الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
istère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معـــــــــهد المـــــناجم
Institut des Mines
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا
Département des Mines Et Géotechnologie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie minier

Option : Géotechnique

Evaluation de la qualité de stabilité des gradins d'une mine à ciel ouvert

Cas ; La mine de fer de l'Est de l'Ouenza

GUELMAMI Isra

Devant le jury :

BENGHAZI Zied	**Président**	MC A	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
MEBROUK Faouzi	**Encadreur**	MA A	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
AMRANI Dounia	**Examinateur**	MA A	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**

Année universitaire 2024/2025

لجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tebessi – Tébessa
Institut des Mines
Département mines et géotechnologie

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعةالعربي التبسي – تبسة
معهد المناجم
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا

Année universitaire : 2024/2025 Tébessa le : 08/05/2025

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1**GUELMAMI Isra**----------
2----------

3----------

Niveau : Master 2---------- Option : Géotechnique ----------

Thème :-**Evaluation de la qualité de stabilité des gradin d'une mine a ciel ouvert---cas/ la mine de fer de l'est de l'Ouenza**----------

Nom et prénom de l'encadreur : **MEBROUK Faouzi**----------

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre I. généralités sur les méthodes de classifications	
Chapitre II. Etude géologiques ; hydrogéologique et géotechniques de la zone d'étude	
Chapitre III. Les classifications géomécaniques	
Chapitre VI. La modélisation numérique	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي: جامعة العربي التبسي – تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) قلمامي اسراء الصفة: طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 407940111 و الصادرة بتاريخ /072023/12

المسجل بمعهد : المناجم قسم: المناجم و الجيوتكنولوجيا

و المكلف بانجاز أعمال بحث مذكرة ماستر عنوانها :

Evaluation de la qualité de stabilité des gradins d'une mine à ciel ouvert Cas ; La mine de fer de l'Est de l'Ouenza

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

التاريخ:.....

إمضاء المعني (ة)

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

مقرر رقم: 198 مؤرخ في: 04 جوان 2025

يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إنّ مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

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

-و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتمم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعةