soutenu par

Bader-Eddine BOUDIAR

Devant le jury:

	Grade	Etablissement
Président : Chafia MERAH	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa
Encadrant : Salah SAADAOU	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa
Examineurs : Mokhtar DEBOUZ	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa

Promotion 2022-2023



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة الشهيد الشيخ التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة العربي التبسي - تبسة



مقرر رقم: مؤرخ في: 2023/05/30

يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،
- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في: 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،
- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادة 7 منه،
- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة.
- وبموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل للملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص استغلال المناجم
- وبموجب المقرر رقم المؤرخ في 2023/05/29 والمتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر،
- وبعد الاطلاع على مقرر تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرخ في
يقرّر ما يأتي:
المادة الأولى: يُرخصُ للطالب (ة) بوديار بدر الدين، المولود (ة) بتاريخ 1992/05/31 ب تبسة، بمناقشة مذكرة الماستر والموسومة بـ

Classification géomécanique du massif rocheux de Kef Essnoun - Bir El Ater

المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب المعني بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمان نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.
المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملف البيداغوجي للطالب المعني وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي.

حُرر ب تبسة، في: 2023/05/30

عن المدير، وبتفويض منه

مدير معهد المناجم

عولمي لويبر
مدير معهد المناجم





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة



مقرر رقم : مؤرخ في : 2023/05/29

يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،

-و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل ويتم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،

-و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

-وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و 11 منه،

-وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة.

-وبموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل لمحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص استغلال المناجم

-وبعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم المؤرخ في:.....،

يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى: تُعيّن بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضّرة من طرف الطّالِب (ة):

بوديار بدر الدين، المولود (ة) بتاريخ 1992/05/31 ب تبسة ،

والموسومة ب

Classification géomécanique du massif rocheux de Kef Essnoun - Bir El Ater

والمسجّل (ة) بمعهد المناجم

المادة 2: تتشكّل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصّفة
1	مراح شافية	أستاذة محاضرة - ب	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسة
2	سعداوي صالح	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفا
3	دبوز مختار	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	ممتحنا

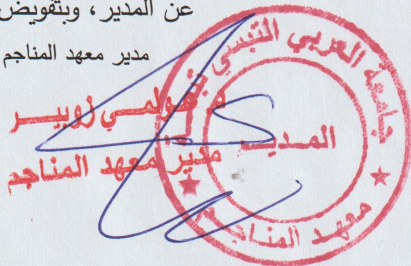
المادة 3: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يُسلّم نسخة عنه إلى كلّ من الطّالِب المعني والمشرف على المذكرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعهم.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرر في الملفّ البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النّشرة الرّسمية لجامعة العربي التبسي.

حُزّر ب تبسة، في: 2023/05/29

عن المدير، وبتفويض منه

مدير معهد المناجم





Année universitaire : 2022-2023

Tébessa le : 08.06.2023

Lettre de soutenabilité

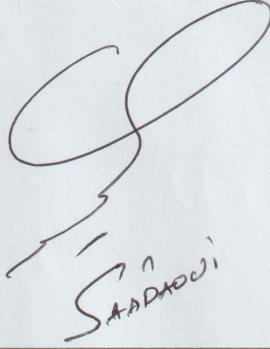
Noms et prénoms de l'étudiant :

Bader -EddineBOUDIAR

Niveau : 2^{ème} année Master Option : Exploitation des mines

Thème :Caractérisation et classification géomécanique de massif rocheux de Kef-Essnoun

Nom et prénom de l'encadreur :Salah SAADAOU

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre 1 :Contexte géologique de la mine de Djebel Onk	 SAADAOU
Chapitre 2 :Description des massifs rocheux structure et comportement mécanique	
Chapitre 3 :Les systèmes des classifications géomécaniques	
Chapitre 4 :Caractérisation et classification géomécanique de massif rocheux de Kef-Essnoun	

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،

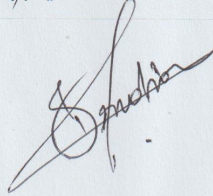
السيد (ة) يوزيار الدين الصفة: طالب، أستاذ باحث، باحث دائم: طالبي

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية/ رخصة السياقة رقم: 18066245 والصادرة بتاريخ 2010/07/01
المسجل بمعهد قسم
والمكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها:
Caractérisation et classification du massif rocheux cas de
Kef-Essnam Djebel El Ouk

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

التاريخ: 2018/06/08

إمضاء المعني (ة)



Remerciement

J'adresse mes vifs remerciements et mon profonde reconnaissance à tous les enseignants et les enseignantes qui m'ont aidé durant mes études universitaires et qui ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.

Je remercie vivement Monsieur Salah SAADAOU à l'institut des mines et lui témoigne ma franche reconnaissance, ma grande gratitude et mon respect pour son encadrement de ce mémoire, et de me guider par ses conseils constructifs, son encouragement, sa confiance, ses orientations et pour son aide précieuse.

Mes sincères remerciements s'adressent à l'égard de :

Tous ceux qui ont coopérés de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Merci infiniment

Dédicace

Il en est des dédicaces admiratives. Une fois obtenu que l'on espérait, Elles nous sortent de la tête...

À mes chères parents qui m'ont beaucoup aidé pour accomplir mon travail, et qui m'ont veillé pour que je mène à bien mes études.

J'espère avoir réalisé une partie de leurs rêves...

À mes frères

À mes sœurs

À mes très chers amis

À tous mes collègues de promotion Master 2 exploitation minière

À tous ceux qui m'ont apporté d'aide de près ou de loin...

Badi

RÉSUMÉ

La région de Djebel el 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. Cette région constitue la limite géographique naturelle entre les hauts plateaux constantinois et le domaine saharien. Le massif de Djebel el Onk forme un ensemble de calcaire de 20 km de longueur qui culmine à 1100 m d'altitude.

Ce travail est un diagnostic géomécanique des talus du massif rocheux de la carrière "Kef Essnoun" (la mine à ciel ouvert de Djebel Onk Bir El Ater, Wilaya de Tébessa). Vu l'importance de ce gisement pour l'économie régionale et nationale.

Dans le but de déterminer le comportement géomécanique et la qualité du massif dans la zone d'étude, des essais en laboratoire ont été faits pour obtenir ses propriétés physico-mécaniques. Une modélisation numérique a été réalisée ensuite pour évaluer la stabilité du massif.

Les résultats montrent que la qualité des formations rocheuses du massif est moyenne, et que les talus de la zone d'étude sont stable.

Mots clés : Caractérisation géomécanique, classification géomécanique, mine à ciel ouvert, kef -Essnoun, exploitation minier.

الملخص

تقع منطقة جبل العنق في الجنوب الشرقي للجزائر على بعد 100 كم من ولاية تبسة 20 كم من الحدود الجزائرية التونسية. هاته المنطقة تشكل الحدود الجغرافية الطبيعية بين مرتفعات قسنطينة والصحراء الكبرى. تشكل سلسلة جبال جبل العنق تجمعا من الحجر الجيري بطول 20 كم يصل الى مستوى ارتفاع 1100 م.

هذا العمل هو تشخيص جيوميكانيكي لمنحدرات الكتل الصخرية لكاف السنون (المنجم السطحي جبل العنق بئر العاتر -تبسة). نظرا لأهمية هذا المخزون المعدني للاقتصاد المحلي والوطني.

من أجل تحديد السلوك الجيوميكانيكي ونوعية الكتل الصخرية في منطقة الدراسة تم اجراء عدد من التجارب المخبرية للحصول على خصائصها الفيزيائية والميكانيكية. ثم تم اجراء نمذجة رقمية لتقييم مدى استقرار الكتل الصخرية.

أظهرت النتائج ان التكوينات الصخرية في المنطقة ذات نوعية جيدة وان المنحدرات الصخرية مستقرة في ذات المنطقة المدروسة.

الكلمات المفتاحية : تشخيص جيوميكانيكي, تصنيف جيوميكانيكي, منجم سطحي, استغلال منجمي, كاف السنون.

ABSTRACT

Djebel el Onk region is located in the south-east of Algeria, 100 km from the region of Tebessa and 20 km from the Algerian - Tunisian borders. Natural geographical area between Constantine highlands and the Saharan area. Djebel el Onk is massif that forms a 20 km long limestone complex which rises to an altitude of 1100 m.

This work is a geomechanical diagnosis of the slopes of rock mass "Kef Essnoun" (the open-cast mine of Djebel el Onk Bir el Ater , region of Tébessa). Given the importance of this deposit for the regional and national economy.

To determine the geomechanical behavior and the quality of the rock mass in the study area, laboratory tests were performed to obtain its physicommechanical properties. Numerical modeling was then carried out to assess the stability of the massif.

The results show that the rock formations in the massif is good quality and that the slopes of the study area are stable.

Keywords : Geomechanical characterization, geomechanical classification, open pit mine, mining exploitation, kef-Essnoun.

Table des matières

Dédicace

Remerciement

Résumé

الملخص

Abstract

Table de matières

Liste de tableaux

Liste de figures

Introduction générale

Chapitre I : Contexte géologique de la mine de Djebel Onk

Introduction.....	1
1.1 Géologie Régionale.....	2
1.1.1 Situation géographique des gisements de Djebel-Onk.....	2
1.1.2 Historique et méthodologie des recherches géologique au Djebel.....	4
1.1.3 Stratigraphie.....	4
1.1.4 Climatologie.....	8
1.1.5 Température.....	8
1.1.6 Pluviométrie.....	8
1.1.7 Les vents.....	8
1.1.8 Tectonique.....	11
1.1.9 Paléogéographie.....	14
1.2 Géologie locale.....	16
1.2.1 Situation géographique de Kef- Essnoun.....	16
1.2.2 Historique de la mine de phosphate de Kef-Essenoun Djebel El Onk.....	17
1.2.3 Structure Géologique.....	17
1.2.4 Stratigraphie.....	18
1.2.5 Tectonique.....	19
1.3. Conclusion.....	20

Chapitre II : Description des massifs rocheux structure et comportement mécanique

Introduction.....	21
2.1. Description des massifs rocheux.....	21
2.1.1. Structure des massifs rocheux.....	21
2.1.1.1. Principaux types de structures de massifs rocheux.....	22
2.1.2. Modélisation des massifs rocheux.....	24
2.1.3. Reconnaissance et auscultation des massifs rocheux.....	25
2.1.3.1. Objectifs et définitions.....	25
2.1.3.2. Phasage des reconnaissances.....	26
2.1.3.3. Etablissement d'un modèle géologique.....	27
2.2. Classification géologique des roches.....	28
2.3. Description des discontinuités.....	28
2.3.1. Différent types de discontinuités.....	28
2.3.2. Caractéristique géométriques des discontinuités.....	31
2.3.3. Familles et réseaux de discontinuités.....	35
2.3.3.1. Caractérisation des familles.....	35
2.3.4. Représentations graphiques.....	36
2.4. Comportement mécanique des roches.....	38
2.4.1. Elasticité des roches.....	38
2.4.2. Résistance des roches.....	39
2.5. Conclusion.....	41

Chapitre III : Les systèmes classifications géomécaniques

Introduction.....	42
3.1. Types et buts des systèmes de classification.....	42
3.2. Le système du classification RQD (Rock Quality Designation).....	45

3.2.1. Limitation du système RQD.....	47
3.3. Système RMR (Rock Mass Rating).....	48
3.3.1. Limitations du système RMR.....	52
3.4. Système Q.....	52
4.4.1. Limitations du système Q.....	60
3.5. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating).....	60
3.6. Commentaires sur les systèmes de classification.....	62
3.7. Conclusion.....	63
 Chapitre IV : Caractérisation et classification géomécanique de massif rocheux de Kef-Essnoun	
Introduction.....	63
4.1. Prélèvements et mesures in-situ.....	63
4.1.1. Essais au laboratoire.....	63
4.1.1.1. Essais de compression uniaxiale.....	63
4.1.1.2. La masse volumique.....	66
4.1.2. Prise géométriques des discontinuités.....	66
4.1.2.1. Projection stéréographique.....	68
4.2. Caractérisations et Classification géomécanique de massif de Kef Essnoun.....	74
4.2.1. Caractérisation et Classification RQD (Rock Quality Designation).....	74
4.2.2. Classification RMR du massif rocheux Kef-Essnoun.....	76
4.2.3. Classification SMR du massif rocheux Kef-Essnoun.....	78
4.3. Conclusion.....	80
Conclusion générale.....	81
Bibliographie.....	82
Annexe.....	86

Liste des tableaux

Tableaux1.1 : réserves géologiques en phosphates des gisements de Djebel Onk.....	20
Tableau 2.1 : Modèle géologique : Définition des matériaux et structures.....	27
Tableau 2.2. Classification des ouvertures des discontinuités [25].....	34
Tableau 2.3 : Module d'Young et coefficient de Poisson (cité par Mestat [1993]).....	39
Tableau 2.4: Valeurs représentatives de la cohésion et de l'angle de frottement interne des roches intactes (d'après Kulhawy [1975], cité par Goodman [1989]).....	41
Tableau 3.1 : Principaux systèmes de classifications/caractérisation des massifs rocheux Palmström [1995].....	44
Tableau 3.2 : Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux [37].....	46
Tableau 3.3 : Classification RMR (Bieniawski).....	50
Tableau 3.4 : Classe de rocher suivant la classification de Z. BIENIAWSKI.....	51
Tableau 3.5 : Paramètre de J_n (nombre de famille de discontinuités.....	53
Tableau 3.6 : Paramètre J_r (paramètre de rugosité des joints).....	54
Tableau 3.7 : Paramètre J_a (paramètre d'altération des joints).....	54
Tableau 3.8 : Paramètre J_w (paramètre hydraulique).....	56
Tableau 3.9 : Paramètre de SRF (paramètre de réduction relatif aux contraintes), (Barton et al, 1974).....	57
Tableau 3.10 :Plages de variation des paramètres pris en compte pour le calcul de f indice[38].....	58
Tableau 3.11 : Classification de massif en fonction de la valeur Q [37].....	59
Tableau 3.12 : Notes des paramètres du SMR (Romana, 1985).....	61
Tableau 3.13 : Description des classes SMR(Romana, 1985).....	62

Tableaux 4.1 : les propriétés mécanique des différentes roches.....	66
Tableaux 4.2 : les propriétés physiques des différentes roches.....	66
Tableaux 4.3 : les paramètres géométriques (pendage, sens de pendage) des joints.....	69
Tableaux 4.4 Valeur RQD des différents faciès (d'après SOMIFOS).....	75
Tableaux 4.5 : Valeur du RMR de faciès du Calcaire yprésien.....	76
Tableaux 4.6 : Valeur du RMR de faciès du phosphate.....	77
Tableaux 4.7 : Valeur du RMR de faciès de marne.....	77
Tableaux 4.8 : Valeur du RMR de faciès de la Calcaire Danien.....	78
Tableaux 4.9 : Description de la qualité su massif de Kef-Essnoun.....	78
Tableaux 4.10 :Orientation des joints et le talus.....	79
Tableaux 4.11 : Valeur du SMR des différentes formations géologiques	79

Liste des figures

Figure 1.1 : Carte de situation géographique de Djebel-Onk [03].....	3
Figure 1.2 : Carte géologique de la zone d'étude [12].....	5
Figure 1.3 : Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk –Algérie orientale [01].....	9
Figure 1.4 : Plan topographique de la mine de kef- Essenoun2023.....	10
Figure 1.5 : Coupe côte Nord-ouest du kef-Essenoun[13].....	10
Figure 1.6 : Coupe côte Nord-ouest du kef-Essenoun[13].....	11
Figure 1.7 : Coupe côte Nord-ouest du kef-Essenoun[13].....	11
Figure 1.8 : Coupe côte Nord-ouest du kef-Essenoun[13].....	11
Figure 1.9 : Carte structurale de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa– Mévlaoui[14].....	12
Figure 1.10 : Coupes stratigraphiques et structurales des flancs Nord et Sud du DjebelOnk [11].....	14
Figure 1.11 : Situation paléogéographique des gisements de phosphate de la région deDjebel Onk à l'intérieur du bassin phosphaté Gafsa – Mévlaoui – Onk [16, 17, 18, 19].....	16
Figure 1.12 : Carte de localisation de la zone d'étude.....	17
Figure 1.13 : Série d'anticlinaux de Kef Essnoun	18
Figure 2.1 : Les différentes échelles de modélisation et de représentation du massif rocheux [22].....	22
Figure 2.2 : Types de structures des massifs rocheux avec les représentations statistiques correspondantes [36].....	23
Figure 2.3 : Etapes successives de représentation des familles de fractures [36].....	25
Figure 2.4 : Plan de stratification.....	29
Figure 2.5 : Schéma de diaclases.....	30
Figure 2.6 : Exemple d'une faille.....	30
Figure 2.7 : Exemple d'un pli.....	31
Figure 2.8 : Orientation d'un plan de discontinuité [28].....	32
Figure 2.9 : Orientation des discontinuités [29].....	32
Figure 2.10 : Espacement des joints [25].....	33
Figure 2.11 : Caractéristiques géométriques des discontinuités dans un massif rocheux	34

Figure 2.12 : Joint Roughness Coefficient.....	35
Figure 2.13 : Caractéristiques des discontinuités dans un massif rocheux [32].....	36
Figure 2.14 : Représentation plane de surface de discontinuité.....	36
Figure 2.15 : Principales phases du comportement d'une roche au cours d'un essai de compression simple.....	38
Figure 2.16 : Critère de résistance de Mohr-Coulomb représenté dans le plan (τ, σ)	40
Figure 3.2 : Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR.....	49
Figure 4.1 : Echantillons représentatifs.....	64
Figure4.2 : Scie à table.....	64
Figure4.3 : Echantillons préparé.....	65
Figure4.4 : Écrasement des échantillons au laboratoire par presse hydraulique.....	65
Figure4.5 : Mesures d'espacement entre discontinuités in-situ.....	67
Figure4.6 : Mesures d'orientation et de pendage des discontinuités in-situ.....	68
Figure 4.7 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 01 calcaire-yprésien.....	70
Figure 4.8 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 02 phosphate.....	71
Figure 4.9 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 03 marne.....	72
Figure 4.10 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 04 calcaire danien-montien.....	73
Figure 4.11 : Diagramme des familles majeures de la discontinuité dans le massif de Kef-Essnoun.....	74
Figure 4.12 : Sondages carottés	75

Introduction générale

Introduction générale

Les classifications géomécaniques sont des outils essentiels dans les domaines miniers à ciel ouvert. Elles permettent de caractériser la stabilité d'un massif, d'anticiper les risques de chutes de blocs et de déterminer les mesures préventives nécessaires pour assurer la sécurité des travailleurs. Les classifications géomécaniques se basent sur une analyse approfondie des propriétés mécaniques du massif rocheux ainsi que sur l'évaluation qualitative et quantitative des facteurs qui influencent sa stabilité.

La stabilité du massif est un élément crucial lorsqu'il s'agit d'exploiter une mine à ciel ouvert. En effet, toute instabilité peut causer non seulement un danger pour la vie humaine mais aussi entraîner une interruption temporaire voire permanente du processus d'extraction minière avec toutes ses conséquences économique négatives. C'est pourquoi il est important pour tout exploitant minier à ciel ouvert de disposer d'une classification fiable qui lui permettra :

- D'identifier rapidement les zones potentiellement dangereuses.
- De quantifier le niveau réelle (ou potentielle) de dangerosité.
- De mettre en place efficacement des mesures correctives adaptées

Dans ce travail nous allons passer en revue quelques-unes des principales classifications géomécaniques utilisées aujourd'hui pour caractériser les massifs rocheux pour faire un diagnostic géomécanique des massif rocheux Kef – Essnoun Djbel El Onk Bir-El Ater. Vu l'importance de ce gisement pour l'économie régionale et nationale.

Dans le but de déterminer le comportement géomécanique et la qualité du massif dans la zone d'étude. A ces fins, cette monographie est basée sur des essais en laboratoire pour obtenir les propriétés physico-mécaniques et l'analyse in situ des paramètres géomécanique.

Les différentes parties de ce mémoire sont organisés dans quatre chapitres comme suit :

- Le premier chapitre, nous avons d'écrit contexte géologique de la mine de Djebel Onk.
- Dans le deuxième chapitre, nous a description des massifs rocheux structure et comportement mécanique
- Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les systèmes classifications géomécaniques.
- Dans le quatrième chapitre, nous avons traité les propriétés physico-mécaniques de massifs rocheux de Kef Essnoun et la classification du massif rocheux de cette région.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale qui souligne l'apport incontestable de notre travail.

Chapitre I : Contexte géologique de la mine de Djebel Onk

Introduction

La Société des mines de phosphate SOMIPHOS spa (SOMIPHOS), une société basée en Algérie, spécialisée dans la prospection et l'exploitation minières et d'évaluer les ressources minérales des gisements de phosphate.

Les phosphates de la région de Djebel El Onk, au Sud-Est de l'algérien, font partie d'un vaste ensemble de gisements phosphatés formés à la période Fini Crétacé–Eocène sur les rives Sud et Sud- Est méditerranéennes.

1.1 Géologie Régionale

1.1.1 Situation géographique des gisements de Djebel-Onk

Le gisement de Kef-Essnoun, objet de notre étude, fait partie du bassin phosphaté de Djebel El Onk. Ce dernier est situé 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. Il constitue la limite géographique naturelle entre les hauts plateaux, Constantinois et le domaine Saharien. Les terrains sont semi-désertiques à faible population [01, 02].

Ces coordonnées LAMBERT sont :

X= 981,500 ----- 984,500

Y= 165,000 ----- 170,000

La région de Djebel Onk est subdivisée en 5 secteurs miniers :

- Gisement de Djemi Djema, (Sud du massif du Djebel Onk) ;
- Gisement de Kef Essnoun, (Sud du massif du Djebel Onk) ;
- Gisement de Djebel Onk Nord, (nord du centre minier de Djemi Djema) ;
- Gisement d'Oued Betita, (Sud-est du centre minier du Djemi Djema) ;
- Gisement de Bled El Hadba, (Sud-est de Djebel Onk).

1.1.2 Historique et méthodologie des recherches géologique au Djebel

Les phosphates Algériens ont été découverts à Boghari par Ph. Thomas (1873), un peu avant les phosphates de Gafsa (1855). Dans la période 1906 / 1907, Joleau a découvert le gisement de Djebel El Onk avec la mise en évidence de deux couches phosphatées dans un ravin de l'Oued de Djemi – Djema au Sud de Djebel El Onk.[04]

En 1912, Dessert a présenté les premières informations sur les gisements phosphatés Algériens avec des coupes lithologiques détaillées des gisements de la zone de Djebel El Onk. La prospection systématique a été débutée par « la compagnie des Phosphates de Constantine »[05], en 1930 et avait confirmé l'existence des réserves considérables, ce qui amené à la création de la société de Djebel El Onk (S.D.O), en 1936 ; mais l'éloignement de la mer, la désertification de la région, le manque de l'eau et de l'énergie et les méthodes de l'exploitation reflètent une exploitation irrationnelle. La connaissance sur la géologie régionale et des gisements progresse avec les études de R. Laffitte (1939), L. Cayeux (1939 – 41 – 50)[06, 07]. En 1951, L. Visse a étudié le gisement de phosphate du Djebel Djemi Djema dont il reprend avec beaucoup de détails la stratigraphie et évalue les réserves (110 Mt de minerai à 24.80 – 25.20 % P₂O₅, soit 54 – 55 % BPL, pour un total de 600 Mt dans toute la zone de Djebel El Onk. A partir de 1960, dans le cadre de l'industrialisation de l'Algérie (plan de Constantine)[28], le projet d'exploitation des phosphates devient prioritaire. De 1961 à 1963, des essais de prospection radiométrique aéroportée effectués au – dessus du gisement du Djebel El Onk pour tester la méthode utilisée avec succès par le BRGM dans l'Atlas Tellien le long des affleurements de l'Eocène (Vogt et Belhadj, 1963)[09]. Les études ont été reprises par Ranchin (1963) qui avait établi les cartes géologiques à l'échelle 1 / 5000. De 1971 à 1974[10], les travaux de recherches et de prospection sur les phosphates de l'Est Algérien ont été relancés par la SONAREM en s'appuyant sur un levé aéro – radiométrique (Rudowicz, 1975). De 1985 à 1987, L'E.N. 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 de Djebel El Onk, ces importants travaux, réalisés avec la coopération soviétique, ont vu en particulier la réalisation de 97 sondages carottés, totalisant 10732 m de série[11].

1.1.3 Stratigraphie

La stratigraphie de la région de Djebel El Onk a été établie par Visse (1952). La série sédimentaire affleurant est exprimée par une succession stratigraphique allant du Crétacé

Supérieur (Maestrichtien) à l'Eocène moyen (Lutétien), surmontée par une série sablo – argileuse continentale datée du Miocène et du Quaternaire [08].

• **Crétacé**

Ce sont les sédiments les plus anciens au cœur de l'anticlinal de Djebel El Onk tectoniquement très accidentés. Seuls les dépôts du Maestrichtien y affleurent. Les sédiments de cet âge, au cœur de Djebel El Onk, sont représentés par des calcaires à silex et des intercalations de marnes (de 5 à 10 m). Ils représentent à leur partie supérieure, une surface taraudée, rubéfiée, facilement repérable dans la topographie.

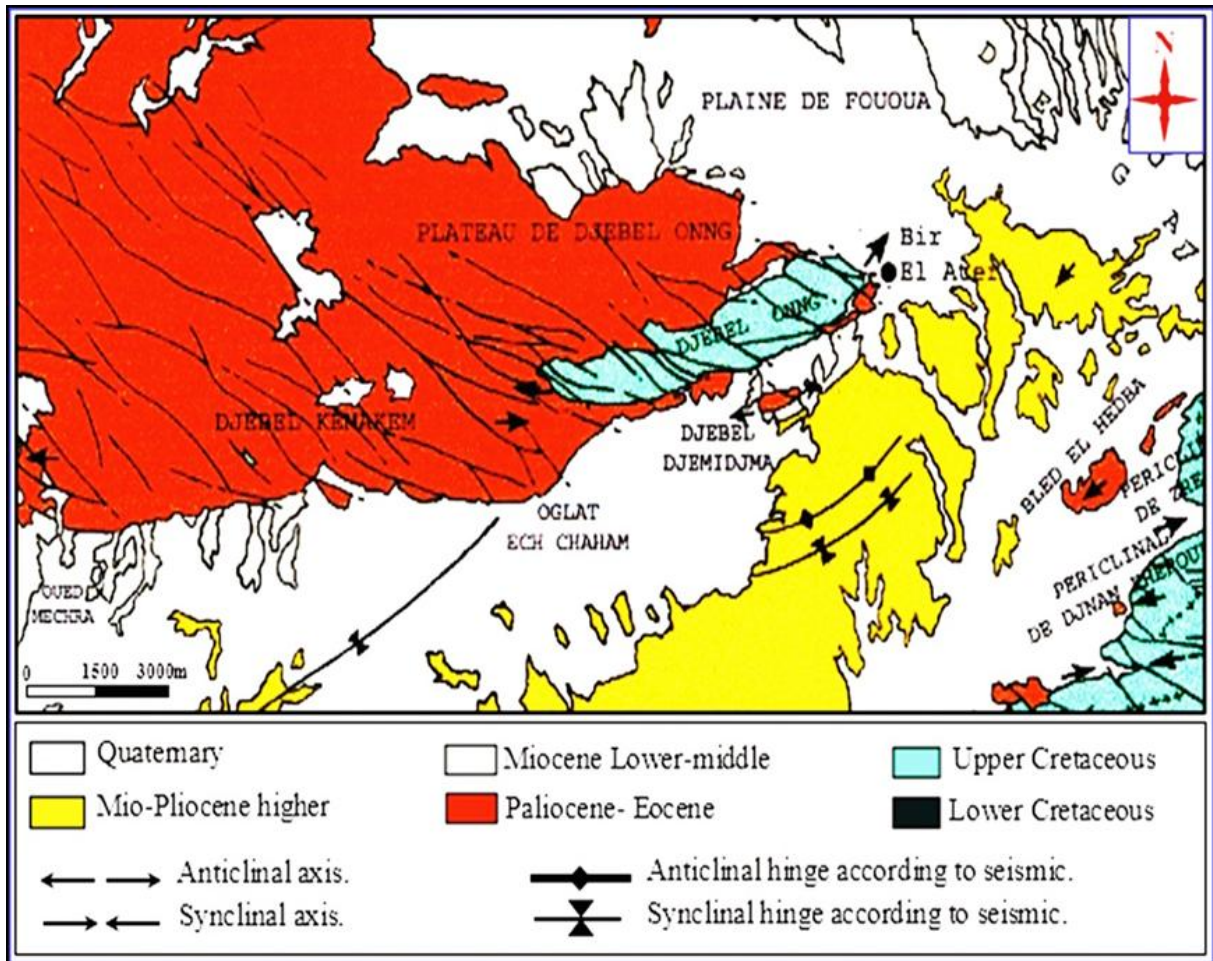


Figure 1.2 : Carte géologique de la zone d'étude [12].

• **Paléogène**

Ce sont des sédiments marins représentés par des calcaires, des phosphates et de gypse, dans la région, le Paléogène atteint d'assez grandes épaisseurs de 350 m, les variations lithologiques et les restes des organismes ont permis d'identifier les subdivisions stratigraphiques suivantes :

– **Danien**

Il est différent du Crétacé, il est conventionnellement adopté au contacte calcaire Maestrichtien série argilo – marneuse. Cette différence lithologique est présentée par une subdivision en deux séries distinctes, où on note la séparation entre le Danien supérieur et le Danien inférieur. L'épaisseur totale du Danien est d'environ 100 m.

* **Danien inférieur**

Il est représenté par des argiles marneuses schisteuses, de couleur grise foncée à brun vert, intercalé par des marnes dures et irrégulières. L'ensemble est traversé par des filons de gypses de différentes orientations.

* **Danien supérieur**

Il est formé par des calcaires durs blancs, très fins souvent à cassure conchoïdale, avec des intercalations de marnes tendres, argileuses et schisteuses. Dans la partie supérieure du Danien, on note la présence d'un banc caractéristique de 1 à 2 m d'épaisseur, formé de calcaire beige à lumachelles surmontés par des marnes en plaquettes blanches. C'est dans cet étage qu'apparaissent les premiers minces niveaux (10 à 30 cm) de marne phosphatée.

– **Montien**

Cet étage est marqué par la présence d'une série de calcaire, calcaires détritiques, calcaires à lumachelle avec des intercalations de marne et dolomie, ces sédiments se caractérisent par une absence ou une faible quantité de silex. Les huîtres sont abondantes, en bancs gris à noire. Les *Ostera*, *Ostera offdigitilina* du bois, *Pittor*, sont des espèces caractéristiques.

– **Thanétien**

C'est l'horizon porteur de la minéralisation. Il est visible sur le flanc de l'anticlinale de Djebel El Onk avec une épaisseur de 72 m. Il se subdivise en deux parties :

* **Thanétien inférieur**

Caractérisé par des schistes marneux irrégulièrement intercalés de calcaire. Ces schistes sont de couleur grise foncée à noir. Dans la partie supérieure du Thanétien inférieur apparaissent des intercalations phosphatées atteignant jusqu'à 2 m d'épaisseur, et très riche en matière organique surmontées par des calcaires et des marnes à gros gastéropodes. La puissance varie de 30 à 40 m.

* **Thanétien supérieur**

Il débute par un niveau dolomitique à gastéropodes, sous – jacent à une couche phosphatée de 30 m d'épaisseur en moyenne à Djebel El Onk et à Bled El Hadba, et qui diminue jusqu'à la disparition vers le Nord, l'Ouest et le sud de ce gisement se termine

généralement par un niveau lumachellique. La limite entre le Thanétien et l'Yprésien est obtenue seulement par le changement du faciès phosphaté à celui de calcaire marneux à une épaisseur de 0 à 50 m.

– Yprésien

Il repose directement sur les dépôts du Thanétien et affleure dans la carrière de Djemi – Djema et au Nord du Djebel El Onk, il a une épaisseur de 32 m, on note :

* Yprésien inférieur

Il est représenté à la base, par des conglomérats marquant la limite avec le Thanétien et sous – jacent une couche à alternance de calcaire, marne, dolomie et de la couche phosphatée. On note la présence de couches minces de silex dans les calcaires. L'épaisseur moyenne de l'Yprésien inférieur est de 30 m au maximum.

* Yprésien supérieur

Il est constitué par l'alternance de calcaires, calcaire dolomitique et marnes, sa puissance est de 2 à 3 m.

– Lutétien

Les formations de cet étage recouvrent en concordance les séries Yprésiennes ; elles sont répandues dans la région de Djebel El Onk, on distingue :

* Lutétien inférieur

Il est marqué par un changement de faciès où les marnes remplacent le calcaire, il est assez riche en matière organique.

* Lutétien supérieur

Il est représenté par une alternance de marnes blanches et d'argiles, il est caractérisé par la présence de gypse, son épaisseur peut atteindre 100 m, ce type de faciès termine le cycle de la sédimentation marine Tertiaire inférieur (Paléogène).

– Miocène

Il est représenté par un complexe de roches térrigénèses composées de conglomérats, d'argiles, de sables et de schistes. Le Miocène est subdivisé en trois unités de bas en haut.

* Miocène inférieur

Il est formé de conglomérats, de sable à gros grains et sables blancs à grains moyens avec de minces couches d'argiles silteuse. Sa puissance est de 200 m.

* Miocène moyen

Il est constitué d'argile marron, d'argile à structure schisteuse, brune, la puissance est d'environ 100 m.

* Miocène supérieur

Il est constitué de roches sablo argileuses, grès à bancs de graviers et contenant de gros blocs arrondis.

– Quaternaire

Les formations Quaternaires couvrent de vastes surfaces dans la région ; elles sont essentiellement représentées par des éboulis, de dépôts sableux éoliens, fluviaux et des dépôts alluviaux.

1.1.4 Climatologie

La zone d'étude de Djebel El Onk a un climat de transition entre celui de la région semi-aride de Tébessa et celui de la région sub-aride de Négrine.

1.1.5 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 haut (45°C) en été, et diminue progressivement en automne.

1.1.6 Pluviométrie

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, tandis que les précipitations sont de l'ordre de 200 à 400 mm/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.

1.1.7 Les 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.

Chapitre I Contexte géologique de la mine de Djebel Onk

QUATERNAIRE			Eboulis et formations alluvionnaires sableuses
MIOCENE	SUP (350m)		Sables, grès à grains grossiers
	MOY (250m)		Argiles, schistes argileux de couleur marron, bronze avec intercalation de sables blancs
	INF (100m)		Sables fins blancs avec des couches de grès et argiles
LUTETIEN	SUP (100m)		Gypses avec interlits de marnes (évaporites)
	INF (40m)		Calcaires et dolomies avec géodes de quartz
YPRESIEN (70m)	SUP		Calcaires et dolomies avec silex
	INF		Calcaires avec lentilles de silex et calcaire phosphaté
THANETIEN (80m)	SUP		Phosphates pseudoolithiques, coprolithiques, gris et noirs
	INF		Marnes sombres schistifiées
MONTIEN (100m)			Minéralisation en Baryto-Célécitine Calcaires avec bancs à Ostrea
DANIEN	SUP (80m)		Alternance de calcaires et de marnes claires
	INF (35m)		Argiles noires avec fibre de gypse
MAESTRICHTIEN SUPERIEUR (200 m)			Calcaires, calcaires noduleux de couleur blanche

Figure 1.3: Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk –Algérie orientale [01]

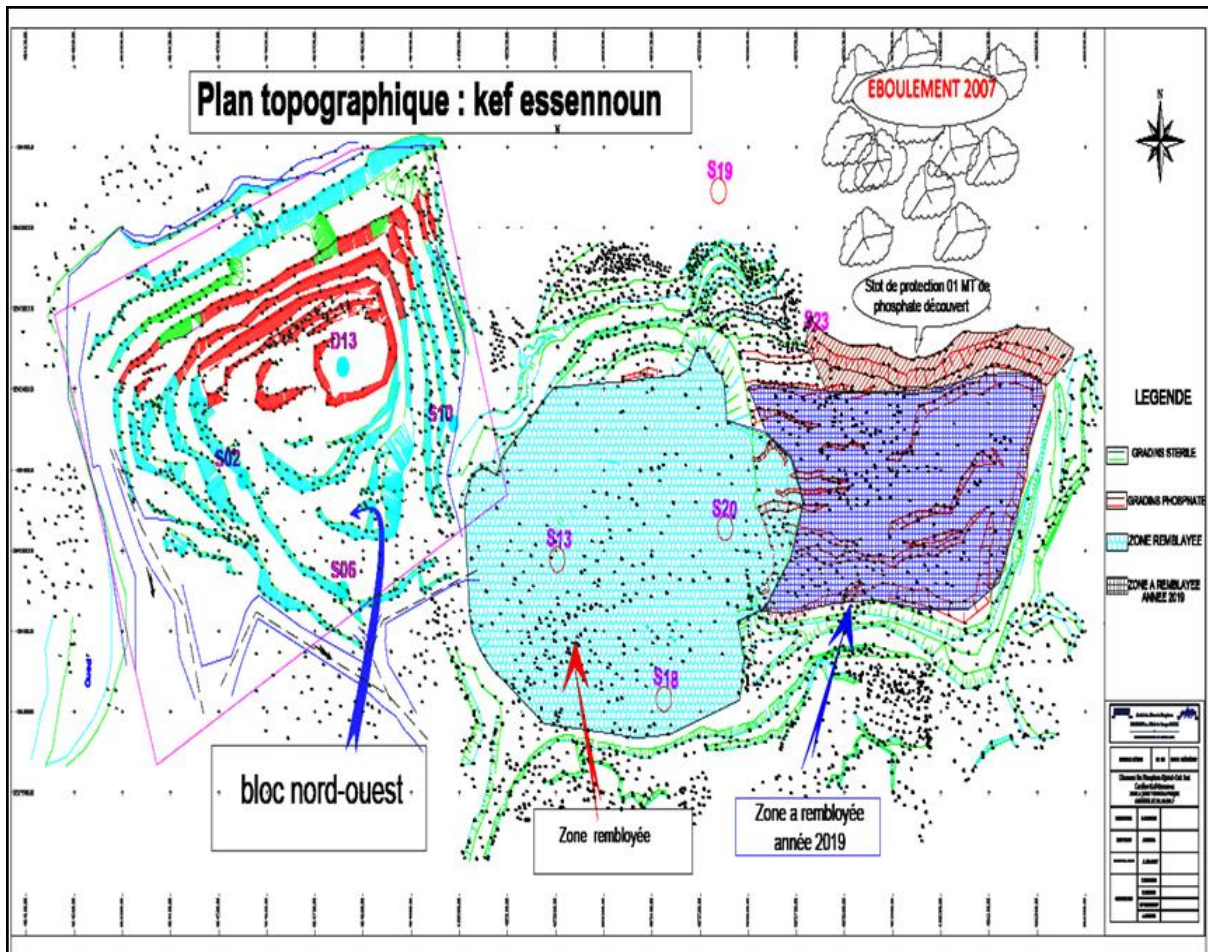


Figure 1.4 : Plan topographique de la mine de kef- Essenoun 2023 [13].

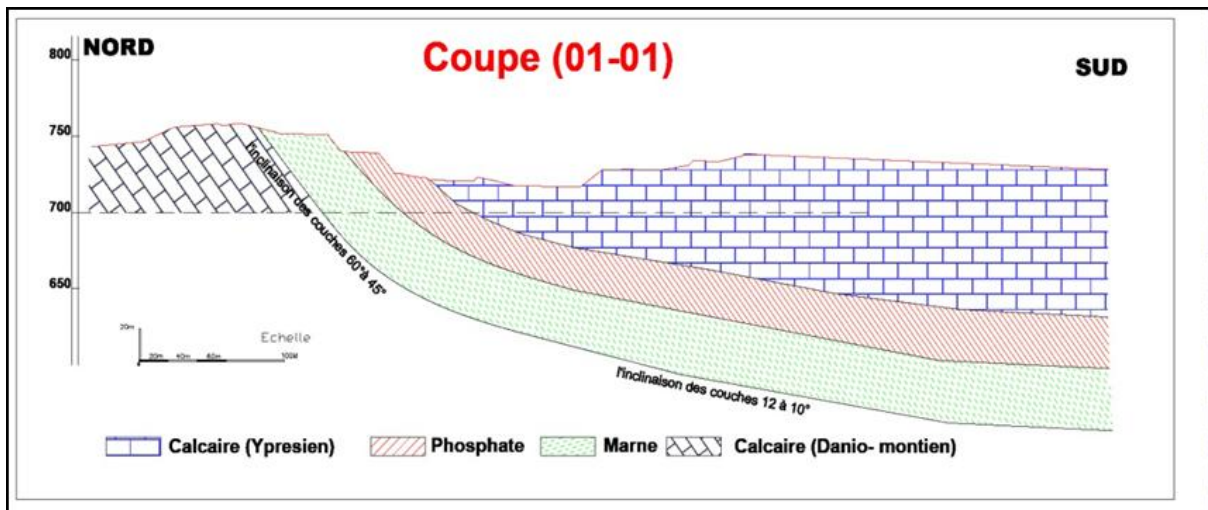


Figure 1.5 : Coupe côte Nord-ouest du kef-Essenoun [13].

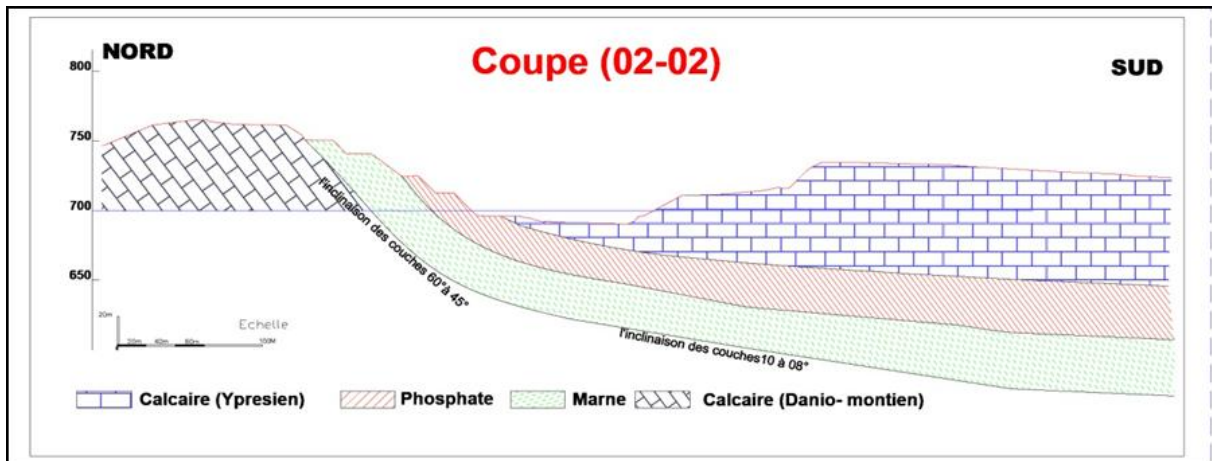


Figure 1.6 : Coupe côte Nord-ouest du kef-Essenoun [13]

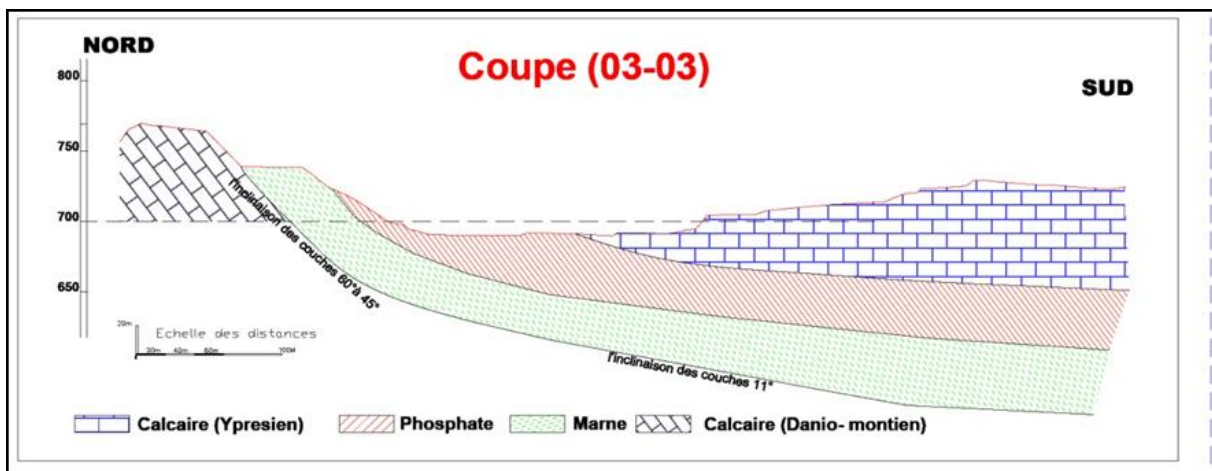


Figure 1.7 : Coupe côte Nord-ouest du kef-Essenoun [13]

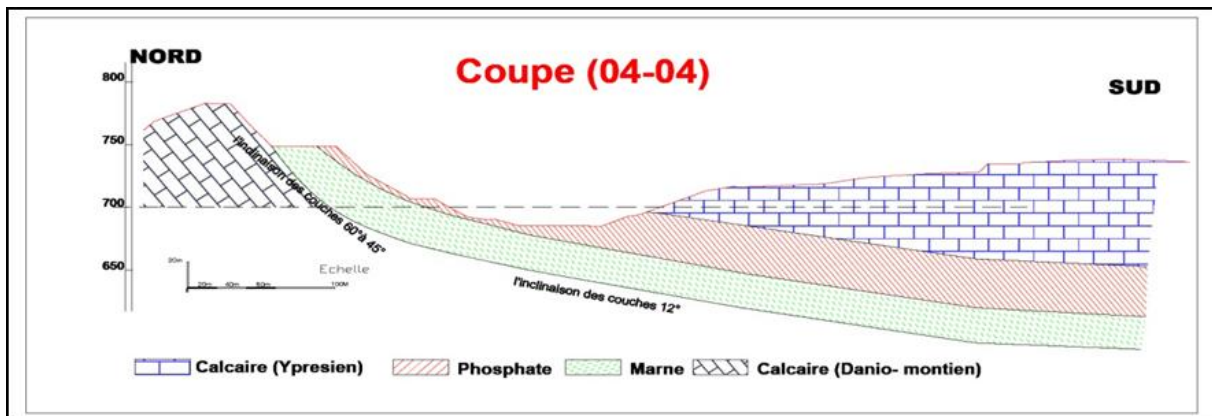


Figure 1.8 : Coupe côte Nord-ouest du kef-Essenoun [13]

1.1.8 Tectonique

La région de Djebel Onk appartient à l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien (Ranchin, 1963). La série supérieure à l'Eocène du bassin de Djebel Onk – Gafsa – Mélaoui est structurée en une suite d'anticlinaux et de synclinaux dissymétrique, généralement faillés dans

Chapitre I Contexte géologique de la mine de Djebel Onk

leurs flancs, d'axe le plus souvent SW – NE, et décrochés par des accidents transverses N 120° à N 140° E.

Les anticlinaux de Djebel Onk, Djebel Djemi – Djema et Oued Bétita sont localisés à la bordure de la flexure Sud – Atlasique qui correspond à une zone d'affleurement entre le domaine Atlasique mobile et la plate – forme Saharienne stable, ils appartiennent à la branche Nord de la flexure Sud Atlasique de direction E – W.

L'anticlinal de djebel Onk prolonge des monts de Nememcha jusqu'à l'Est en périculinal sous les formations du Miocène d'une direction E – NE, cet anticlinal est asymétrique au flanc méridional avec un pendage de 80° et flanc septentrional de 10°.

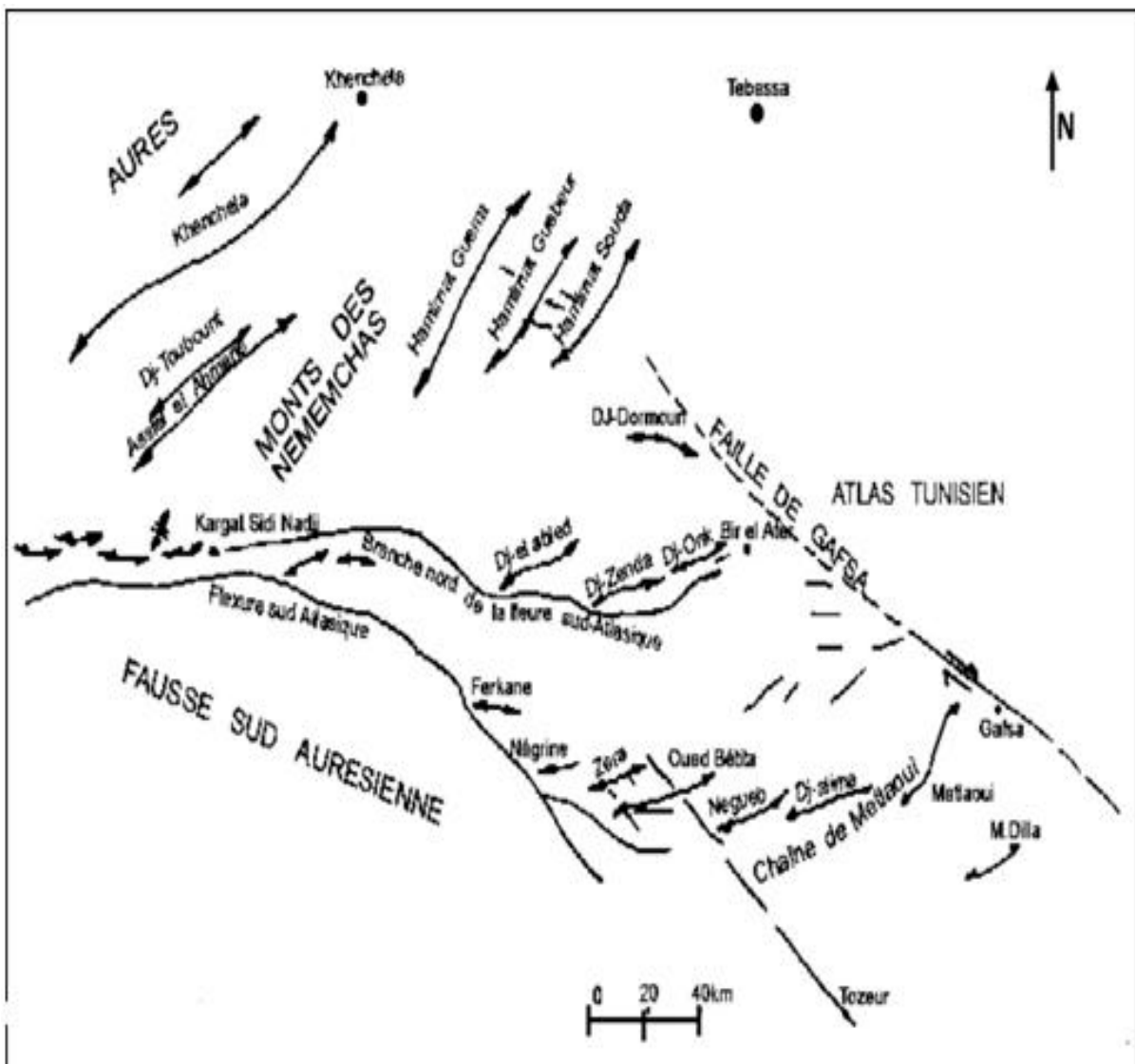


Figure 1.9: Carte structurale de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa – Métaoui[14].

Trois phases tectoniques d'ampleur très inégales ont marqué leur empreinte sur la région de Djebel Onk :

1. Tectonique Paléocène – Eocène (syndimentaire)

Une phase compressive NW – SE contemporaine à la sédimentation Paléogène, s'exprime par des ondulations et des failles syndimentaires. Cette tectonique précoce induit des lacunes de sédimentation dans la série Paléocène – Eocène et a conduit à l'édification des dispositifs paléogéographiques en Hauts fonds et sillons qui vont contrôler la sédimentation des phosphates. Ces déformations précoces peuvent être liées à la montée diapirique des évaporites triasiques, notamment au Paléocène – Eocène.

2. Tectonique post – Eocène moyen et anté – Miocène

Contemporaine à l'émersion de la série au Lutétien supérieur, La phase majeure des plissements des Aurès et des déformations distensives transverses (N120° à N150°) induisant un début de destruction de la série Crétacé Supérieur à Eocène en petits horsts et grabens, allongés suivant la direction N170°E qui vont être affectés par la pénéplanation et l'érosion différentielle anté – Miocène. Ces plissements sont, en majorité, antérieurs aux dépôts des sables Miocènes. C'est à la faveur de cette phase tectonique qu'apparaît l'anticlinal de Djebel Onk [15].

3. Tectonique tardi – Miocène, post – Burdigalienne, à Pliocène – Pléistocène

C'est la phase majeure du plissement de l'Atlas Tunisien. Les plissements de la série Crétacé supérieur – Paléocène – Eocène et Miocène en grandes structures antifformes et synformes rejouent en horsts et grabens dans les structures antérieurs, ils forment vers le Sud et sur le flanc inverse des méga plis de Djebel Onk et Djemi – Djema (comportement en dressants). Cette tectogénèse est responsable de la structure actuelle de la région de Djebel Onk.

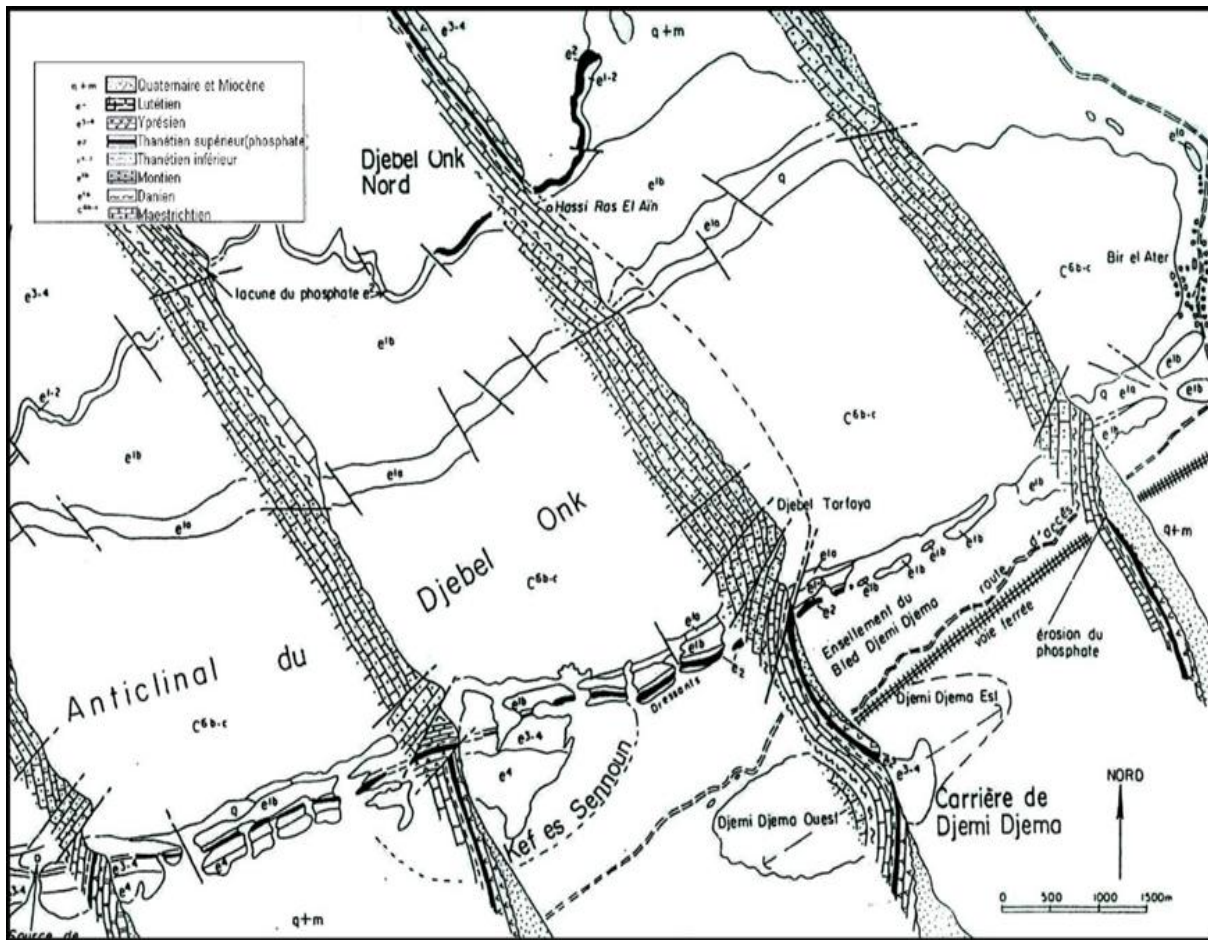


Figure 1.10 : Coupes stratigraphiques et structurales des flancs Nord et Sud du Djebel Onk

[11].

1.1.9 Paléogéographie

Au paléocène supérieur – Eocène inférieur, la région de Djebel Onk appartenait à la partie occidentale du bassin de Gafsa – Mélaoui – Djebel Onk. Il se différencierait cependant par une subsidence plus marquée, ce qui explique le tonnage énorme de phosphate accumulé, mais aussi les teneurs moyennes en phosphates tricalcique plus faible que celle enregistrées dans le gisement de Mélaoui (G.Ranchin, 1963). Ce sillon, occupé par une mer épicontinentale peu profonde, était situé entre l'île ou dôme de Kassarine au Nord, le môle de Djeffera au Sud et haut fond de Djebel Fouris à l'Ouest. La région a connu au cours de l'histoire géologique de la région, plusieurs étapes de développement bien marquées dans les sédiments :

- Période de sédimentation marine

Cette période de sédimentation qui débute à la fin du développement du bassin géosynclinal couvrant l'Afrique du Nord et allant du Maestrichtien à l'Eocène supérieur. Le Maestrichtien se caractérise par une subsidence lente et une sédimentation calme. A la limite

entre le Maestrichtien et le Danien, on note un changement de faciès, précurseur de mouvements orogéniques mettant fin au cycle de sédimentation géosynclinal. La profondeur du bassin diminue alors d'une manière brusque, ce qui reflète dans les roches par une sédimentation argilo-carbonatée qui dure pendant tout le Danien. Le Montien est une période de lente subsidence et de sédimentation assez calme. La mer est alors peu profonde, les bancs d'huîtres s'y déposaient en masse et ils sont caractéristiques pour les eaux peu profondes.

Au Thanétien inférieur, la profondeur du bassin a de nouveau diminué. On a alors un apport important de substance argileuse et des sédiments argilo-marneux qui indique une fermeture progressive du domaine de sédimentation et une tendance régressive de régime marin. Par contre, le Thanétien supérieur se caractérise par un apport considérable de sédimentation phosphatée qui témoigne d'une réouverture du domaine sédimentaire et du retour des influences transgressives. A la fin de sédimentation phosphatée principale, une phase régressive se produit à nouveau, elle est matérialisée par des remaniements de phosphate, puis localement par un horizon conglomératique à galets de dolomie formé en milieu marin sans indice d'émersion. La présence de dolomie est l'indice d'une saturation de l'eau de mer proche des conditions qui permettent le dépôt des faciès à évaporites. Elle souligne le caractère régressif de ces faciès phosphatés (Ranchin, 1963). Cette phase régressive est suivie régionalement, par la transgression yprésien (calcaire à silex) qui déborde largement les limites des formations précédentes. Au Lutétien, on note une lente diminution de la profondeur du bassin, ce qui a conduit à la formation de haut-fond et de lagunes et au dépôt d'évaporites. Les variations d'épaisseur, ainsi que l'homogénéité ou l'hétérogénéité de la couche phosphatée elle-même traduisent cette paléogéographie diversifiée. Ainsi, la couche de phosphate, calée entre les marnes noires du mur et les dolomies du toit, est la plus épaisse au niveau des gisements de Djemi-Djema (30 m) et de Kef Essenoun (proche de 50 m) qui caractérisent le sillon subsidant.

- Période de sédimentation continentale

A partir du Lutétien supérieur, les terrains s'émergent. L'Oligocène n'a pas laissé de traces du fait de l'érosion anté-miocène. Alors que le Miocène-Pliocène fut une période d'intense sédimentation continentale marquée par les sables, les argiles et les conglomérats. Tandis que le Quaternaire se caractérise par les produits d'érosion qui se déposent sur les flancs et les vallées. Ce sont les colluvions, les alluvions et les éboulis de pente. Des traces d'une glaciation au Pléistocène de courte durée très nette sont bien conservées au Djebel Onk.

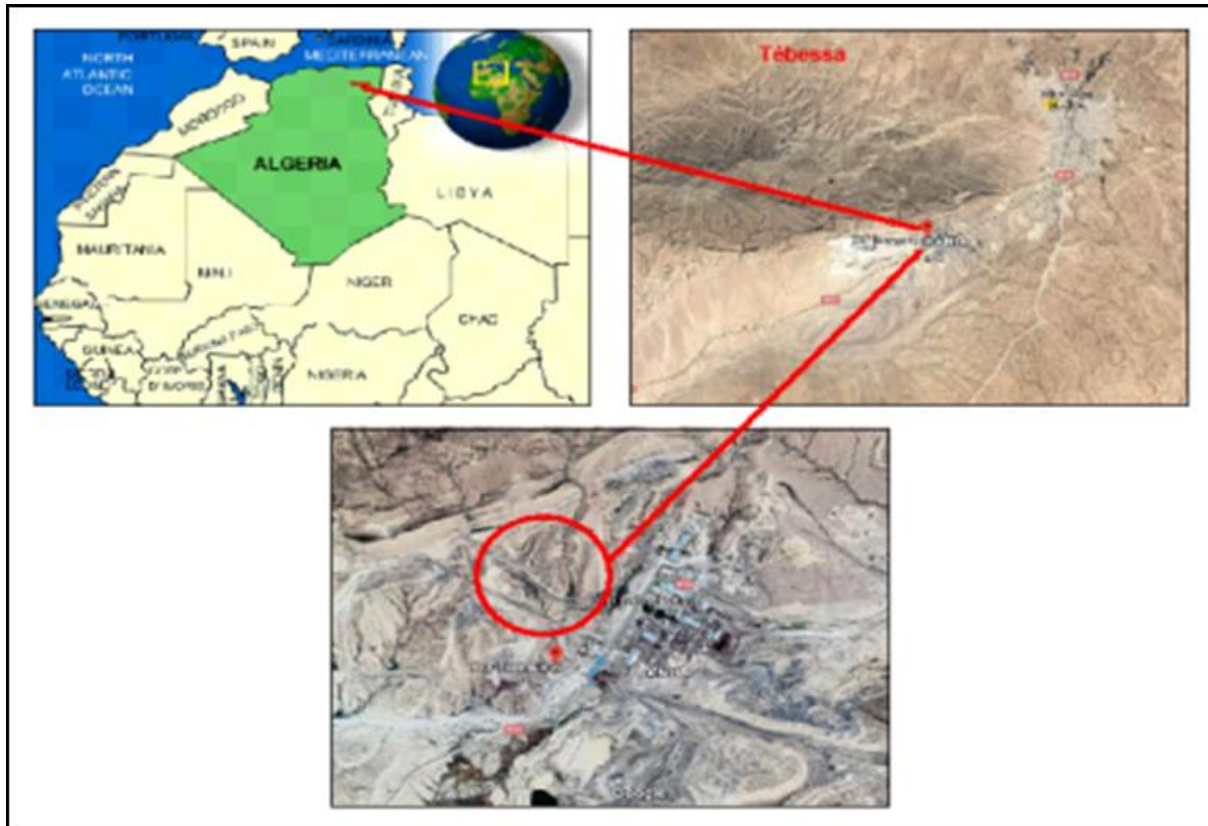


Figure 1.12 : Carte de localisation de la zone d'étude

1.2.2 Historique de la mine de phosphate de Kef-Essenoun Djebel El Onk

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 S2 à S33 réalisés selon une maille de (250*300) m. En outre l'EREM a réalisée dans la zone dressant de Kef-Essenoun 22 tranchées notés T22 à T44. Des données plus anciennes concernant la zone de Kef Es-sennoun proviennent des recherches réalisées par G. Ranchin (puits, KS1, KS2, KS3), descenderie, du demi, tranchées dans les dressants ainsi que plus récemment de 1977 à 1979 par la SONAREM (sondages : S3-K, S4-K, S5-K, tranchées des dressants). Dans le souci de développement de l'activité de Ferphos, un avis d'appel d'offre a été lancé en 1990 afin de rassembler tous les éléments techniques et économiques permettant de projeter les investissements adéquats, ce qui a été réalisé par le consultant français BRGM/SOFREMINES, ce dernier a fourni une expertise géologique de tous les gisements de la région de Djebel El Onk.

1.2.3 Structure Géologique

Le gisement de Kef-Essenoun est situé dans le prolongement de la retombée méridionale de la flexure antiforme du Djebel El Onk (Figure.1.4) dont la structuration

majeure est due à la tectonique post-miocène. Le gisement de Kef-Essenoun constitue une table monoclinale à pendage régulier vers le Sud (5 à 10°), tout au moins pour sa partie Nord. Cependant il existe une zone de rupture de pente au Sud de la table. La mise en évidence de cette relative augmentation du pendage a une importance au plan minier car on note que l'épaisseur du recouvrement stérile, notamment celles des sables, augmente au niveau de cette légère rupture de pente. Les dressants de Kef-Essenoun correspondent à la zone de flexure-faille du flanc inverse de la mégastucture antiforme, ou du flanc Nord de la structure synforme. Les dressants sont allongés N75°E où la couche phosphatée affleurant est subverticale ou fortement inclinée vers le Sud-Est ou le Nord-Ouest. Toute la zone d'affleurement des phosphates est considérée comme très tétanisée et d'accès difficile à l'exploitation.



Figure 1.13 : Série d'anticlinaux de Kef Essnoun

1.3.4 Stratigraphie

Le gisement de kef-Essnoun est constitué de bas en haut par la succession lithologique suivante (Cielensky et al. 1985,1987) :

- Des formations du Thanétien inférieur (le mur du faisceau phosphaté) sont représentées par des marnes feuilletées, sombres dans lesquelles s'intercalent localement, dans la partie inférieure, deux niveaux de phosphates dolomitiques d'épaisseur infra métrique ;
- Le faisceau phosphaté, appartenant au Thanétien supérieur est constitué par une couche unique de phosphate sans intercalation stérile ;
- Au toit du faisceau phosphaté, apparaît la série calcaro-dolomitique à silex de l'Yprésien, au-dessus de laquelle se dépose localement les calcaires Lutétien, puis les sables du Miocène et en dernier les dépôts récents du Quaternaire constitués essentiellement d'alluvions. L'épaisseur totale du recouvrement stérile varie de 40 m au nord à 198m au sud.

1.2.5 Tectonique

D'après les travaux de l'EREM, Le gisement de Kef Essnoun est caractérisé par une structure simple, qui se présente sous forme d'une table monoclinale à pendage régulier, sous un angle de 5 à 10° vers le Sud.

Le gisement de Kef Essenoun est situé dans le prolongement de la retombée méridionale de la flexure antiforme de Djebel Onk dont la structuration majeure est due à la tectonique post-miocène. Il est caractérisé par une structure simple, qui se présente sous forme d'une table monoclinale à pendage régulier, sous un angle de 5 à 10° vers le Sud.

Au sud de la table, on aperçoit une zone de rupture de pente où le pendage des couches atteint 20°. Une série de trois failles majeures de direction NNO-SSE traversent le gisement mais n'engendrent pas de déformations majeures sur la géométrie de la couche phosphatée. Par contre, dans la zone des dressants de Kef Essenoun, allongée N 75° E, la tectonique souple et cassante a entraîné un changement brusque du pendage de la couche phosphatée affleurant où l'angle de pendage est sub-vertical ou fortement incliné vers le sud-est ou le sud-ouest. Ces dressants, représentés par les formations du Paléocène (Danien- Montien et Thanétien) et de l'Eocène inférieur (Yprésien) correspondent à la zone de flexure faillée du flanc inverse de l'anticlinal de Djebel Onk. Au Nord-est des dressants, la série est renversée et la couche de phosphate plonge suivant un angle de 30° à 60° vers le nord-ouest. Par contre dans la partie centrale des dressants, la couche de phosphate est en série normale et plonge vers le sud.

Tableaux 1.1 : réserves géologiques en phosphates des gisements de Djebel Onk [33]

Gisements	Catégorie de réserve	Mine à ciel ouvert
Djemi Djema	B	68 935 761,03
	C1	31 000 000
	C2	109 000 000
Kef Essennoun	B	153 391 005,10
	C1	/
	C2	14 000 000
Tarfaya	C2	14 000 000
Total de Djebel Onk Sud		390 326 766,13
Bled Elhadba	B	210 772 096
	C1	232 515 209
	C2	294 497 010
Djebel Onk Nord	C1	31 000 000
Oued Betita	C2	/
TOTAL BEH-OB-DJ-O-N		768 784 315
TOTAL GENERAL		1 159 111 081,13

1.3. CONCLUSION

La région du Djebel Onk Sud est reconnue par les sédiments de Crétacé, Tertiaire, et les dépôts du Quaternaire qui recouvrent la majeure partie des terrains, la structure est simple, sous forme d'une table monoclinale a pendage subhorizontale au niveau de K.E.S. Cette région est caractérisée par deux types des failles NNW –SSE et N75°E. Les gisements de Djebel Onk sont classés parmi les grands gisements dans le monde à cause de la qualité de phosphates élevée. Pour obtenir le produit marchand, la mine de Djebel -Onk opérée par deux procédés de traitement. Par voie humide, et par voie sèche.

Chapitre II : Description des massifs rocheux structure et comportement mécanique

Introduction

Ce chapitre est une synthèse de la revue de littérature du sujet traité. Il contient d'une part une description des massifs rocheux et les discontinuités ; d'autre part une présentation des comportements mécaniques de massifs rocheux.

2.1. Description des massifs rocheux

Dans le dimensionnement des ouvrages, le comportement mécanique des massifs rocheux est un facteur essentiel qui y est exécutés. Afin de comprendre, expliquer et modéliser ce comportement, il est nécessaire de connaître la structure géométrique des fractures, ainsi que les propriétés mécaniques de chacune des composantes que sont la matrice rocheuse et les discontinuités. Au niveau des terrains constitués des roches dures, les massifs rocheux sont caractérisés par la présence d'éléments structuraux dominants qui peuvent être représentés par un assemblage de blocs rocheux dont les dimensions sont fonctions de la configuration des éléments structuraux délimitant ces blocs [19].

Donc, les massifs rocheux sont des structures très complexes formées d'une juxtaposition de matériaux hétérogènes. Ils sont assimilés à un assemblage des blocs appelés matrice rocheuse lesquels ils sont délimités par des discontinuités constitués des fissures, fractures, failles ou bien des limites stratigraphiques qui affectent fortement leur stabilité et plus généralement leur comportement mécanique [20].

2.1.1. Structure des massifs rocheux

Les massifs rocheux sont des structures très complexes. Ils sont assimilés à un assemblage de blocs appelés matrices rocheuses lesquels sont délimités par des discontinuités constituées de fissures, de fractures ou de failles ou encore de joints stratigraphiques. Par exemple, sur la (Figure 2.1), on constate que, pour cet exemple de massif rocheux, pour l'échelle la plus grande, la cinquième voire la quatrième, on peut supposer un comportement isotrope équivalent pour le massif mais pour les deuxièmes et troisièmes échelles avec respectivement une et deux familles de discontinuités, il serait déconseillé de faire cette hypothèse. Il sera plus pertinent de prendre en compte directement les discontinuités dans les modélisations.

En règle générale, on considère la succession suivante [21] :

- Minéraux, considérés comme éléments de base, postulés non-affectés de discontinuités ;
- Matériaux rocheux constitués de minéraux séparés par des micros discontinuités ;
- Massifs rocheux constitués de matériaux rocheux séparés par les macros discontinuités.

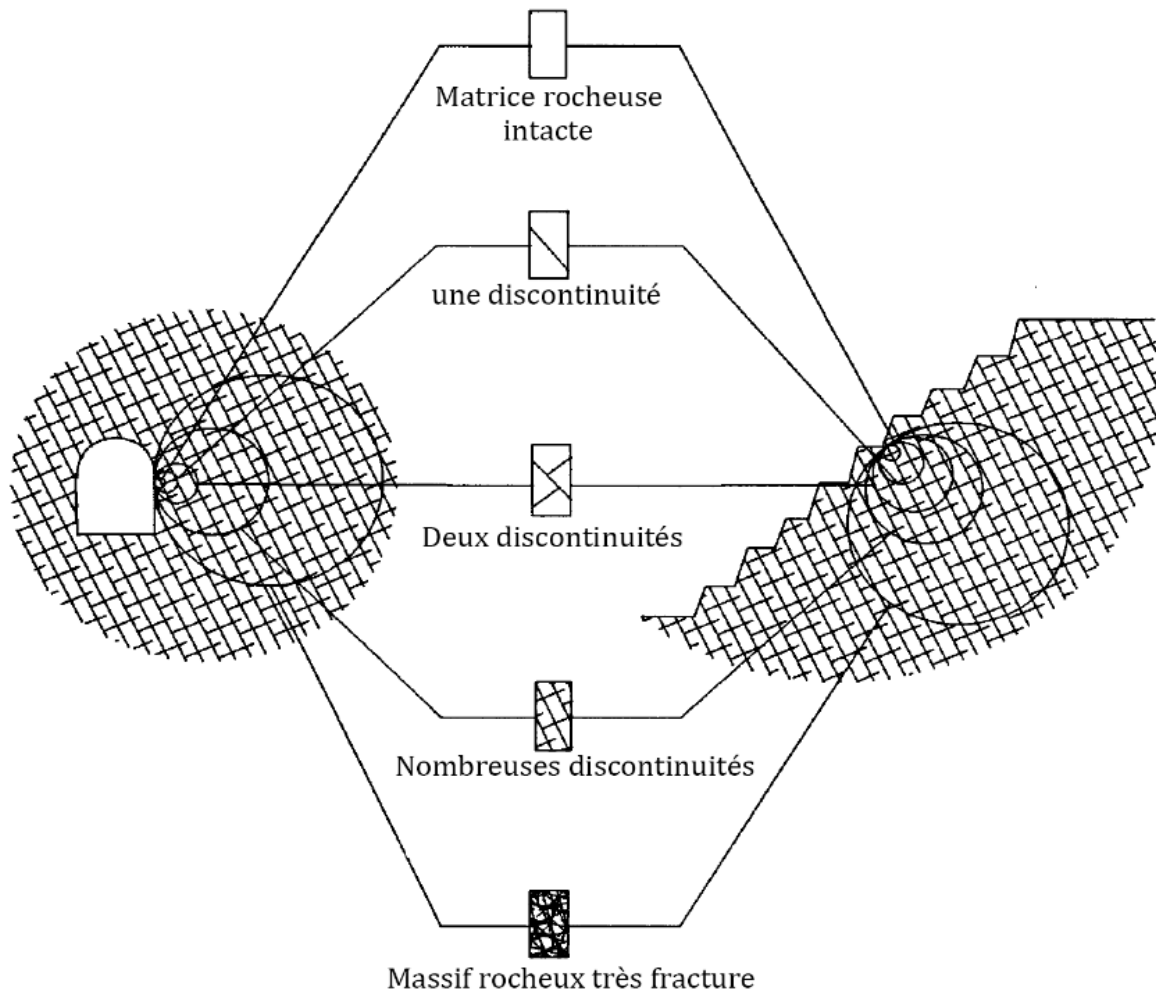


Figure 2.1. Les différentes échelles de modélisation et de représentation du massif rocheux [22].

2.1.1.1. Principaux types de structures de massifs rocheux

Au sens commun, la structure est la façon dont sont assemblés des éléments de construction, comme par exemple l'appareil d'une maçonnerie. Dans la nature on ne trouve ni l'opus incertum, ni les assises régulièrement superposées à joints verticaux contrariés (le brick work anglais) et moins encore les voutes de claveaux appareillés. Parmi beaucoup de variantes plus complexes (mais peut significatives) les modèles suivants ont une portée très générale dans les roches (Figure 2.2).

- beaucoup de granites et de calcaires massifs montrent trois familles grossièrement trirectangulaires : ces massifs apparaissent formés de blocs parallélépipédiques (ainsi les aiguilles de Chamonix) et assimilables à des modèles comme la boîte de morceaux de sucre ou de palette de parpaings ; tous les joints sont continus, contrairement à la maçonnerie de briques dont les joints verticaux sont systématiquement décalés ; le bloc unitaire est proche de cube. Il y a presque équivalence entre les trois directions du dièdre. Une poussée parallèle à l'un des plans va décaler les autres (les imbriquer) et en bloquer le libre déplacement.
- Dans les calcaires à bancs minces, les alternances de marnes et de calcaires ou celles de grés et de marnes des formations appelées flysch, comme dans beaucoup de micaschistes et gneiss, l'une des directions prend davantage d'importance et les diaclases perpendiculaires sont moins continues (ou peu persistantes).
- Les roches schisteuses sont une catégorie bien à part, où la schistosité est le caractère dominant ; suivant l'échelle considérée, le rôle des fractures peut passer au second plan.
- Les roches écrasées et les schistes froissés fréquents dans les zones tectonisées : tout se passe comme si la direction d'anisotropie était devenue largement dispersée autour d'une valeur moyenne, autorisant des déformations pour un cône de forces très ouvert. Une structure analogue, à plus grande échelle, est celle de certaines zones tectoniques où des blocs sains de toute dimension sont séparés par une matrice meuble, qui a souvent elle-même une structure de brèche de faille.

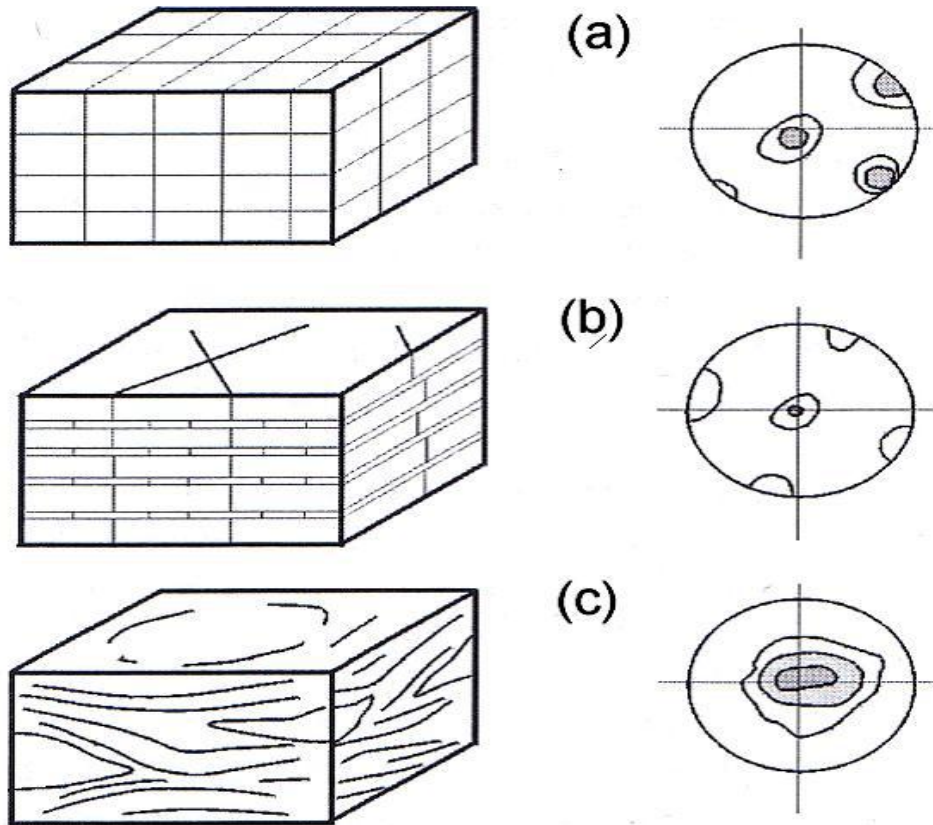


Figure 2.2 : Types de structures des massifs rocheux avec les représentations statistiques correspondantes [36].

- a- Roche massive à trois familles grossièrement équivalentes
- b- Massif rocheux stratifié ou schisteux à une famille prépondérante
- c- Roche écrasée ou schiste froissé où la famille prépondérante est largement dispersée

2.1.2. Modélisation des massifs rocheux

Contrairement à d'autres domaines abordés par l'ingénieur, la mécanique des roches a tardé à se doter de modèles, en particulier pour les massifs rocheux. En tectonique on a utilisé très tôt des modèles physiques pour reproduire les déformations observées, notamment pour le plissement d'ensembles de strates alternativement rigides et plastique (que les géologues nomment parfois compétentes et incompétentes, par francisation abusive des mots anglais), et pour la montée des diapirs de sel gemme ou de granite (dont le modèle est l'instabilité de la superposition de liquides non miscibles dont le moins dense est au-dessous du plus dense). Il ne s'agissait alors que de modèles continus.

La modélisation du massif rocheux fracturé fait appel à une base de données contenant les valeurs de tous les paramètres utiles pour la résolution du problème étudié, géométriques, mécaniques, hydrauliques, etc. Suivant le cas, assortis autant que possible de leur caractéristiques statistiques (moyenne, écart type, loi de distribution éventuelle). Les logiciels 3D spécialisés exploitent cette base de données pour donner une représentation visuelle du

massif dans l'espace, par des blocs diagrammes et des coupes à la demande. Certains logiciels prennent en compte des scénarios géologiques successifs, phases de sédimentation, subsidence, plissements et jeux de failles, y compris la fracturation sélective de certains bancs et blocs et les compartimentages. Ainsi apparaît la notion de géo modèle, à l'amont des modélisations mécaniques, hydrauliques ou autres, (Figure 2.3) [35].

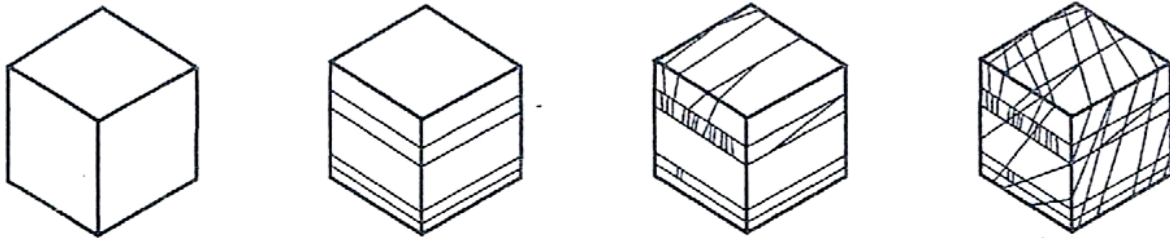


Figure 2.3 : Etapes successives de représentation des familles de fractures [36].

Pour aborder ces modélisations complexes, il est impératif d'éliminer le bruit des phénomènes accessoires ; le géo modèle doit être conçu de façon à mettre en lumière les paramètres qui gouvernent le comportement global et eux seuls. Leur choix repose sur un examen attentif du site, à l'échelle du problème à résoudre, afin de retenir les caractères significatifs, singulièrement les anisotropies et les surfaces de discontinuité étendues.

Parmi les difficultés d'interprétation, il convient de remarquer que la plupart des modèles de blocs sont du côté pessimiste, parce qu'ils emploient des surfaces trop parfaites. On rappelle aussi que les premiers modèles physiques, construits pour des massifs calcaires avaient reproduit le figurer classique des roches calcaires sur les coupes géologiques, c'est-à-dire le brickwork, qui n'existe nulle part dans la nature, non plus que divers autres modèles irréalistes de la littérature.

2.1.3. Reconnaissance et auscultation des massifs rocheux

2.1.3.1. Objectifs et définitions

Les roches et les massifs rocheux sont à la fois complexes et opaques. Même les plus simples en apparence peuvent réserver des surprises. Pour connaître leurs composants, leurs structures, et ce qui s'y passe, l'ingénieur dispose de méthodes de reconnaissance et auscultation, depuis les méthodes de la géologie traditionnelle avec le marteau et la boussole, jusqu'à des technologies et métrologies de pointe, en passant par des techniques classiques (forage, prélèvement d'échantillons, essais de laboratoire et in situ, méthodes géophysiques, etc.), toutes méthodes qui font des progrès plus ou moins rapides. On s'attachera surtout ici aux aspects qui concernent le comportement mécanique (incluant en général les fluides du terrain).

On sépare reconnaissance, qui s'applique depuis l'origine d'un projet et tant que des questions se posent sur les aléas géologiques d'un site, et auscultation qui concerne le comportement en service de l'ouvrage construit de son environnement rocheux, terrain de fondation par exemple. Lorsqu'il n'y a pas d'ouvrage à construire, ainsi pour une falaise jugée instable, la reconnaissance est une phase d'acquisition de connaissances sur un état initial, l'auscultation un suivi dans le temps du comportement. Cet exemple illustre l'enchaînement entre deux pratiques qui partagent à la fois des principes et des technologies, ce qui justifie qu'elles soient présentées dans un même chapitre. On pourrait dire aussi que les reconnaissances sont davantage géométriques, l'auscultation davantage comportementale. Entre les deux, les essais qui portent sur les propriétés mécaniques et hydrauliques ont un caractère intermédiaire [34].

Tant les descriptions géologiques que les propriétés mécaniques dépendent des dimensions de l'échantillon étudié, affleurement sur le terrain ou éprouvette au laboratoire. Il faut garder à l'esprit l'échelle des objets géologiques et celles de leurs hétérogénéités qui, associées à la dispersion des résultats, permettent de mettre en évidence l'influence souvent prépondérante de la fissuration. En raison du caractère primordial des structures géologiques et de la variété des matériaux naturels, l'intervention du géologue est indispensable dans toute reconnaissance, de même pour l'interprétation des contraintes par rapport à ce qu'on peut savoir du champ régional ; au contraire une fois la structure définie, les essais géotechniques sont affaire du géotechnicien, et l'auscultation de l'ouvrage est souvent l'affaire du seul ingénieur spécialisé ; lorsqu'elle porte sur le terrain lui-même, elle suppose une collaboration équilibrée avec les différentes spécialités (géologue, géotechnicien, métrologue) [33].

2.1.3.2. Phasage des reconnaissances

C'est la géologie qui détermine l'échelle à utiliser pour les reconnaissances. La gamme des méthodes de reconnaissances est très variée ; elle va de l'analyse de documents bibliographiques, cartographiques et photographiques aux techniques les plus sophistiquées. Il n'existe pas de méthode universelle et on ne peut pas demander à une méthode ce qu'elle ne peut pas donner. Chacune est plus ou moins bien adaptée à certains types de terrains et de problèmes. Certains procédés sont lourds et coûteux (sondages profonds et galeries par exemple) et il importe donc d'en tirer le maximum de renseignements. Ceci suppose qu'on sache :

- Définir parfaitement à l'avance les objectifs en fonction des problèmes à étudier ;
- Implanter les reconnaissances de façon judicieuse ;

•Vérifier que le travail demandé est exécuté correctement [27].

2.1.3.3. Etablissement d'un modèle géologique

On emploie d'abord des méthodes strictement géologiques, énumérées dans le Tableau 2.1, et traitées ci-dessous de façon sommaire (se reporter aux ouvrages classiques de géologie de l'ingénieur), cartes de documentation, méthodes directes d'observation, puis méthodes géophysiques, qui sont dites indirectes puisqu'une interprétation est nécessaire ; les méthodes qui ont une implication mécanique, ou sont liées à l'hydrogéologie sont traitées de façon plus détaillée. Il est important de prendre les problèmes à l'échelle régionale avant de s'intéresser au site proprement dit ; la compréhension des styles tectoniques et même de certains problèmes superficiels peut se trouver à des kilomètres ou davantage. Parmi les pièges classiques concernant le génie civil, on peut citer :

- Les surcreusements des vallées glaciaires et de leurs gorges de raccordement ;
- Les surcreusements des fleuves méditerranéens au Messinien ;
- Les anciens lits masqués par des remblaiements (alluvions, moraines, produits volcaniques, glissements de terrains) [26].

Classique chez les pétroliers, puisqu'il désigne les structures géologiques dont le pétrole n'a pu s'échapper (anticlinaux, bordures de diapirs, etc.), le mot piège a été appliqué aussi en métallogénie pour certaines minéralisations. Ci-dessus le piège est plus banalement ce qui peut tromper le néophyte, et même parfois le spécialiste. L'interprétation de ces structures dans l'espace s'appuie souvent sur des maquettes permettant de visualiser les structures géologiques et les principaux travaux de reconnaissances (il s'agit souvent désormais de maquettes virtuelles en image à trois dimensions, ou l'ordinateur peut dessiner des coupes dans toute direction) [28].

Tableau 2.1 : Modèle géologique : Définition des matériaux et structures

Méthodes préliminaires	Bibliographie et examen des cartes existantes (très rarement à une échelle convenable) ; Télédétection, photos aériennes, y compris obliques, éclairage rasant, émulsions infrarouge, etc., photos satellite (linéaments).
Méthodes directes	Observations et levés géologiques sur le terrain : (à une échelle appropriée à l'ouvrage) ; affleurements, tranchées, décapages, forages, galeries, mesures de pendage, piézométries des fluides, prélèvements, études minéralogiques et pétrographiques.
Méthodes indirectes	Prospection géophysique de surface et en forage : méthodes électriques, sismiques, gravimétriques, etc. ; diagraphies, dia mètreur, imagerie de paroi, enregistrement des paramètres de forage

2.2. Classification géologique des roches

Le Comité Français de Mécanique des Roches [36] définit la roche comme étant un assemblage de minéraux qui ont acquis des liaisons plus ou moins fortes au cours de leur histoire géologique. Trois catégories principales sont à l'origine de la classification des roches:

1- Roches magmatiques : elles résultent du refroidissement du magma (granite, basaltes...).

2- Roches sédimentaires : elles résultent de la décomposition des roches d'origine magmatiques ou métamorphiques et couvrent plus de trois quarts de la surface des continents et presque la totalité des fonds des océans. Elles sont caractérisées par leur épaisseur limitée (calcaires, grès, roches argileuses...).

3- Roches métamorphiques : leur formation est due à un phénomène de transformation à l'état solide des roches sédimentaires ou magmatiques sous l'effet de hautes pressions et/ou augmentation de la température. (Marbre, quartzites, schistes et micaschistes, gneiss.). Connaissant bien l'importance capitale qu'apporte l'aspect géologique des roches sur leur comportement mécanique, nous ne nous intéressons dans le paragraphe suivant et dans le cadre de cette thèse qu'à l'aspect mécanique en termes de propriétés et comportement.

2.3. Description des discontinuités

Une discontinuité peut être définie comme étant une cassure d'origine mécanique ou une fracture ayant une faible résistance en traction négligeable dans la roche [23]. La discontinuité peut être naturelle et traduire l'histoire géologique et structurale de la zone (avec une origine géologique ou géomorphologique), ou artificielle (créée par les activités humaines telles que les excavations dans le massif rocheux).

Les discontinuités représentent des types de surface très variées dont l'identification géologique, depuis l'échelle millimétrique jusqu'à l'échelle kilométrique, apporte des informations géométriques et mécaniques [24]. L'ensemble des discontinuités dans un massif rocheux est le résultat de la superposition de différentes familles. Chaque famille peut avoir des lois de distribution et des caractères statistiques différents.

2.3.1. Différent types de discontinuités

Les principales discontinuités présentent dans les massifs rocheux [25] sont :

Les Joints de stratification

Les joints jouent un rôle important dans le comportement mécanique des massifs rocheux. Une description précise de la fracturation est donc un préalable nécessaire, et critique, à toute

analyse en mécanique des roches. Les types d'information exigés pour la description complète de la fracturation, la forme des joints sont plus ou moins réguliers (Figure 2.4), ils séparent les strates et créent une interface de deux blocs et ces derniers peuvent être soulignés comme de minces dépôts argileux ou schisteux favorisant le glissement [26].



Figure 2.4 : Plan de stratification.

Plans de 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.

Les diaclases

Les diaclases se présentent pratiquement toujours sous la forme de deux familles orthogonales entre elles et perpendiculaires aux plans de stratification. 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, elles sont souvent perpendiculaires ou obliques aux joints de stratifications ou à la schistosité. Elles ne présentent pas de trace de mouvement et elles ont une extension limitée [27].

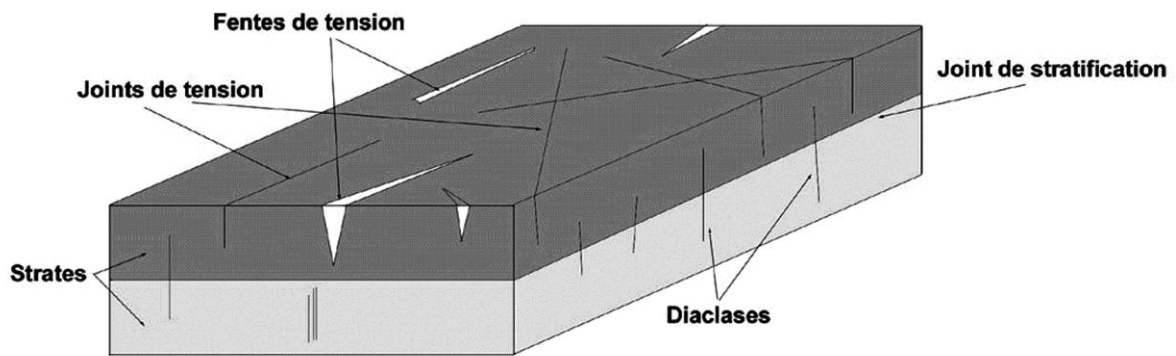


Figure 2.5 : Schéma de diaclases.

Les failles

Une faille est définie comme étant un plan de rupture en cisaillement qui montre des signes évidents d'un mouvement différentiel de la masse rocheuse dans chacune des faces du plan [23]. Les failles sont générées par des événements tectoniques à grande échelle. 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.

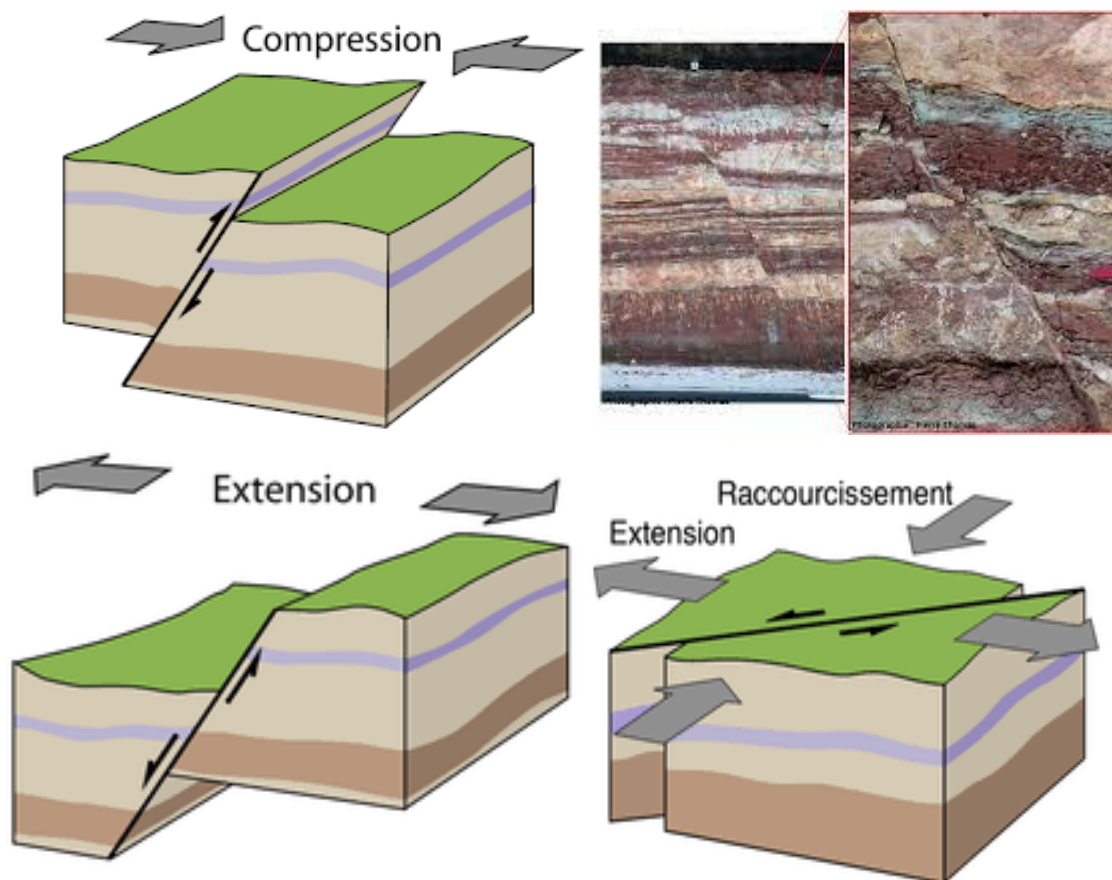


Figure 2.6 : Exemple d'une faille

Les plis

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



Figure 2.7 : Exemple d'un pli.

2.3.2. Caractéristique géométriques des discontinuités

Une famille de discontinuité est caractérisée et fondée principalement sur la connaissance des paramètres géométriques des discontinuités suivantes :

Orientation

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. 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.

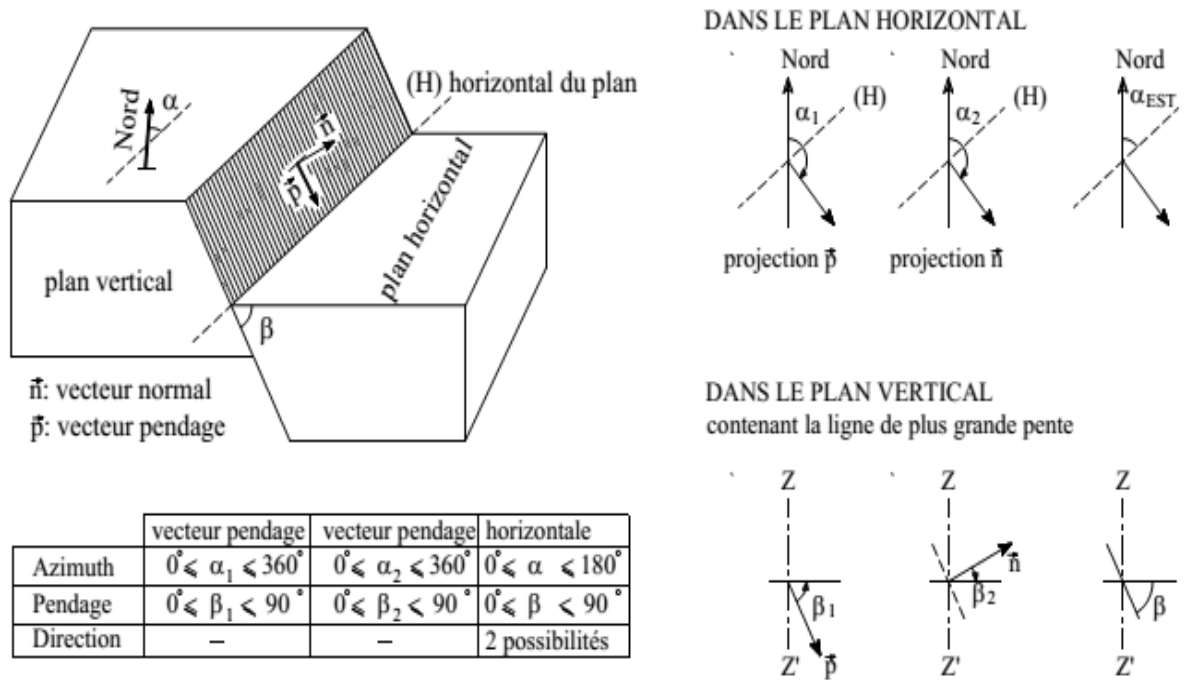


Figure 2.8. Orientation d'un plan de discontinuité. [28]

L'orientation des discontinuités peut être définie selon plusieurs conventions. L'orientation est définie à l'aide de deux angles. Le pendage est l'angle maximal que fait une discontinuité avec un plan horizontal. La direction du pendage est définie comme étant l'angle, mesuré dans un plan horizontal et dans le sens horaire, entre le nord et la projection de la ligne de pendage maximal.

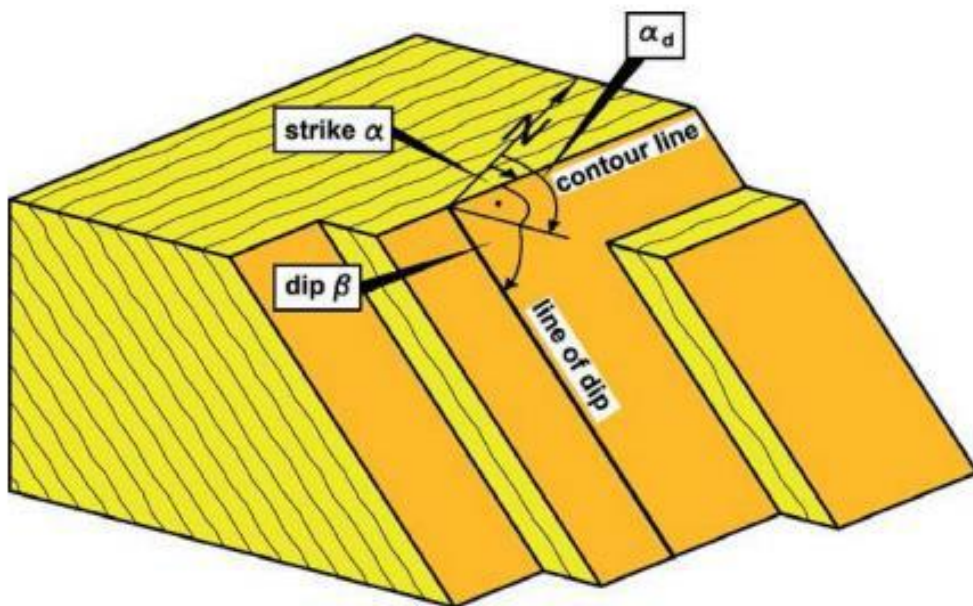


Figure 2.9. Orientation des discontinuités [29].

Extension

Extension (ou persistance des joints) représente une surface totale de la discontinuité que l'on peut approcher par la longueur de son intersection avec la surface d'observation (trace), à condition que celle-ci soit suffisamment étendue. Elle joue un rôle essentiel dans la connectivité des blocs. La persistance des systèmes de joints contrôle les glissements de grande échelle, (rupture de pente en marches d'escalier, fondation de barrage et excavation de tunnel, des galeries...etc.) [30].

Espacement et densité

L'espacement c'est la distance moyenne qui sépare deux intersections successives d'une ligne droite (d'échantillonnage), avec les traces des fractures d'un affleurement et la densité définit le nombre de discontinuités, d'une même famille, par unité de volume ou de surface ou de longueur. La mesure de l'espacement des joints varie selon les différentes faces et directions de mesures [25].

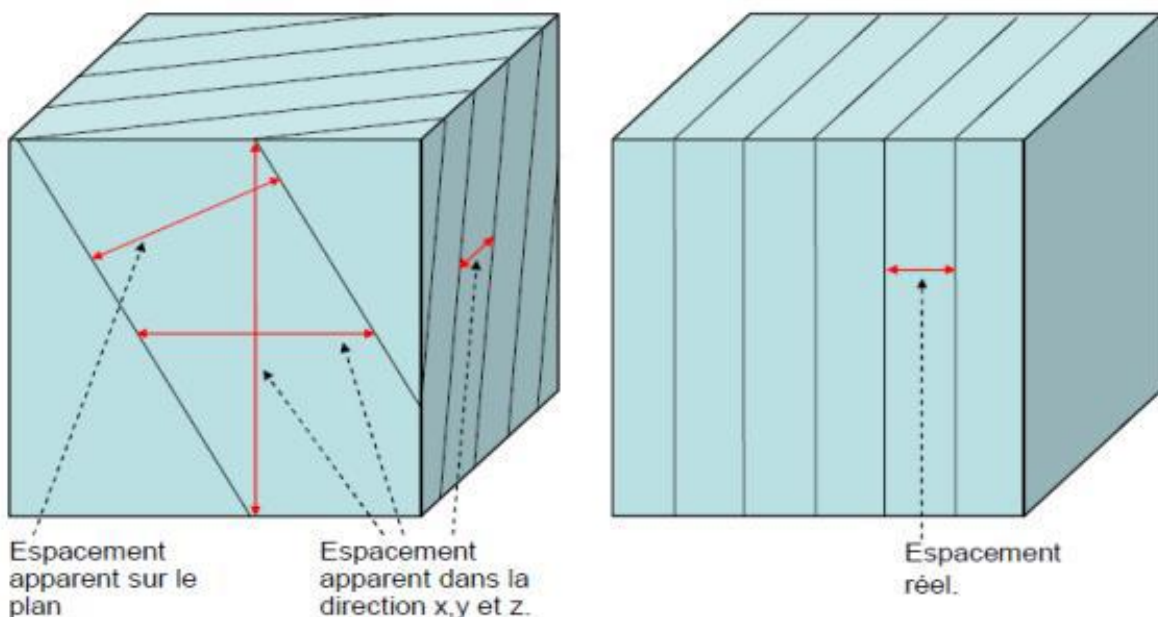


Figure 2.10 : Espacement des joints [25].

Fréquence des discontinuités

Est déterminée par comptage sur le terrain (Figure 2.11), 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 [31].

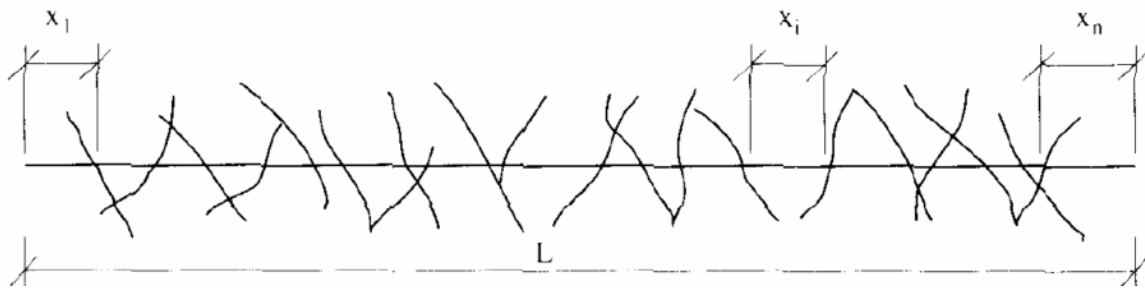


Figure 2.11. Caractéristiques géométriques des discontinuités dans un massif rocheux [32].

La fréquence et l'espacement moyen dépendent de l'orientation de la ligne de levé par rapport à celle des discontinuités.

Ouverture

Est la distance perpendiculaire entre les deux épontes de la discontinuité. Elle est déterminante pour l'écoulement et le comportement mécanique des fissures [25]. Ce paramètre affecte la perméabilité des discontinuités et leur comportement hydromécanique. Le tableau I.1 donne une classification des ouvertures des discontinuités dans les roches.

Tableau 2.2. Classification des ouvertures des discontinuités [25].

Ouverture (10 ⁻³ m)	Description
< 0,1	Très fermée
0,1-0,25	Fermée
0,25-0,5	Partiellement ouverte
0,5-2,5	Ouverte
2,5-10	Modérément large ouverture
> 10	Large ouverture

Rugosité

Représente le taux d'ondulation de la surface de contact du joint. Elle est difficile à quantifier et elle est fonction de l'échelle d'analyse. En mécanique des roches la rugosité est souvent représentée par le coefficient de rugosité du joint JRC (Joint Roughness Coefficient) qui varie entre zéro (fracture plane) et 20 (joint très rugueux). Ce coefficient peut être obtenu en comparant la morphologie de la fracture à dix profils types de base de 10cm de longueur [33].










Relation between J_r and JRC_n Subscripts refer to block size (cm)		J_r	JRC_{20}	JRC_{100}
I	rough 	4	20	11
II	smooth 	3	14	9
III	slickensided 	2	11	8
Stepped				
IV	rough 	3	14	9
V	smooth 	2	11	8
VI	slickensided 	1.5	7	6
Undulating				
VII	rough 	1.5	2.5	2.3
VIII	smooth 	1.0	1.5	0.9
IX	slickensided 	0.5	0.5	0.4
Planar				

Figure 2.12 : Joint Roughness Coefficient.

2.3.3. Familles et réseaux de discontinuités

La plupart des discontinuités peuvent être regroupées en familles, qui présentent des caractères morphologiques communs liés à une origine commune. L'ensemble des familles présentes forme un réseau. Les notions de familles et de réseaux sont quelquefois valables sur de grandes distances, mais souvent la structure se modifie sur quelques dizaines de mètres, parfois encore. L'identification de familles et de réseaux n'a de sens qu'à l'intérieur de domaines limités, ou un certain parallélisme est préservé. C'est l'observation du terrain qui permet de délimiter ces volumes. Il convient aussi de traiter à part les joints de stratification, les contacts tectoniques, les failles bien individualisées et d'une manière générale toute famille qui s'impose à l'observateur. Certaines de ces familles, antérieures au plissement des couches, tournent avec celles-ci, d'autres sont au contraire liées aux déformations des charnières de plis [35].

2.3.3.1. Caractérisation des familles

Les caractères d'une famille, outre l'orientation (définie comme ci-dessus) sont la fréquence spatiale (ou son inverse l'espacement) et sa distribution : plutôt qu'un espacement régulier, par exemple tous les dix à vingt mètres, on observe une alternance de zones presque dépourvues de diaclases et de zones à forte densité, par exemple tous les mètres, qui constituent à la surface des reliefs des couloirs de fracturation. Ou bien dans une distribution d'apparence plus régulière, une diaclase est plus ouverte tous les cinquante mètres. La distribution des espacements sont souvent représentée par une loi exponentielle négative. Lorsque la persistance est faible, il est plus facile de l'estimer au niveau de la famille que pour chaque discontinuité prise isolément, (Figure 2.13).

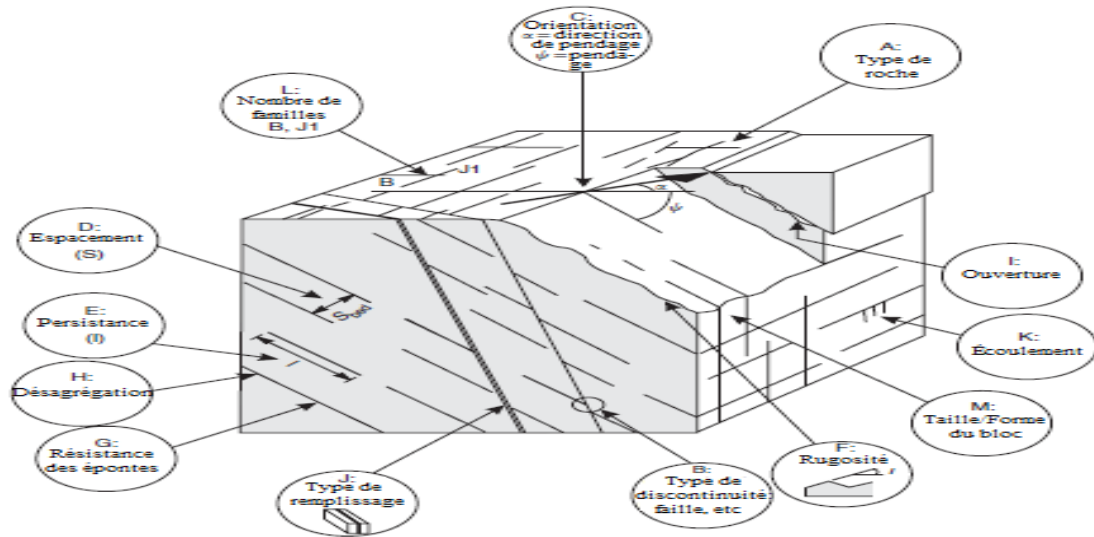


Figure 2.13 : Caractéristiques des discontinuités dans un massif rocheux [32].

2.3.4. Représentations graphiques

Les représentations planes

Les surfaces de discontinuité sont relevées sur le terrain ou au long des forages ; leur orientation et leurs autres caractéristiques sont mesurées ou estimées. Sur une carte ou un plan de projection, les principales sont figurées par leur trace ; si le plan est horizontal, ce qui est le cas général des cartes, l'inclinaison est précisée par une flèche perpendiculaire à la trace, pointant vers le bas, avec ou sans mention de l'angle du pendage, (Figure 2.14).

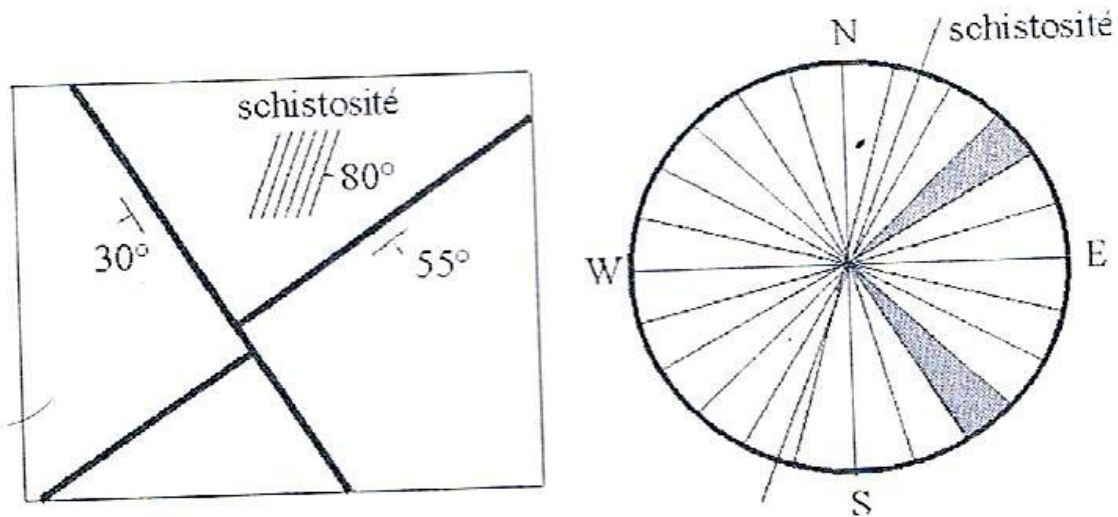


Figure 2.14 : Représentation plane de surface de discontinuité

- Traces de deux failles et de la schistosité sur une carte, avec indication de pendage ;
- Rosace des directions, histogramme polaire, par secteur de 15°.

On peut adopter pour la trace divers types de traits (couleur, épaisseur, figurés variés) pour tenir compte du type et de l'importance relatives des surfaces représentées, des remplissages, etc. on séparera par exemple les diverses familles qui ont pu être reconnues sur le terrain. Une représentation en rosace est parfois adoptée, comme pour les vents dominants : les directions des traces sont regroupées dans une sorte d'histogramme polaire ; la rosace permet de comparer des familles à fort pendage mais ne peut intégrer des surfaces horizontales.

La projection stéréographique (au sens strict) est une transformation qui conserve les angles, et qui conserve les cercles. Les orientations de plusieurs plans sont donc représentées par des arcs de cercles, dont on peut mesurer directement les angles. Cette propriété remarquable permet des solutions graphiques élégantes pour certains calculs de stabilités de blocs polyédriques. Mais la projection stéréographique favorise les régions polaires du diagramme (les forts pendages) ou détriment des régions équatoriales (les faibles pendages) ; une même surface de la sphère, placée au pôle ou près de l'équateur sera représentée plus petite à l'équateur qu'au pôle. Cet inconvénient reste en général acceptable en mécanique des roches, mais non en cartographie ; on utilise loin des pôles une transformation qui conserve le rapport des aires (en France la projection de Lambert).

Le report sur le diagramme de directions de plans et de droites est facilité par un système de coordonnées sphériques, méridiens et parallèles, dont la transformée est appelé diagramme de Wulf ou de Schmidt suivant que la projection utilisée conserve les angles ou les rapports d'aires. La notation autour du centre d'un calque portant ce diagramme permet les mesures nécessaires. Sur le diagramme de Schmidt les cercles sont représentés par des courbes ovales (du quatrième degré). Ce diagramme est souvent utilisé pour étudier la distribution statistique des directions dans l'espace, par comptage des points dans des petites cases de même surface sur la sphère (et donc sur le diagramme de Schmidt). Il va sans dire que le comptage est possible aussi sur un diagramme de Wulf, à condition d'utiliser la projection des mêmes cases, et a fortiori si le comptage est confié à un ordinateur, qui peut tracer les lignes d'égale densité.

Représentation dans l'espace

La continuité éventuelle des surfaces de discontinuité est un caractère essentiel pour beaucoup d'applications ; les joints de sédimentation et les failles sont en général continus sur une grande étendue, mais parmi les diaclases l'étendue est plus limitée et la persistance

souvent inférieure à 100%. Comme la plupart des structures géologiques ont, au moins localement, une direction prépondérante, leur étude repose sur une série de coupes perpendiculaires, donc grossièrement parallèle, qui doivent être cohérente entre elles. Ces coupes permettent de tester la validité de l'hypothèse de continuité et donc d'interpoler avec plus ou moins de précision [35].

2.4. Comportement mécanique des roches

En analysant la variation de la contrainte σ de compression appliquée sur un échantillon de roche en fonction de la déformation ε qui en résulte, nous distinguons deux phases principales (Figure 2.15) : un comportement réversible ou élastique (linéaire ou non) et un comportement irréversible marquant, suivant le cas, l'endommagement, la plasticité ou la rupture de la roche. Dans ce qui suit, nous décrivons sommairement chacune de ces phases séparément.

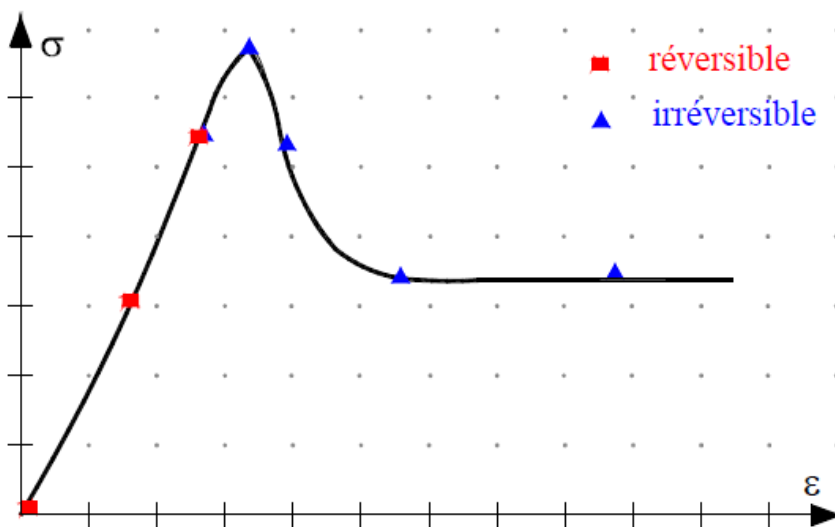


Figure 2.15: Principales phases du comportement d'une roche au cours d'un essai de compression simple.

2.4.1. Elasticité des roches

L'élasticité anisotrope générale est caractérisée par 21 paramètres indépendants. Le comportement global d'un massif fracturé est fortement anisotrope. Toutefois l'anisotropie de la matrice rocheuse est relativement faible et négligeable par rapport à celle qui est induite par la présence des fractures. Pour cette raison, nous admettons que le comportement de la roche est isotrope et caractérisé par un module d'Young E et un coefficient de Poisson ν .

Tableau 2.3 : Module d'Young et coefficient de Poisson (cité par Mestat [1993]).

Matériau	Module d'Young E (GPa)	Coefficient de Poisson ν
Granite	10 – 80	0.25 – 0.35
Basalte	20 – 70	0.25 – 0.35
Quartzite	30 – 90	0.12 – 0.15
Gneiss	10 – 60	0.25 – 0.35
Schiste	7 – 50	0.15 – 0.20
Calcaire très compact	60 – 80	0.25 – 0.35
Calcaire compact	30 – 60	0.25 – 0.35
Calcaire peu compact	10 – 30	0.25 – 0.35
Calcaire tendre	2 – 10	0.25 – 0.35
Marne	0.05 – 1	0.25 – 0.35
Grès	5 – 60	0.25 – 0.35
Molasse	1.5 – 5	0.25 – 0.35
Marbre	80 – 110	0.27 – 0.3
Gypse	2 – 6.5	0.27 – 0.3

Le tableau 2.2 donne une indication sur l'intervalle de variation de E et de ν pour différents types de roches. Dans ce tableau, nous remarquons que E varie entre des valeurs très petites (moins que 1GPa) pour des roches tendres comme le marne et le calcaire et des valeurs très grandes (plus que 100GPa) pour les roches dures comme le granite et le marbre. De même, nous précisons un coefficient de Poisson moyen qui prend une valeur de 0.25 pour les divers types de roches.

2.4.2. Résistance des roches

Comme nous l'avons indiqué au début de ce paragraphe, la phase élastique de la courbe contrainte-déformation est suivie par une phase irréversible de différente nature. Nous définissons la résistance de la roche comme étant la fin de cette phase élastique et nous proposons de la décrire par un critère portant sur les contraintes principales. Nous appelons ce critère : *critère de résistance de la roche*. Un critère très courant et souvent utilisé dans le domaine de la mécanique des sols et des roches est celui de Mohr-Coulomb. Ce critère est représenté dans le plan des contraintes tangentiels et normales (τ, σ) par deux droites symétriques par rapport à l'axe des contraintes normales (Figure 2.16). Ces deux droites sont appelées *courbes intrinsèques*. Pour une roche, nous caractérisons ce critère par deux paramètres qui sont la cohésion C et l'angle de frottement interne Φ .

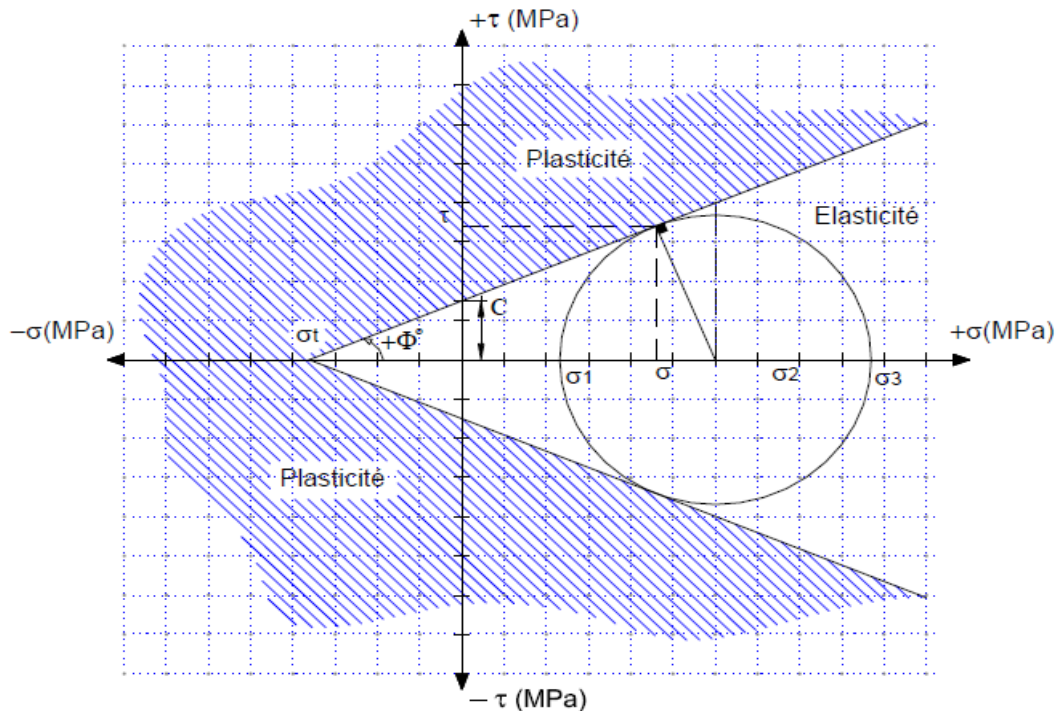


Figure 2.16 : Critère de résistance de Mohr-Coulomb représenté dans le plan (τ, σ) .

Le critère de Mohr coulomb n'est pas le seul à caractériser le comportement de la roche en phase plastique. En fait, comme nous l'avons déjà mentionné, il est l'un des plus employés en termes de modélisation et de calcul des ouvrages. Parmi d'autres critères dont la présence dans la littérature est assez répandue, on mentionne celui de Murell [1965] et Hoek-Brown [1980]. L'emploi de ce dernier ne se limite pas à la modélisation du comportement d'une roche saine mais aussi à des massifs fracturés à caractère isotrope.

Nombreux sont les auteurs qui ont mené des essais afin de calculer la cohésion et l'angle de frottement interne des roches. Nous regroupons dans le tableau 2 un recueil de valeurs intéressantes de ces paramètres qui montre une large dispersion en fonction de la nature de la roche.

Il faut noter que les tableaux 2.2 et 2.3 donnent une idée générale sur la valeur des paramètres mécaniques d'une roche. Les valeurs que nous retrouvons doivent être employées avec précaution. Le recours à des essais in-situ ou au laboratoire permettrait de préciser les vraies valeurs de ces paramètres.

Tableau 2.4 : Valeurs représentatives de la cohésion et de l'angle de frottement interne des roches intactes (d'après Kulhawy [1975], cité par Goodman [1989]).

Description	C (MPa)	Φ (°)
Berea sandstone	27.2	27.8
Bartlesvile sandstone	8.0	37.2
Pottsville sandstone	14.9	45.2
Repetto silstone	34.7	32.1
Muddy shale	38.4	14.4
Stockton shale	0.34	22.0
Edmonton betonic shale	0.3	7.5
Sioux quartzit	70.6	48.0
Texas slate ; loaded		
30° to clivlage	26.2	21.0
90° to clivelage	70.3	26.9
Georgia marble	21.2	25.3
Wolf Camp limestone	23.6	34.8
Indiana limestone	6.72	42.0
Hasmak dolomite	22.8	35.5
Chalk	0	31.5
Blaine anhydrite	43.4	29.4
Inada biote granite	55.2	47.7
Stone mountain granite	55.1	51.0
Nevada Test Site basalt	66.2	31.0
Schistose gneiss		
90° to clivlage	46.9	28.0
30° to clivelage	14.8	27.6

L'effet d'échelle est également un facteur important à ne pas négliger. A titre d'exemple, Farmer et Kemeny [1992] ont indiqué que le module de déformation sur les échantillons intacts de roches est 5 à 20 fois plus grand que les valeurs obtenues in-situ.

2.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le comportement mécanique et une description de la structure géométrique des massifs rocheux caractérisés par la présence des discontinuités. Nous avons montré la variété et la diversité des cas qui se présentent pour un massif rocheux.

Chapitre III : Les systèmes classifications géomécaniques

Introduction

Les classifications géomécaniques sont des outils essentiels dans les domaines miniers. Elles permettent de caractériser la stabilité d'un massif, d'anticiper les risques de chutes débloqués et de déterminer les mesures préventives nécessaires pour assurer la sécurité des travailleurs. Les classifications géomécaniques se basent sur une analyse approfondie des propriétés mécaniques du massif rocheux ainsi que sur l'évaluation qualitative et quantitative des facteurs qui influencent sa stabilité. Dans cette monographie, nous allons explorer en détail différentes classifications géomécaniques utilisées dans le domaine minier. Nous allons discuter leur application pratique. Cependant, l'utilisation des systèmes de classification nécessite également des informations détaillées relativement à la contrainte in situ et aux propriétés du massif, alors qu'en général elles ne sont pas disponibles au stade préliminaire du projet. Pour que ces informations soient disponibles, les systèmes de classification devraient être utilisés en conjonction avec des études spécifiques du site.

Les méthodes empiriques, basées sur une classification géotechnique du rocher.

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

3.1. Types et buts des systèmes de classification

Les classifications des massifs rocheux fracturés continuent à évoluer depuis plus d'un siècle. Leur utilisation a un intérêt considérable lors de l'étude de faisabilité et de dimensionnement préliminaire d'un projet, surtout quand les informations mécaniques, hydrologiques et l'état de contrainte in-situ du massif rocheux ne sont pas disponibles. 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...). Nous nous intéressons, dans ce qui suit, aux systèmes de classifications quantitatives, nommés également classifications géomécaniques. 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.

- Donner des recommandations de soutènement des ouvrages. D'après Singh et Goel [1999], la popularité des classifications quantitatives dérive de plusieurs facteurs :

- Elles représentent un langage commun entre les géologues, les ingénieurs, les concepteurs et les entrepreneurs.

- Moyennant ces classifications, l'observation, l'expérience et le jugement des ingénieurs sont mieux corrélés.

- Les ingénieurs préfèrent les nombres aux descriptions.

Plusieurs systèmes de classification ont été développés. En se basant sur un grand nombre de références, a rassemblé un recueil de ces systèmes les plus utilisés (Tableau 3.1). D'après les remarques qui existent dans ce tableau nous concluons que chaque système est mieux adapté à l'objectif pour lequel il a été conçu (tunnel, mines, fondations...) : aucune classification n'est universelle.

Tableau 3.1 : Principaux systèmes de classifications/caractérisation des massifs rocheux Palmström [1995].

Name of classification	Form and type*)	Main applications	Reference
The Terzaghi rock load classification system	behaviouristic form Functional type	For design of steel support in tunnels	Terzaghi, 1946
Lauuffer's stand-up time classification	Descriptive form General type	For input in tunneling design	Lauffer, 1958
The new Austrian tunneling method (NATM)	Descriptive and behaviouristic form Tunneling concept	For excavation and design in incompetent (overstressed) ground	Rabcewicz, Muller and pacher, 1958-64
Rock classification for rock mechanical purposes	Descriptive form General type	For input in rock mechanics	Patching and Coates, 1968
The unified classification of soil and rocks	Descriptive form General type	Based on particles and blocks for communication	Deer et al., 1969
The rock quality designation (RQD)	Numerical form General type	Based on core logging; use in other classification systems	Deer et al., 1967
The size- strength classification	Numerical form Functional type	Based on rock strength and block diameter; used mainly in mining	Franklin, 1975
The rock structure rating (RSR) classification	Numerical form Functional type	For design of steel support in underground excavation	Wickham et al., 1972
The rock mass rating (RMR) classification	Numerical form Functional	type For use in communication	Bieniawski, 1973
The Q classification system	Numerical form Functional type	For use in communication	Bartn et al., 1974
The typological Classification	Descriptive form General type	For general use	Matula and Hozler, 1978
The unified rock classification system	Descriptive form General type	For design of support in underground excavations	Williamson, 1980
Basic geotechnical classification (BGC)	Descriptive form General type	For general characterization, design of support I	SRM, 1981
The geological strength index (GSI)	Numerical form Functional type	For design of support in underground excavations	Hoek, 1994
The Rock mass index (Rmi)	Numerical form Functional type	For general characterization, design of support	Palmstrom, 1995

*) Definition of the following expressions:

Descriptive form : the input to the system is mainly based on descriptions

Numerical form : the input parameters are given numerical ratings according to their character

Behaviouristic form : the input is based on the behavior of the rock mass in tunnel

General type : the system is worked out to serve a general characterization

Functional type : the system is structured for a special application (for example for rock support)

3.2. Le système du classification RQD (Rock Quality Designation)

Le système du classification RQD (Rock Quality Designation) a été développé par Deere et al. (1967) [39] afin de donner une estimation quantitative de la fracturation influence le comportement de la masse rocheuse à partir de l'examen de carottes obtenues par les forages.

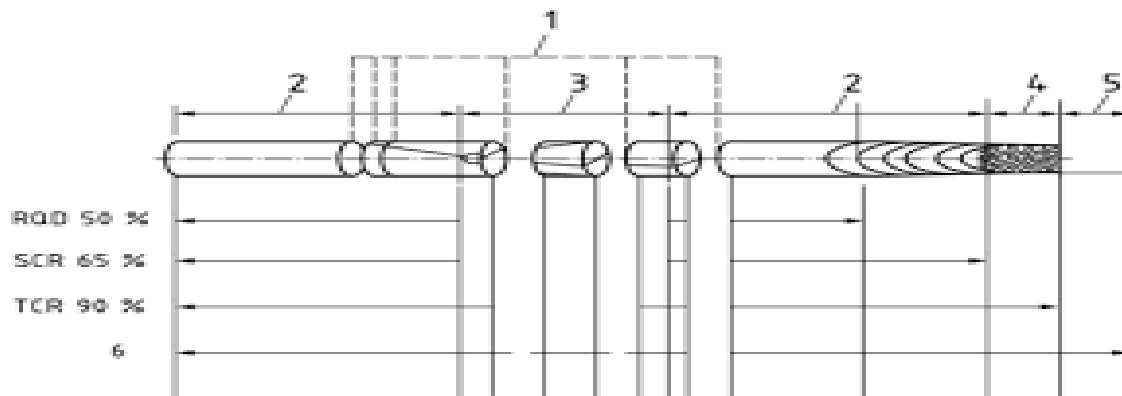


Figure 3.1 : Illustration d'une carotte obtenue par un forage (ISO 22475-1:2021).

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

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

La relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif peut être établie selon la proposition de Deere (1968) [40] et elle est présentée au tableau ci-dessous.

Tableau 3.2 : Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux [37].

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

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

Originellement conçu pour des carottes de forages géologiques de diamètre NX, la société internationale de mécanique des roches (ISRM) révisé un diamètre de carotte de diamètre d'au moins NX (\varnothing 54,7 mm) acceptable seulement pour des forages avec un équipement de forage à double-paroi. Cette restriction sur le diamètre de carotte provient du fait que l'indice vise à décrire l'état de fracturation du massif rocheux, donc seules les fractures naturelles doivent être considérées dans l'évaluation. Une grande attention doit être portée lors de l'évaluation de celui-ci afin d'exclure les brisures mécaniques induites par le forage. Deere.W (1988) [10] affirment que l'indice fonctionne adéquatement pour différentes techniques de forage ou différentes grandeurs de diamètre de forage, à moins que cette technique de forage cause une perte considérable du taux de récupération de la carotte ou cause des brisures mécaniques excessives [37].

Palmstrom (1982) [41] a suggéré que le RQD puisse être lié et déduit du nombre de discontinuités par unité de volume. Il a proposé la relation suivante, qui serait valable pour

des roches sans argile et utilisable lorsqu'aucun forage n'est disponible mais que des traces de discontinuités sont visibles en surface discontinuités par unité de volume. Il a proposé la relation suivante, qui serait valable pour des roches sans argile et utilisable lorsqu'aucun forage n'est disponible mais que des traces de discontinuités sont visibles en surface.

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

Où J_v est la densité volumique des joints, c'est-à-dire la somme du nombre de joints par m^3 , pour toutes les familles de discontinuités présentes, Ce paramètre permet de déterminer les dimensions des blocs dans un système rocheux fracturé [49].

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

3.2.1. Limitation du système RQD

La simplicité du système RQD a non seulement promu son utilisation importante comme outil, mais aussi l'apport de plusieurs critiques. Voici une série de limites trouvées dans la littérature [37] :

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

3.3. Système RMR (Rock Mass Rating)

Le RMR publié par la SACSIR (*South African Council of Scientific and Industrial Research*), Bieniawski (1973) [42] présente une classification générale du terrain rocheux quantifié sur 100 points. La Classification Géomécanique ou Rock Mass Rating (RMR) est basée sur l'expérience professionnelle de l'auteur dans des tunnels de faible profondeur pour des massifs sédimentaires.

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

Bieniawski (1974) [43] présente la première modification qui est un réarrangement des paramètres de la classification. Ainsi le système passe de 8 à 6 paramètres en plus de subir une calibration des notes attribuables. Bieniawski (1976) [43] effectue des modifications par rapport au design de support de terrain, réduit le nombre de classes de roche à 5 groupes dominants de 20 points chacun et introduit le concept de rugosité. Lors de chaque modification, il y a eu une redistribution des valeurs pour les différents paramètres. Pour cette raison, l'utilisateur du système doit mentionner quelle version est utilisée afin de bien classer le terrain. Bieniawski (1979) [44] réajuste pour la dernière fois la valeur du coefficient pour l'eau, la condition et l'espacement de joints.

Lors de la dernière modification du RMR (Bieniawski, 1989) [45], l'auteur a joint des directives de sélection du patron du support de terrain pour une combinaison de boulons mécanique, béton projeté et arche d'acier selon la qualité du massif rocheux. Ces directives sont basées pour une excavation de 10 m de largeur de type standard de fer à cheval selon des méthodes d'excavation standardisées de forage - sautage dans un massif rocheux de faibles contraintes verticales inférieures à 25 MPa (1000 m pour une roche de densité standard). Dans le domaine minier, plusieurs facteurs influencent ces directives de support de terrain dont la forme, la grandeur, profondeur de l'excavation ainsi que la technique utilisée. Beaucoup de précautions doivent être apportées lors de l'application du RMR pour le design de support dans le domaine minier.

Actuellement, la version la plus récente incorpore plus de 356 études de cas englobant plusieurs applications de différents domaines comme des tunnels, design de fondations et excavations de cavernes en roc massif pour le génie civil, ainsi que quelques exemples d'exploitations à ciel ouvert et en souterrain à de grandes profondeurs pour le domaine minier. L'auteur réussit à incorporer des graphiques continus de type "paramètre — cote" afin d'augmenter la sensibilité des paramètres quantifiables comme la résistance mécanique, le RQD et l'espacement des discontinuités [37].

Le RMR résulte de la somme de cinq notes de caractérisation (d'A1 à A5) et d'une note d'ajustement. Ces paramètres sont illustrés sur la (Figure 3.2).

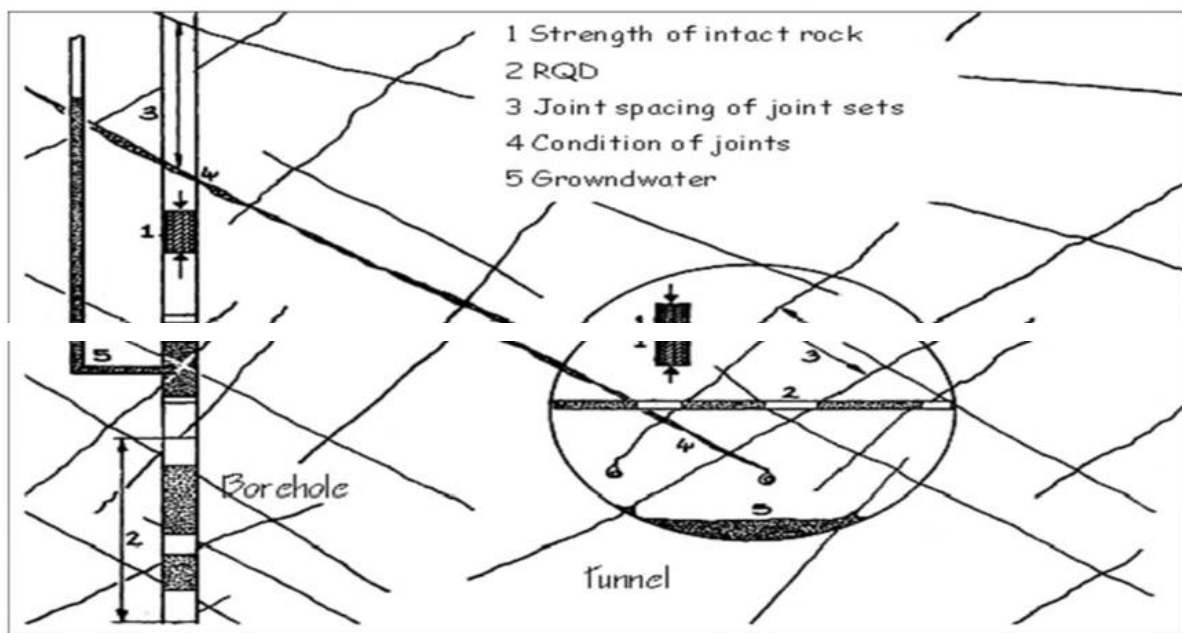


Figure 3.2 : Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR [49].

La somme de ces notes attribue une valeur comprise entre 0 et 100 au massif. Cette valeur utilise à plus de 70% la fracturation et elle accorde 15% d'influence aux propriétés de la matrice rocheuse et 15% à la présence d'eau [38].

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

- A1 (Strength of intact rock material) : la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse est obtenue, soit par procédure d'écrasement d'un échantillon, soit par procédure de chargement ponctuel (note : de 0 à 15).
- A2 (Rock Quality Designation RQD) : il caractérise la qualité des carottes de sondage en calculant le rapport entre la longueur cumulée des carottes supérieures à dix centimètres et la longueur totale considérée (note : de 3 à 20).
- A3 (Spacing of discontinuities) : dans le cas de plusieurs familles de fractures le minimum des notes attribuées à l'espacement des fractures est considéré

(Note : de 5 à 20).

- A4 (Conditions of discontinuities) : cet indice caractérise l’extension, l’ouverture, la rugosité, le matériau de remplissage et l’altération des épontes des discontinuités (Note : de 0 à 30).
- A5 (Groundwater conditions) : Il est en rapport avec les conditions hydrogéologiques et consiste à réaliser des mesures de flux d’eau ou de pressions interstitielles des joints (note : de 0 à 15).
- B (Adjustement for joint orientation) : c’est un facteur correctif qui est en rapport avec l’effet de l’azimut et du pendage des familles de discontinuités sur la stabilité de l’ouvrage (note : de -12 à 12 pour les tunnels, de -25 à 0 pour les fondations et de -60 à 0 pour les talus).

La somme des cinq premiers indices caractérise le RMR de base. Quant aux travaux souterrains, il faut ajouter l’effet du facteur correctif (Bieniawski 1989) [45].

Le RMR₈₉ s’écrit alors :

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

Chacun des paramètres précédents aura une note, la somme des notes, après avoir été ajustée par une note relative à l’orientation (Tableau 3.2), nous donne une appréciation générale de la qualité du rocher (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Classification RMR (Bieniawski).

PARAMETRES		COEFFICIENTS							
1	Résistance De la Roche (MPa)	Indice Franklin (MPa)	>10	4-10	2-4	1-4	Indice Franklin Non utilisable (MPa)		
	Résistance à la compression (MPa)		>250	100-250	50-100	25-50	5-2	1-5	<1
	Note		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D.		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Note		20	17	13	8	3		
3	Espacement des Joints		>2m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2m	<0,06 m		
	Note		20	15	10	8	5		

4	Nature des joints		Surfaces très rugueuses non continue Eponte en contact Eponte non Altérées	Surfaces Légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte non Altérées	Surfaces Légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte Altérées	Surfaces lustrées ou Remplissage <5 mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	Remplissage mou >5 mm ou joints ouverts >5 mm joints continus
	Note		30	25	20	10	0
5	Venues d'eau	Débit sur 10 m	Aucune venue d'eau	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min
		Pression d'eau contrainte principale	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5
	Hydro-Géologie	Complètement sec	Humide	Suintements (eau Interstitielle)	Pression d'eau modérée	Problèmes sérieux de venues d'eau	
	Note		15	10	7	4	0

Tableau 3.4 : Classe de rocher suivant la classification de Z. BIENIAWSKI

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

3.3.1. Limitations du système RMR

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

- Le paramètre de l'orientation des discontinuités (B) est ignoré. Le système conservé redevient le $RMR_{de\ base}$. Cette correction est apportée principalement pour ignorer les conditions environnementales résultant en une classification dépendante du massif rocheux uniquement.
- Les contraintes sont ignorées comme paramètre du système RMR. Bieniawski, 1989 estime le système RMR adéquat pour un projet civil jusqu'à une contrainte verticale de 25 MPa. Souvent dans le domaine minier, les mines souterraines exploitent à des niveaux de contraintes supérieurs.
- Cette classification ne prend pas en considération l'état de contrainte in-situ ni la rugosité des fractures et l'angle de frottement du matériau de remplissage ; les roches gonflantes n'y sont pas non plus traitées.
- L'application de cette classification est limitée aux cas de massifs dont la matrice a une bonne résistance et dont le comportement est régi par les discontinuités.

Néanmoins, le RMR reste un outil puissant, lorsque bien utilisé. Ce système a réussi à identifier des paramètres géologiques quasi universels permettant d'enregistrer rapidement et simplement toute expérience d'excavations dans la masse rocheuse. De la sorte, l'application du système de classification RMR s'étend avec succès à la conception de fondation, de stabilité de talus, l'évaluation du décapage, ainsi que de nombreuses applications minières [36].

3.4. Système Q

Développée par le Norvégien Geotechnical Institute (NGI), cette classification a été établie pour prévoir le soutènement des excavations exécutées dans des terrains à contrainte horizontale élevée (Barton et al.1974) [46]. Elle est caractérisée par un indice de qualité Q variant entre 0.001 pour un massif très mauvais et 1000 pour un massif très bon. Dans la pratique, cet indice est réduit entre 0.005 et 50.

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

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

- RQD (Rock Quality Designation) caractérise la qualité des carottes de sondage.
- Jn (Joint set number) représente le nombre de familles de discontinuités.

Tableau 3.5 : Paramètre de J_n (nombre de famille de discontinuités).

Nombre de famille de diaclases	J_n
Massif, peu ou pas de diaclases	0,5-1
Une famille de diaclases	2
Une famille et diaclases aléatoires	3
Deux familles de diaclases	4
Deux familles et diaclases aléatoires	6
Trois familles de diaclases	9
Trois familles et diaclases aléatoires	12
Quatre familles et plus, diaclases aléatoires très nombreuses	15
Roche concassée, semblable à un sol	20
Note : (f) Pour une intersection, utilisez 3 x J_n (g) Pour un portail, utilisez 2 x J_n	

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

Tableau 3.6 : Paramètre J_r (paramètre de rugosité des joints)

(a) Épontes en contact (b) Épontes en contact après cisaillement de moins de 10 cm	J_r	(c) Épontes hors contact après cisaillement	J_r
Joints discontinus Joints ondulés, rugueux ou Irréguliers Joints ondulés, lisses Joints ondulés, striés (lisses, luisants, Polis) Joints plans, rugueux ou irréguliers Joints plans, lisses Joints plans, striés	4 3 2 1,5 1,5 1,0 0,5	Zone argileuse d'épaisseur suffisante Irréguliers pour empêcher le contact Zone sableuse, graveleuse ou broyée d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact	1,0
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) $J_r = 0,5$ si les joints plans et striés comportent des linéations orientées de telle sorte qu'elles peuvent amorcer une rupture.	

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

Tableau 3.7 : Paramètre Ja (paramètre d'altération des joints).

	Caractère du joint		Conditions	Ja
	Épentes en contact	Joints propres	Joint serré, recimenté	Remplissage de quartz, épidote, etc.
Épentes non altérées			Pas d'enduit.	1
Épentes légèrement altérées			Enduit minéral non radoucissant, grains sans argile	2
Enduits ou remplissage		Enduits à frottement	Sable, silt, calcite, etc. (non radoucissant)	3
		Enduits à cohésion, épaisseur < 1-2 mm	Argile, chlorite, talc, etc. (radoucissant)	4
Épentes en contact	Remplissage	Type	Ja	
	Matériaux frottant	Sable, silt, calcite, etc.	4	
	Remplissage fortement sur-consolidé épaisseur < 5 mm	Remplissage compact d'argile, chlorite, talc...etc.	6	
	Remplissage légèrement sur consolidé, épaisseur < 5 mm	Sur-consolidation légère ou moyenne d'argile, de chlorite, talc...etc.	8	

	Remplissage d'argiles gonflantes, Épaisseur < 5 mm	Matériaux gonflants (ex montmorillonite)	8-12
Épentes séparées	Condition d'épente	Ja	
	Zones de roche concassée	6	
	Roche et argile	8-12	
	Zones silteuses, sableuses, Avec une faible fraction d'argile	5	
	Zones ou bandes épaisses d'argile	10-13	

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

Tableau 3.8 : Paramètre Jw (paramètre hydraulique).

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

Note :

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

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

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

Tableau 3.9 : Paramètre de SRF (paramètre de réduction relatif aux contraintes), (Barton et al, 1974).

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

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

Le deuxième quotient (J_r / J_a) concerne la qualité mécanique des contacts entre blocs, il représente la rugosité et les caractéristiques de frottement des parois de joint ou des matériaux de remplissage (Singh et Géol.1999) [47]. Ce quotient est pondéré en faveur de joints rugueux et inchangés en contact direct. Des valeurs élevées de ce quotient représentent une meilleure « qualité mécanique » de la masse rocheuse.

Le troisième quotient (J_w / SRF) est un facteur empirique représentant la contrainte active intégrant les pressions et les écoulements de l'eau, la présence de zones de cisaillement et de roches argileuses, les roches comprimées et gonflées et l'état de contrainte in situ. Selon Singh et Géol. (1999) [47], la charge de relâchement dans le cas d'une excavation à travers des zones de cisaillement et de la roche argileuse) la contrainte de la roche dans la roche compétente et 3, la compression des charges dans les roches en plastique incompétentes. Le quotient augmente avec la diminution de la pression de l'eau et des rapports de contraintes in situ favorables.

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

Le tableau 11. Récapitule les plages de variations des différents paramètres et permet d'apprécier leur poids respectif au sein de la valorisation globale de l'indice Q. [38]

Tableau 3.10 : Plages de variation des paramètres pris en compte pour le calcul de f indice [38].

PARAMETRES	CONDITIONS LES PLUS DEFAVORABLES	CONDITIONS LES PLUS FAVORABLES	PLAGES DE VARIATION (rapport maximal)
RQD J _n	10 20	100 0,5	10 40
J _r J _a	0,5 20	4 0,75	8 27
J _w SRF	0,05 20 ⁽⁶⁾	1 0,5	20 40

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

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

L'indice Q dépend donc fortement de données non intrinsèques du matériau rocheux et notamment de l'état de contrainte auquel est soumis le massif. La formulation de Q présente cependant le désavantage de ne pas faire apparaître directement de paramètre caractéristique de la résistance mécanique du matériau rocheux [38].

Bieniawski [1976] [43] a été le premier à proposer des corrélations empiriques entre le RMR et le Q système :

$$RMR = 9 \log Q' + 44$$

Cette expression a été modifiée par plusieurs autres chercheurs. Toutefois ces corrélations ne sont pas très fiables et doivent être utilisées avec beaucoup de précaution, le RMR et le Q système ne prennent pas en considération les mêmes paramètres et donc, elles ne sont pas équivalentes [49].

Outre que les recommandations sur le besoin de support de terrain, le Q-system permet d'évaluer qualitativement la masse rocheuse selon neuf catégories de qualité. Le tableau (12) présente cette qualification :

Tableau 3.11 : Classification de massif en fonction de la valeur Q [37].

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

4.4.1. Limitations du système Q

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

Dans cette classification, l'évaluation de Q dépend de l'état des contraintes dans le massif et des paramètres non intrinsèques de la matrice rocheuse. La contribution directe de la résistance mécanique de la matrice rocheuse est absente. En outre l'orientation des joints n'apparaît pas dans cette classification [37].

3.5. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)

Introduit par Romana en 1985[48], 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 [24] :

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

F1, F2 et F3 : facteurs d'ajustement.

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

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

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

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

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

β_j est le pendage des joints

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

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

- Les talus naturels sont plus stables à cause de l'érosion à long terme et des protections naturelles telle la végétation.

- La roche prédécoupée augmente également la stabilité.

- L'abattage à l'explosif augmente, ne change pas ou diminue la stabilité du talus selon qu'il est léger, normal ou déficient (trop d'explosifs par exemple).

- L'excavation mécanique par arrachage dans les roches très fracturée n'augmente, ni ne diminue la stabilité du talus.

Tableau 3.12 : Notes des paramètres du SMR (Romana, 1985).

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 $ \beta_j =$		$F1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s)^2$				
		<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°
La valeur	Rupture plane	0,15	0,4	0,7	0,85	1
	Basculement	1				
Relation		$F2 = \overline{\text{tg}^2 \beta_j}$				
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	Presplitting	Smooth blasting	Explosif ou mécanique	Déficient blasting
Valeur de F4		15	10	8	0	-8

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

La description des classes SMR figure dans Tableau 3.13.

Tableau 3.13 : Description des classes SMR(Romana, 1985).

Description des classes SMR										
Classe	V _a	V _b	IV _a	IV _b	III _a	III _b	II _a	II _b	I _a	I _b
Description	Très mauvais		Mauvais		Moyen		Bien		Très bien	
Stabilité	Complètement instable		Instable		Partiellement stable		Stable		Complètement stable	
Rupture	Grand plan		Plan ou grand dièdre		Quelques joints ou beaucoup de dièdres		Quelques blocs		Aucune	
Support	Réexcavation		Importante corrective		Systématique		Occasionnel		Aucun	

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

3.6. Commentaires sur les systèmes de classification

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

Ces méthodes sont facilement utilisées au stade de l'avant-projet. Cependant elles présentent certaines limites que nous résumons ci-dessous [39] :

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

Dans le domaine minier où le dimensionnement des chantiers et le temps de soutien nécessaire jouent un rôle important, les systèmes de classification classiques se sont avérés Inaptes principalement dû à leur grande imprécision pour la description du massif rocheux et pour leurs suggestions en support de terrain [43].

3.7. Conclusion

Les classifications géomécaniques des massifs rocheux sont des outils essentiels pour l'analyse et la compréhension du comportement mécanique de ces formations géologiques. Elles permettent d'évaluer les propriétés physiques et mécaniques des roches ainsi que leur répartition spatiale dans le massif, en vue de prévoir leur réponse aux sollicitations externes telles que les charges sismiques ou les activités minières. Ces classifications se basent sur différents critères tels que la lithologie, la texture, l'état de fracturation ou encore la présence éventuelle de discontinuités structurales. Elles ont été développées au fil du temps par plusieurs chercheurs et ingénieurs spécialisés en génie minier, civil ou pétrolier.

**Chapitre IV : Caractérisation et
classification géomécanique de massif
rocheux de Kef-Essnoun**

Introduction

La classification 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. 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. 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.

4.1. Prélèvements et mesures in-situ

4.1.1. Essais au laboratoire

4.1.1.1. Essais de compression uniaxiale

Echantillonnage

Afin de décrire le comportement physico-mécanique des formations géologiques constituant le massif rocheux de la mine de Djbel El Onk (carrière de Kef Essnoun), on a pris l'initiative de prélever un nombre suffisant d'échantillons représentatifs pour faire la tâche d'essais au laboratoire dont on a concentré notre travail sur des échantillons ayant un volume considérable où on peut extraire des éprouvettes convenables aux normes internationales. Un exemple de prélèvement est représenté dans la figure suivante :



Figure 4.1 : Echantillons représentatifs.

Préparation de la forme géométrique d'échantillons

Afin de préparer des échantillons aux essais mécaniques (essais de compression uniaxiale), on a utilisé une scie à table (Figure 4.2) pour avoir des éprouvettes de forme régulière adéquate aux normes internationales avec des dimensions de 5cm*5cm*10cm. (Voire figure suivante- Figure 4.3)



Figure 4.2 : Scie à table.



Figure 4.3 : Echantillons préparé.

Ecrasement des échantillons

Pour extraire la valeur de la résistance à la compression uniaxiale, une série d'essais a été effectué au niveau de laboratoire des mines sur les échantillons représentatifs de chaque faciès (Voire figure suivante).



Figure 4.4 : Écrasement des échantillons au laboratoire par presse hydraulique.

Tableaux 4.1 : les propriétés mécanique des différentes roches.

Roche	Calcaire-yprésien	phosphate	marnes	Calcaire Danio-montien
La résistance à la compression uniaxiale (Mpa)	27	6	6.78	26.8

4.1.1.2. La masse volumique

Essais d'identification Il s'agit d'essais simples, rapides, couramment pratiqués, et qui donnent, alliés à la description pétrographique, une image assez précise du matériau. La masse volumique réelle est la masse volumique de la roche sèche, quotient de la masse de l'échantillon par son volume (enveloppe extérieure, incluant les pores intérieurs). Elle s'exprime en kg/m^3 ou en t/m^3 . Il ne faut pas la confondre avec la masse volumique absolue, qui est la masse volumique de la matière minérale. De nombreux essais permettent de caractériser la matrice rocheuse.

- Poids volumique totale = poids totale / volume total

*Afin de faire les essais de la masse volumique de tous les échantillons au laboratoire on obtient les résultats suivants :

Tableaux 4.2 : les propriétés physiques des différentes roches.

Roche	Calcaire yprésien	Phosphate	Marne	Calcaire Danien-montien
Masse volumique (g/cm^3)	1.87	1.63	1.21	1.43

4.1.2. Prise géométriques des discontinuités

La compréhension de la répartition spatiale des discontinuités dans un massif rocheux est une préoccupation majeure d'un ingénieur des mines. L'identification géométrique du réseau des discontinuités donne une prévision sur la qualité du massif rocheux ainsi que le bon sens des travaux d'exploitation où les ouvrages miniers favorisent la stabilité. Pour cette fin, nous avons effectué un bilan structural qui inclut une liste des différentes mesures exécutées au sein de la carrière de Kef -Essnoun. Afin de réaliser ce travail on a pris une

boussole de géologue qui fait l'objet d'une extraction géométrique des discontinuités. La prise d'espacement entre les joints successifs a été effectuée pour avoir la densité linéaire des discontinuités.

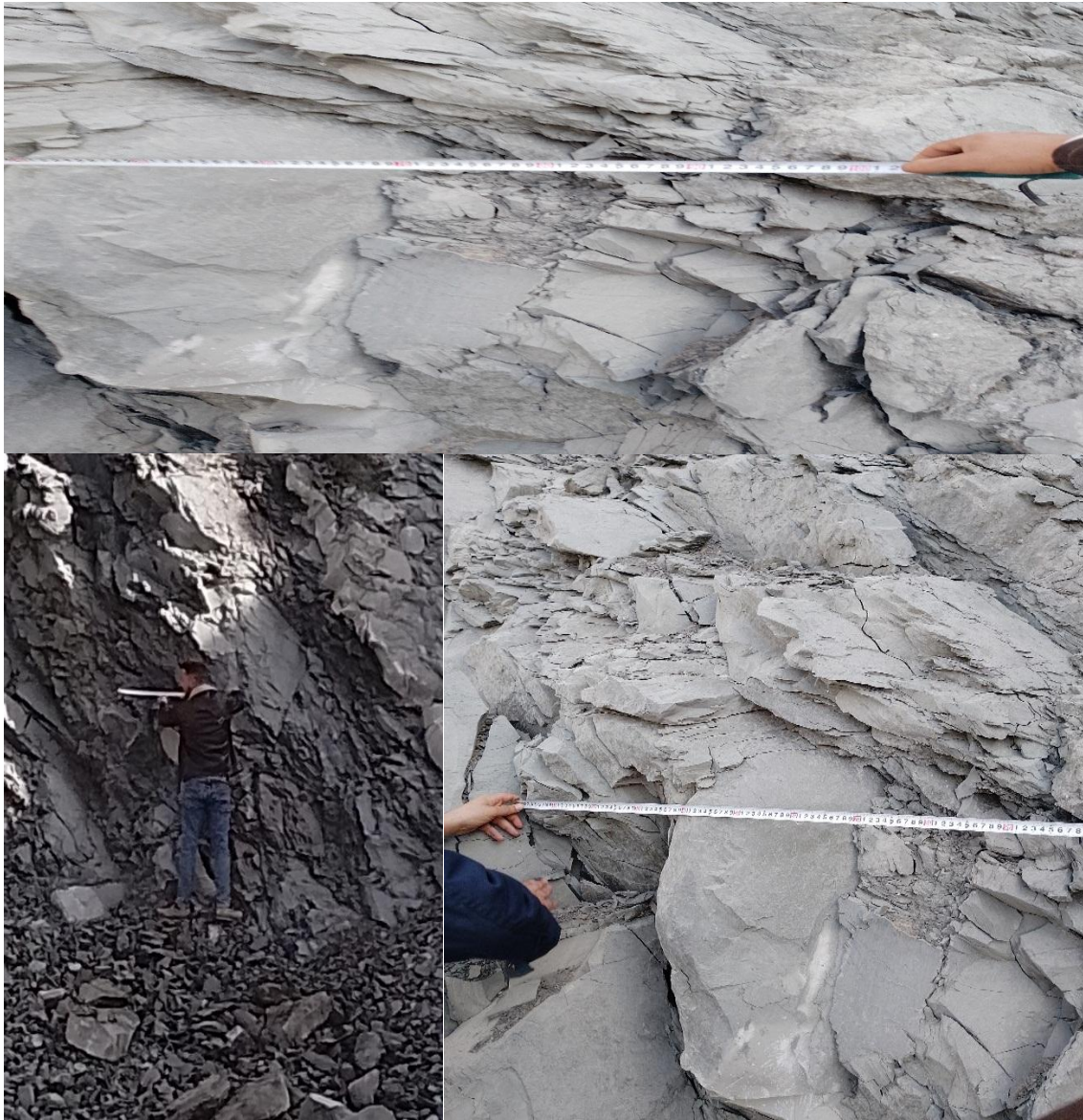


Figure 4.5 : Mesures d'espacement entre discontinuités in-situ.



Figure 4.6 : Mesures d'orientation et de pendage des discontinuités in-situ.

4.1.2.1. Projection stéréographique

La projection stéréographique est une méthode permettant de représenter une sphère privée d'un point sur un plan. On convient souvent que le point dont on prive la sphère sera un des pôles de celle-ci ; le plan de projection peut être celui qui sépare les deux hémisphères, nord et sud, de la sphère, qu'on appelle plan équatorial. On peut

également faire une projection stéréographique sur n'importe quel plan parallèle au plan équatorial pourvu qu'il ne contienne pas le point dont on a privé la sphère.

Afin de regrouper en familles les différentes discontinuités rencontrées au sein du massif rocheux de Kef –Essoun. On a projeté graphiquement les mesures effectuées à l'aide du code numérique Dips 7.0 en basant sur les paramètres géométriques (pendage, sens de pendage) des joints dont les résultats obtenus pour chaque faciès sont représentés comme suit :

Tableaux 4.3 : les paramètres géométriques (pendage, sens de pendage) des joints.

Facies de Calcaire Yprésien		Facies de Phosphate		Facies de Marne		Facies de Calcaire Danien-montien	
Pendage (°)	Sens de pendage (°)	Pendage (°)	Sens de pendage (°)	Pendage (°)	Sens de pendage (°)	Pendage (°)	Sens de pendage (°)
24	N160	10	N174	64	N174	23	N167
17	N175	09	N172	55	N170	33	N155
22	N172	10	N168	50	N166	72	N162
20	N175	08	N175	58	N169	69	N168
24	N166	05	N172	62	N150	74	N165
22	N163	07	N171	65	N150	67	N155
77	N352	06	N173	75	N150	65	N42
73	N349	10	N173	65	N180	72	N63
79	N348	89	N104	64	N181	67	N76
74	N350	71	N112	54	N154	68	N67
82	N314	80	N108	56	N175	57	N61
71	N315			27	N36	45	N65
64	N331			30	N82	51	N68
70	N323			27	N45	59	N80
				29	N18	50	N70
				25	N20		
				27	N41		
				27	N300		
				20	N45		
				31	N52		

La représentation graphique des mesures est montrée dans les figures suivantes :

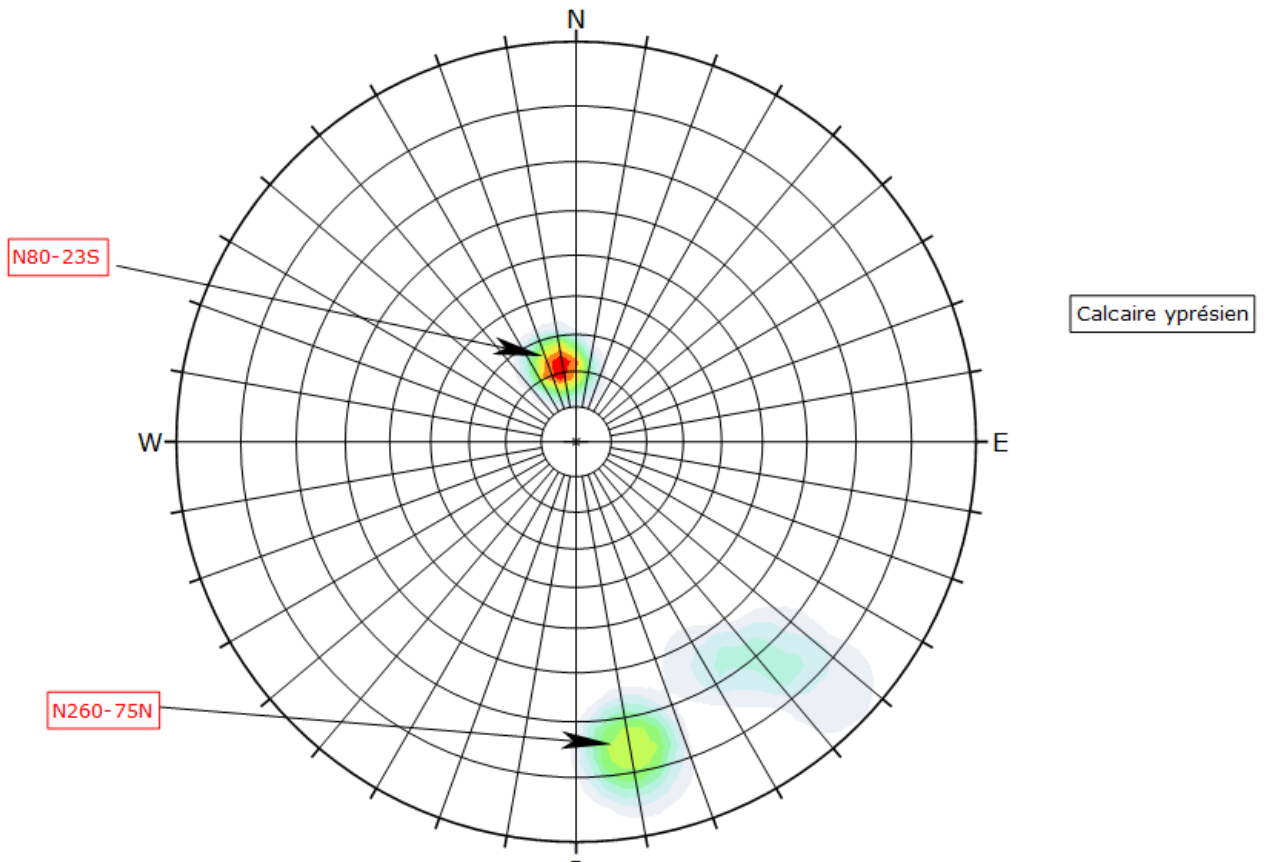


Figure 4.7 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 01 calcaire-yprésien.

La projection stéréographique montre l'existence de 2 familles directionnelles de discontinuités.

- La première famille est orientée vers N 80 _ pendage 23°S.
- La deuxième famille est orientée vers N 260 _ pendage 75°N.

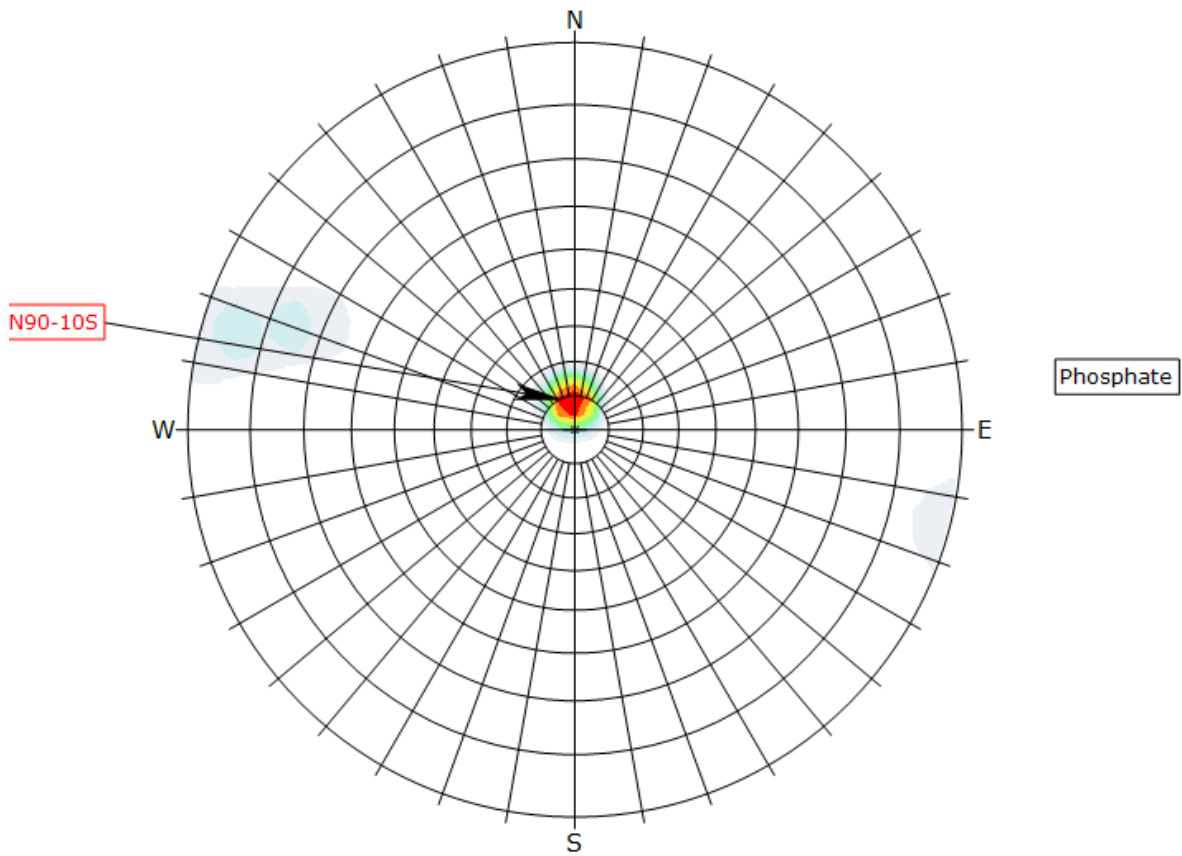


Figure 4.8 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 02 phosphate

La projection stéréographique montre l'existence d'une seule famille directionnelle de discontinuités avec des discontinuités diffuses.

- La famille est orientée vers N 90 _ pendage 10°S.

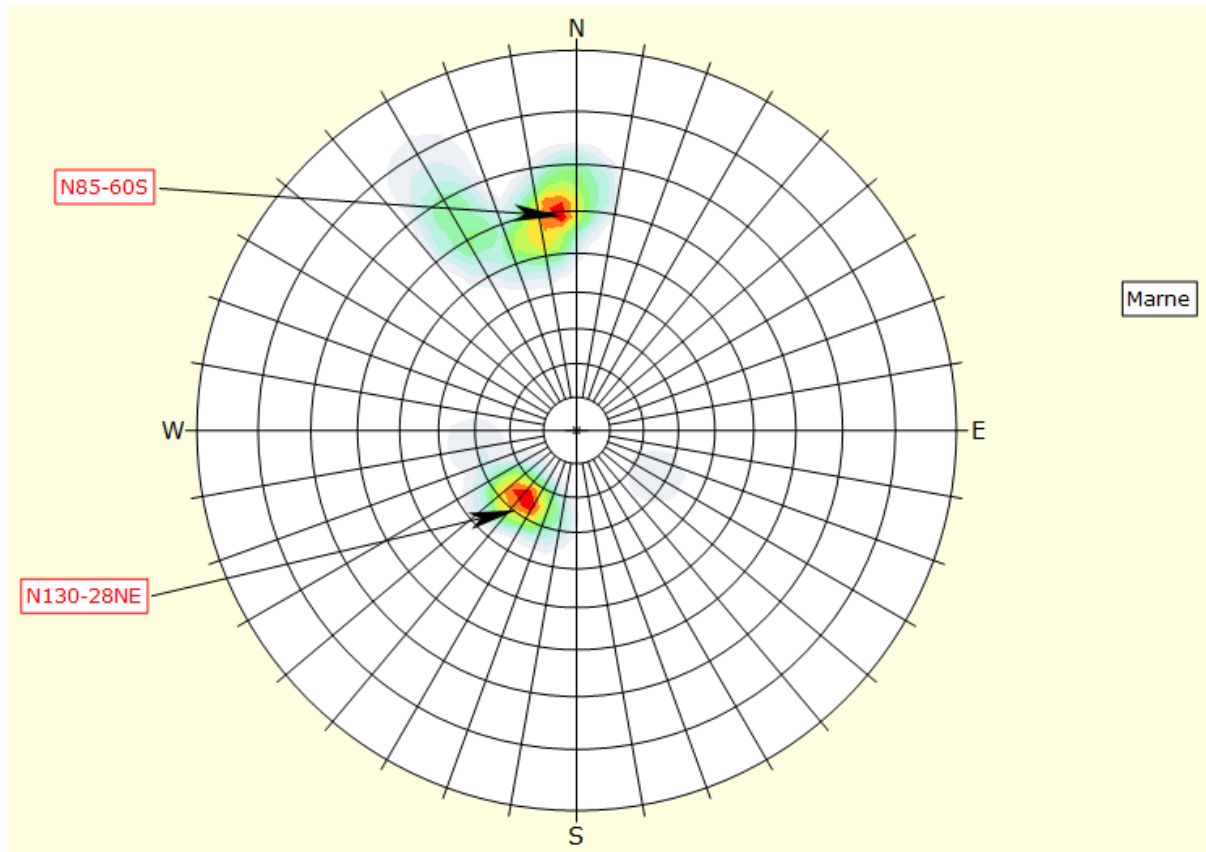


Figure 4.9 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 03 marne.

La projection stéréographique montre l'existence de 2 familles directionnelles de discontinuités avec des discontinuités diffuses.

- La première famille est orientée vers N 85 _ pendage 60°S.
- La deuxième famille est orientée vers N 130 _ pendage 28°NE.

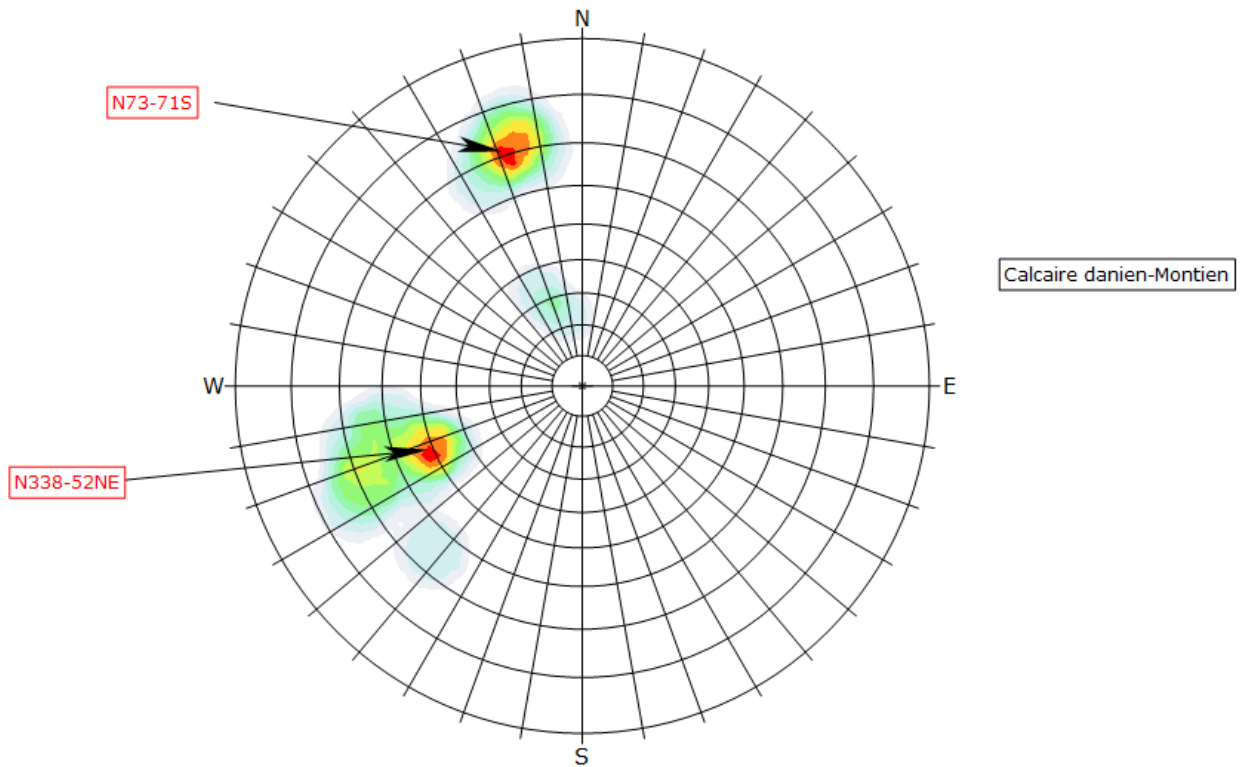


Figure 4.10: Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 04 calcaire danien-montien.

La projection stéréographique montre l'existence de 2 familles directionnelles de discontinuités avec des discontinuités diffuses.

- La première famille est orientée vers N 73 _ pendage 71°S.
- La deuxième famille est orientée vers N 338 _ pendage 52°NE.

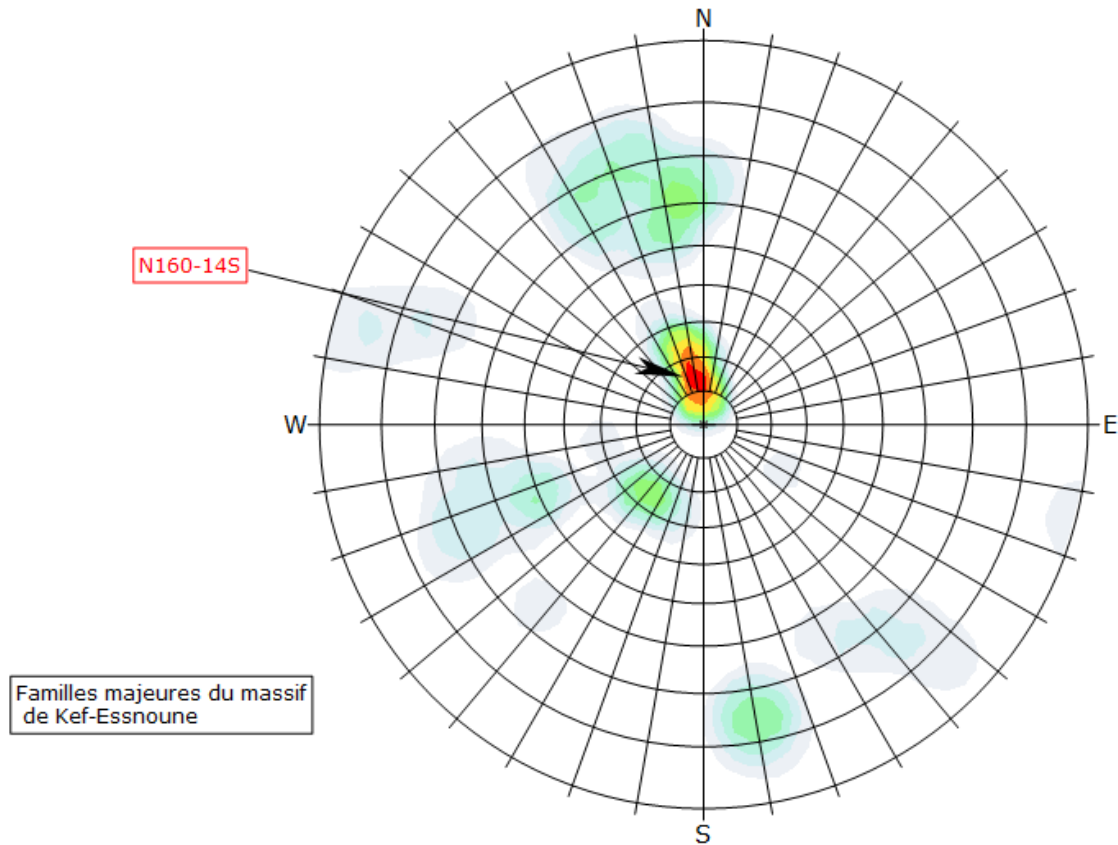


Figure 4.11: Diagramme des familles majeures de la discontinuité dans le massif de Kef-Essnoun.

La projection stéréographique montre l'existence d'une seule famille majeure de discontinuités avec des discontinuités diffuses.

- La famille est orientée vers N 160 _ pendage 14°S

4.2. Classification géomécanique de massif de Kef Essnoun

4.2.1. Classification RQD (Rock Quality Designation)

Afin de classer le massif rocheux de Kef-Essnoun par la méthode RQD, une analyse a été effectuée à la base de différentes carottes extraites dont on a recensé la distribution géométrique des pièces des passes carottées.



Figure 4.12 : Sondages carottés .

Tableaux 4.4 : Valeur RQD des différents faciès (d'après SOMIFOS).

Type de roche	RQD dans (%)	Qualité de la roche
Calcaire (Danien-Montien)	84	Bonne
Marne	45	Médiocre
Phosphate	73	Moyenne
Calcaire-yprésien	70	Moyenne

D'après les résultats obtenus par l'application de la méthode RQD sur les conditions de la mine de Kef-Essnoun, on constate que ce massif se compose par des faciès de : bonne qualité (Calcaire danien-montien), qualité moyenne (Phosphate, Calcaire-yprésien) et qualité médiocre (Marne) avec une note de RQD varie entre 45 et 84.

4.2.2. Classification RMR du massif rocheux Kef-Essnoun

L'indice RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski (1989) permet de connaître la situation de stabilité d'un massif rocheux. Elle a été utilisée parce que c'est la méthode de choix dans l'exploitation à ciel ouvert, en raison de sa simplicité et de son économie et parce que c'est celle qui s'adapte le mieux à la réalité du gisement. Dans le cas particulier de Castellans, l'indice RMR a été déterminé pour chaque domaine structurel, défini par les fronts d'exploitation, à partir des paramètres suivants: RQD; résistance à la compression simple; séparation, ouverture, persistance, rugosité, remplissage et altération des discontinuités; présence d'eau et effet relatif par rapport à l'axe de l'ouvrage

Tableaux 4.5 : Valeur du RMR de facies du Calcaire yprésien.

Faciès	Calcaire yprésien					
Paramètres	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de base
Mesure	27	70	Surface légèrement rugueuse épaisseur > 1m m Eponte non altérées	0.6 - 02	Complètement sec	67
Valeur extrême de la classification	25-50	50-75				
Note	4	13	25	10	15	

Tableaux 4.6 : Valeur du RMR de faciès du phosphate.

Faciès	Phosphate					
	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacements des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de base
Mesure	6	73	Surface légèrement rugueuse épaisseur > 1 mm Eponte non altérées	0.6 - 02	Complètement sec	64
Valeur extrême de la classification	3-10	50-75				
Note	1	13	25	10	15	

Tableaux 4.7 : Valeur du RMR de faciès de marne.

Faciès	Marne					
	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de base
Mesure	6.78	45	Discontinuités lisses (SLK) ou remplissage < 5 mm d'épaisseurs ou joints ouverts 1 - 5 mm et continu	< 0.06	Complètement sec	39
Valeur extrême de la classification	3-10	25-50				
Note	1	8	10	5	15	

Tableaux 4.8 : Valeur du RMR de faciès de la Calcaire Danien – Montien.

Faciès	Calcaire Danio-montien					
	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de base
Mesure	26.8	84	Surface légèrement rugueuse épaisseur > 1m m Eponte non altérées	0.6 - 02	Complètement sec	71
Valeur extrême de la classificatin	25-50	75-90				
Note	4	17	25	10	15	

Tableaux 4.9 : description de la qualité su massif de Kef-Essnoun.

Faciès	RMR _{de base}	Classe du massif rocheux	Description du massif rocheux
calcaire Yprésien	67	II	Bon rocher
Phosphate	64	II	Bon rocher
Marne	39	IV	Rocher médiocre
Calcaire danio-montien	71	II	Bon rocher

D'après les résultats du RMR_{de base}, on déduit que les faciès des calcaires Yprésien, des phosphates et des calcaires Danien-Montien ont une bonne qualité et résistent mieux. En revanche, le faciès des marnes est de qualité médiocre.

4.2.3. Classification SMR du massif rocheux Kef-Essnoun

La classification SMR établie à base des observations in-situ, on déduit que la qualité du massif varie en fonction des différents faciès (Tableaux 4.9).

Tableaux 4.10 : Orientation des joints et le talus.

	Calcaire Yprésien	Phosphate	Marne	calcaire Danien-Montien
Direction du pendage des joints (α_j) (°)	170	180	40	68
Pendage du joint (β_j) (°)	23	10	28	52
Direction du pendage du talus (α_s) (°)	270	270	270	270
Pendage du talus (β_s) (°)	75	75	75	75

Tableaux 4.11 : Valeur du SMR des différentes formations géologiques.

	Calcaire Yprésien	Phosphate	Marne	Calcaire Danien Montien
RMR_{de base}	67	64	39	71
F₁	0.15	0.15	0.15	0.15
F₂	0.4	0.15	0.4	1
F₃	-60	-60	-60	-60
F₄	-8	-8	0	0
SMR	55.4	54.65	35.4	62
Classe	III	III	IV	II
Description	Moyen	Moyen	Mauvais	Bien
Stabilité	Partiellement stable	Partiellement stable	Instable	Stable
Description	Description : rupture possible; Stabilité : stable; Rupture : rupture possible au niveau de la couche de marne ;			

4.3. Conclusion

La connaissance détaillée du massif et sa caractérisation et classification géomécanique empirique, RQD, RMR, SMR permet d'évaluer la qualité du massif qui est varié en fonctions de différentes formations géologiques de bonne pour calcaire-yprésien, phosphate, calcaire Danien- montien et de moyenne pour les marnes.

D'après les résultats de classification SMR on constate que interface marneuse constitue la cause probable d'une instabilité du massif, en raison de sa mauvaise qualité. Les familles de discontinuités présentes dans le massif rocheux influencent son comportement et sa qualité globale. En général, les classifications géomécanique avec les meilleurs résultats d'application sont Bieniawski (RMR de base), Romana (SMR) basé sur l'état de fracturation et la qualité des discontinuités. Le massif rocheux de la carrière "Kef Essnoun" est classé en qualité moyenne.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les classifications géomécaniques des massifs rocheux sont essentielles pour évaluer la stabilité et la résistance des structures souterraines ou en surface. Elles permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques du terrain et d'adapter ainsi les méthodes de déconstruction aux contraintes rencontrées sur le site.

La projection stéréographique montre l'existence de 2 familles directionnelles de discontinuités dans la zone 01 calcaire-yprésien, et l'existence d'une seule famille directionnelle de discontinuités avec des discontinuités diffuses dans la zone 02 phosphate, de 2 familles directionnelles de discontinuités avec des discontinuités diffuses dans la zone 03 marne ; Et l'existence de 2 familles directionnelles de discontinuités avec des discontinuités diffuses dans la zone 04 calcaire danien-montien.

La projection stéréographique montre l'existence d'une seule famille majeure de discontinuités avec des discontinuités diffuses dans le massif de Kef-Essnoun.

Afin d'assurer plus de stabilité, nous suggérons aux exécutants de plan d'exploitations de faire le suivant :

- La continuité d'extraction de la couche marneuse progressivement avec l'opération d'extraction de phosphate et l'enlèvement de stérile.
- Diminuer la consommation spécifique d'explosif dans la zone d'affleurement.

La connaissance détaillée du massif rocheux de la carrière "Kef Essnoun" et sa classification géomécanique, établies à base de l'état de fracturation et la qualité des discontinuités et les essais dans laboratoire menés par nous-même et l'entreprise, que ce soit RQD, RMR et SMR ; Les résultats montrent que la qualité du massif varie de bonne pour les faciès de Calcaire Danien-Montien, Phosphate, Calcaire yprésien et de moyenne à pauvre pour les Marne.

Bibliographie

Bibliographie

- [01] CIELENSKY S, et all (1988) : Travaux de prospection et d'évaluation des phosphates dans la région de Bir El Ater. Rapport interne, EREM.
- [02] PRIAN, et all,1993. Ph. Etude de développement du gisement de phosphate de Djebel Onk (Algérie). Rapport d'expertise géologique, BRGM France, vol.
- [03] SO.NA.R.E.M (1978) : Rapport sur les travaux de prospection et d'évaluation des phosphates dans le district minier du Djebel Onk, Algérie.
- [04] JOLEAU L. (1908) - Sur les faunes de l'Eocène inférieur et moyen du sud Algérien et Tunisien. bull.soc. géol. France.
- [05] DUSSERT M D. (1924).les gisements Algériens de phosphate de chaux, Annales des mines, Dunod ,Paris.
- [06] LAFFITTE, R.1939. Etude géologique de l'Aurès. Service de la carte géologique de l'Algérie,
- [07] CAYEUX, L.1939. Les phosphates de chaux sédimentaires de France. Imprimerie nationale,
- [08] VISSE, L, 1952. Genèse des gîtes phosphatés du Sud-Est algéro-tunisien. XIX^{ème} Congr. Intern. Alger, 1ere serie, 1952.
- [09] VOGT P. et all. (1963) - Rapport de fin de mission phosphate dans le Constantinois et la région de Boghari. Rap BRGM, Alger.
- [10] RANCHIN, G.1963. Les phosphates de chaux sédimentaire de la région du Djebel Onk (Algérie). SERM Paris.
- [11] EREM. (1985 – 1987) - Travaux de prospection et d'évaluation des phosphates dans de Bir El Ater. Rapport EREM, 2 tomes : géologie, prospection d'évaluation, Biblio.
- [12] FREDJ M, et all. 2017, Etude de la stabilité au banc dans la mine de phosphate (Algérie). Dans : Congrès international et exposition "Infrastructures civiles durables : Géotechnologie des infrastructures innovantes . Springer, Cham.
- [13] CHOHRI, H.2019. Détermination des paramètres rationnels du plan de tir Cas : gisement de Kef Essnoun. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie. Amar Laskri. Annaba.
- [14] MEZAM, M et all. 2017. Étude Rétro-analytique du glissement du bord Nord de la mine à ciel ouvert de Kef Essenoun (Djebel Onk), Algérie. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 76, no 4, p. 1307-1320.

- [15] MEZGHACHE H. et all. (2000) - Localisation des différents types de minerai à l'aide de méthodes statistiques multivariées dans le gisement de phosphate de Kef Essennon – Djebel Onk – Algérie. 5th international conference on the geology of the Arabworld. Cairo University, Egypte.
- [16] BUROLLET, P. et all., 1980 Paléocène en Tunisie-Pétrole et phosphate. Géologie comparée des gisements de phosphate et de pétrole. Mémoire du BRGM.
- [17] FOURINE D. (1980) : Phosphates et pétroles en Tunisie – in géologie comparée des gisements de phosphate et de pétrole, Mém. BRGM n °4.
- [18] SASSI, S.1974. La sédimentation phosphatée au Paléocène dans le Sud et le Centre Ouest de la Tunisie. These de Doct. D'état es Sci., Univ de Paris Sud.
- [19] Richard C. 2007. Rétro-analyse de l'instabilité d'une pente dans une mine à ciel ouvert assistée de la modélisation numérique utilisant la méthode des éléments distincts. Université Laval Québec.
- [20] Chalhoub M.2006. Apports des méthodes d'homogénéisation numériques à la classification des massifs rocheux fracturés. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, spécialité géologie de l'ingénieur.
- [21] Calembert L, et al.1978. Géologie de l'Ingénieur et Mécanique des Roches, Annales des Travaux Publics de Belgique.
- [22] William A. Hustrulid., Michael K. McCarter., Dirk J.A., Van Zyl. 2009. Slope stability in surface mining. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME). Chapter n°6, Rock Mass Properties for Surface Mining. Hoek, E. & Karzulovic.
- [23] Priest, S. D. 1993. Discontinuity Analysis for Rock Engineering Chapman and Hall. New York.
- [24] Schroeder Ch. 2010. Etude de stabilité des parois rocheuses, Revue de société Belge de géologie de l'ingénieur et de mécanique des roches (SBGIMR).
- [25] Zhao J. 2008. Propriétés des discontinuités, part 3, cours de mécanique des roches, l'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [26] Ali R. 2008. Contribution à l'étude de la stabilité des massifs rocheux fracturés : caractérisation de la fracturation in situ, géostatistique et mécanique des milieux discrets. Sciences de l'ingénieur. Université Montpellier II.
- [27] Cojean, R., Fleurisson J, A. 1987. Fracturation des massifs rocheux ; analyse, description statistique, simulation et application à la stabilité des talus de mines à ciel ouvert Corn, aux Jour. CORSS. Min. de l'Ind. Paris.

- [28] Panet M. et al. 1976. La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de génie civil. Association Amicale des Ingénieurs Anciens de l'E.N.P.C.
- [29] Wittke, W. 2014. Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model (AJRM). John Wiley & Sons.
- [30] Choi S, O. Chung S, K.2004.Stability analysis of jointed rock slopes with the Barton-Bandis constitutive model in UDEC. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, vol. 41, No (3), CD-ROM, Elsevier Ltd.
- [31] Hudson, J. A., 1993. Comprehensive Rock Engineering : Principles, Practice and Projects. Vol. 3 : Rock Testing and Site Characterization. Oxford : Pergamon Press.
- [32] Wyllie, D.C., Mah, C.W. 2004. Rock slope engineering : civil and mining, Spon Press, New York. Yeo, K., Chen, A. 1993. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique Jpn. Geotech. Soc.
- [33] Barton N. R. et Choubey V.1977.The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mech. v10, issue 1.
- [33] Hadjigeorgiou, J., Lessard, J. F., & Flament, F. (1995). Characterizing in-situ block size distribution using a stereological model. Canadian tunnelling, 1995.
- [34] Hoek, E. (2009). Fundamentals of slope design. Keynote address at Slope Stability.
- [35] KIMOUR Mohamed thèse doctorat Développement d'une méthodologie d'estimation des discontinuités du massif rocheux en vue de son utilisation en conception minière 2015/2016.
- [36] CFMR-MMR, 2000 : Comité Français de Mécanique des Roches (2000), Manuel de mécanique des roches. Tome 1 : Fondements. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, coordonné par F. Homand et P. Duffaut.
- [37] Maciej A., [2012], « Modification des classifications mécaniques pour les massifs rocheux schisteux », Thèse de maîtrise des sciences appliquées de l'université de Montréal, spécialité génie minier
- [38] AFTES., [2003], « Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et la réalisation des Ouvrages souterrains ».
- [39] Deere, D. U., A. J. Hendron, et al. (1967). Design of surface and near surface constructions in rock. Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mechanics. C. Fairhurst, New York.
- [40] Deere, D. U. (1968). Geological considerations. Rock Mechanics in Engineering Practice. R. G. Stagg and D. C. Zienkiewicz. Wiley, New York.
- [41] Palmstrom, A. (1982). The volumetric joint count - A useful and simple measure of the

degree of jointing. Proceedings of the 4th International Congress IAEG. New Delhi, India.

[42] Bieniawski, Z. T. (1973). "Engineering classification of jointed rock masses." Trans. S. Afr.Instn. Civil Engrs.

[43] Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. Proc. Of the Symposium on Exploration for Rock Engineering. Johannesburg, Balkema A.A.

[44] Bieniawski, Z. T. (1979). The geomechanics classifications in rock engineering applications. Proc. Of the 4th Congress on Rock Mechanics (ISRM). Montreux, Balkema A.A. and Swiss Society for Soil and Rock Mechanics

[45] Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications : a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. New York John Wiley and Sons

[46] Barton, N., R. Lien, et al. (1974). "Engineering classification of rock masses for the design of rock support." Rock Mechanics.

[47] Singh, B. and R. K. Goel (1999). Rock mass classification : a practical approach in Civil Engineering. Oxford, Elsevier Science Ltd.

[48] Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Proc. Int. Symp. Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works, Mexico City, ISRM.

[49] Chalhoub M., [2006], « Apport des méthodes d'homogénéisation numérique à la classification des massifs rocheux fracturés », Thèse de doctorat 2006, École Nationale des Mines de Paris.

Annexes

Annexe**Tableau A.1** - aperçu sur la mine de kef-essnoun.

Profondeur (m)	Types de roches	Epaisseur (m)	RQD (%)	Qualité des roches
0-2	alluvions	1	\	\
		1	\	\
2-4	alluvions	1.2	\	\
	calcaire	0.8	\	\
04-07	phosphate	1	\	\
		1	\	\
		1	\	\
07-08	Phosphate et mame	1	\	\
08-11	Phosphate et mame	1	\	\
		1	\	\
		1	\	\
11-14	mame	1	11	Très médiocre
		1	12	Très médiocre
		1	24	Très médiocre
14-16	mame	1	14	Très médiocre
	Calcaire	1	64	Moyenne
16-19	Calcaire	1	55	Moyenne
		1	55	Moyenne
		1	43	Médiocre
19-22	Calcaire	1	68	Moyenne
		1	56	Moyenne
		1	91	Excellente
22-25	Calcaire	1	81	Bonne
		1	100	Excellente
		1	62	Moyenne
25-28	Calcaire	1	57	Moyenne
		1	72	Moyenne
		1	56	Moyenne
28-28.7	Calcaire	0,7	23	Très médiocre
28.7-31.7	Calcaire	1	84	Bonne
		1	89	Bonne
		1	85	Bonne
31.7-34.7	Calcaire	1	91	Excellente
		1	79	Bonne
		1	74	Moyenne
34.7-37.7	Calcaire	1	74	Moyenne
		1	80	Bonne
		1	100	Excellente
37.7-40.7	Calcaire	1	100	Excellente
		1	90	Excellente
		1	76	Bonne

40.7-43.7	Calcaire	1	73	Moyenne
		1	82	Bonne
		1	88	Bonne
43.7-46.7	Calcaire	1	100	Excellente
		1	90	Excellente
		1	64	Moyenne
46.7-49.7	Calcaire	1	42	Médiocre
		1	58	Moyenne
		1	62	Moyenne
49.7-52.7	Calcaire	1	69	Moyenne
		1	72	Moyenne
		1	80	Bonne
52.7-55.7	Calcaire	1	100	Excellente
		1	93	Excellente
		1	94	Excellente
55.7-58.7	Calcaire	1	93	Excellente
		1	92	Excellente
		1	91	Excellente
58.7-61.7	Calcaire	1	77	Bonne
		1	91	Excellente
		1	53	Moyenne
61.7-64.7	Calcaire	1	43	Médiocre
64.7-67.7	Calcaire	1	52	Moyenne
		1	51	Moyenne
		1	47	Médiocre
67.7-70.7	Calcaire	1	71	Moyenne
		1	54	Moyenne
		1	60	Moyenne
70.7-73.7	Calcaire	1	70	Bonne
		1	100	Excellente
		1	91	Excellente
73.7-76.7	Calcaire Phosphaté	1	29	Excellente
		1	52	Bonne
		1	40	Moyenne
76.7-79.7	Calcaire Phosphaté	1	66	Moyenne
		1	84	Bonne
		1	91	Excellente
79.7-82.7	Phosphate	1	68	Moyenne
		1	100	Excellente
		1	77	Bonne
82.7-85.7	Phosphate	1	82	Bonne
		1	82	Bonne
		1	96	Excellente
85.7-88.7	Phosphate	1	77	Bonne
		1	77	Bonne
		1	53	Moyenne

88.7-91.7	Phosphate	1	77	Bonne
		1	86	Bonne
		1	92	Excellente
91.7-94.7	Phosphate	1	100	Excellente
		1	68	Moyenne
		1	73	Moyenne
94.7-97.7	Phosphate	1	72	Moyenne
		1	68	Moyenne
		1	85	Bonne
97.7-100.7	Phosphate	1	33	Médiocre
		1	63	Moyenne
		1	74	Moyenne
100.7-103.7	Phosphate	1	86	Bonne
		1	80	Bonne
		1	84	Bonne
103.7-106.7	Phosphate	1	91	Excellente
		1	100	Excellente
		1	83	Bonne
106.7-109.7	Phosphate	1	69	Moyenne
		1	100	Excellente
		1	77	Bonne
109.7-112.7	Phosphate	1	68	Moyenne
		1	83	Bonne
		1	64	Moyenne
		1	91	Excellente
112.7-115.7	Phosphate	1	91	Excellente
		1	72	Moyenne
		1	85	Bonne
115.7-118.7	Marne	1	9	Excellente
		1	72	Moyenne
		1	69	Moyenne
118.7-121.7	Marne	1	62	Moyenne
		1	86	Bonne
		1	67	Moyenne
121.7-124.7	Marne + phosphate	1	48	Médiocre
		1	48	Médiocre
		1	83	Bonne
124.7-127.7	Marne noire	1	70	Moyenne
		1	48	Médiocre
		1	80	Bonne
127.7-130.7	marne	1	59	Moyenne
		1	56	Moyenne
		1	94	Excellente
130.7-133.7	Marne + calcaire	1	83	Bonne
		1	58	Moyenne
		1	54	Moyenne
133.7-136.7	Marne noire	1	23	Très médiocre
		1	62	Moyenne
		1	28	Médiocre

136.7-139.7	Marne noire	1	24	Très médiocre
		1	26	Médiocre
		1	18	Très médiocre
139.7-142.7	Marne noire	1	25	Médiocre
		1	12	Très médiocre
		1	26	Médiocre
142.7-145.7	Marne noire	1	0	Très médiocre
		1	28	Médiocre
		1	28	Médiocre
145.7-148.7	Calcaire	1	69	Moyenne
		1	100	Excellente
		1	90	Excellente
148.7-151.7	Calcaire + marne	1	100	Excellente
		1	100	Excellente
		1	76	Bonne
151.7-154.7	Calcaire + marne	1	31	Médiocre
		1	69	Moyenne
		1	93	Excellente
154.7-155.7	Calcaire	1	80	Bonne



Figure A.1 : aperçu sur la mine de kef-Essnoun (2023).

Tableau A.2 - Détail du calcul du RQD

N° calisse	Intervalle foré (m)	Intervalle reçu (m)	Égale/ perte (+/-cm)	Profondeur (m)	Épaisseur (m)	Description de la roche	Longueur du morceau de carotte (cm)	RQD (%)
1	2	2	0	2	3	quaternaire	120	/
Passe carotté de (m): 2,00					4	calcaire	7	/
Passe carotté A (m): 4,00						calcaire	43*2	
						silix	8	/
						calcaire	22*3	/
2	3	3	0	4				
Passe carotté de (m): 4,00				7	1	phosphate	100x1	/
Passe carotté A (m): 7,00					2	phosphate	100x1	/
					3	phosphate	100x1	/
2	1	1	0	7	0			
Passe carotté de (m): 7,00				8	1	phosphate	70x1	/
Passe carotté A (m): 8,00							06x2	
						marne blanchâtre	5	/
							5	
							6x2	
							8	
3	3	3	0	8	0			
Passe carotté de (m): 8,00				11	1	phosphate	100x1	/
passe carotté A (m): 11,00					2	phosphate	100x1	
					3	phosphate	60x1	
						marne blanchâtre	10x2	/
							5	
							5	
							05x2	
							15x1	
3+4	3	3	0	11	0			
passe carotté de (m): 11,00				14	1	marne blanc	27x1	20
passe carotté A (m): 14,00							4	
							24x2	
							6	
							8	
							6	
							11	
							5	
					2	marne blanc	9	
							9	
							8	
							7	

Classification RMR (Bieniawski)

Tableau A.3- Classification RMR (Bieniawski)

A. PARAMETRES DE CLASSIFICATION ET NOTATIONS CORRESPONDANTES							
Paramètres		Plages de valeurs					
1	Résistance de la roche (matrice)	Indice Franklin I_f	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Pour les faibles valeurs de I_f utiliser la résistance en compression uniaxiale
		Résist. compr. uniax. σ_c	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa 1 - 5 MPa < 1 MPa
	Notation		15	12	7	4	2 1 0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%
	Notation		20	17	13	8	3
3	Espacement des discontinuités		> 2 m	0,6 m - 2 m	200 mm - 600 mm	60 mm - 200 mm	< 60 mm
	Notation		20	15	10	8	5
4	Nature des discontinuités (voir E)		Surfaces très rugueuses Non continues Épentes en contact Épentes non altérées	Surfaces légèrement rugueuses Épaisseur < 1 mm Épentes faiblement altérées	Surfaces légèrement rugueuses Épaisseur < 1 mm Épentes fortement altérées	Surfaces lustrées ou Remplissage < 5 mm ou Épaisseur de 1 à 5 mm Joint continu	Remplissage mou > 5 mm ou Épaisseur > 5 mm Joint continu
	Notation		30	25	20	10	0
5	Eau	Débit sur 10 m de longueur de tunnel (l/min)	Aucun	< 10 l/min	10 à 25 l/min	25 à 125 l/min	> 125 l/min
		Ratio : pression eau / contr. prise, q_1	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
	Conditions générales		Complètement sec	Humide	Mouillé	Suintant	Débitant
		Notation		15	10	7	4
RMR = Somme des notations des paramètres 1 à 5							
B. AJUSTEMENT DE LA VALEUR DE RMR EN FONCTION DE L'ORIENTATION DES DISCONTINUITES (voir F)							
Direction et pendage		Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable	
Notation	Tunnels	0	- 2	- 5	- 10	- 12	
	Fondations	0	- 2	- 7	- 15	- 25	
	Talus	0	- 5	- 25	- 50	- 60	
C. CLASSES DE MASSIF ROCHEUX DETERMINEES PAR LE RMR							
Valeur du RMR		100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21	
Classe		I	II	III	IV	V	
Description		Très bon rocher	Bon rocher	Rocher moyen	Rocher médiocre	Rocher très médiocre	
D. PROPRIETES GLOBALES ATTRIBUEES AU MASSIF ROCHEUX EN FONCTION DES CLASSES							
Classe		I	II	III	IV	V	
Temps de tenue sans soutènement		20 ans pour une portée de 15 m	1 an pour une portée de 10 m	1 semaine pour une portée de 5 m	10 h pour une portée de 2,5 m	30 mn pour une portée de 1 m	
Cohésion du massif rocheux (kPa)		> 400 kPa	300 à 400 kPa	200 à 300 kPa	100 à 200 kPa	< 100 kPa	
Angle de frottement du massif rocheux (°)		> 45°	35° à 45°	25° à 35°	15° à 25°	< 15°	
E. INDICATIONS POUR LA NOTATION "NATURE DES DISCONTINUITES"							
Longueur des discontinuités		< 1 m	de 1 à 3 m	de 3 à 10 m	de 10 à 20 m	> 20 m	
Notation		6	4	2	1	0	
Ouverture des discontinuités		aucune	< 0,1 mm	de 0,1 à 1 mm	de 1 à 5 mm	> 5 mm	
Notation		6	5	4	1	0	
Rugosité des épentes des discontinuités		Très rugueuse	Rugueuse	Légèrement rugueuse	Lisse	Lustrée	
Notation		6	5	3	1	0	
Altération des épentes		Non altéré	Légèrement altéré	Moyennement altéré	Très altéré	Décomposé	
Notation		6	5	3	1	0	
Matériau de remplissage des discontinuités		Aucun	Remplissage dur < 5 mm	Remplissage dur > 5 mm	Remplissage mou < 5 mm	Remplissage mou > 5 mm	
Notation		6	4	2	2	0	
Nota : Certaines conditions sont mutuellement exclusives. Par exemple, si du matériau de remplissage est présent, il n'est plus pertinent de considérer la rugosité dans la mesure où son effet sera effacé par celui du remplissage. Dans ce cas utiliser directement la notation du tableau A 4.							
F. INFLUENCE DE L'ORIENTATION ET DU PENDAGE DES DISCONTINUITES POUR LA STABILITE DES TUNNELS							
Horizontale du plan de discontinuité perpendiculaire à l'axe longitudinal du tunnel (creusement en travers bancs)				Horizontale du plan de discontinuité parallèle à l'axe longitudinal du tunnel (creusement en direction)			
Creusement dans le sens du pendage				Pendage 45° à 90° : très défavorable		Pendage 20° à 45° : moyen	
Pendage 45° à 90° : très favorable		Pendage 20° à 45° : favorable					
Creusement contre le sens du pendage				Pendage 0° à 20° et orientation quelconque : moyen			
Pendage 45° à 90° : moyen		Pendage 20° à 45° : défavorable					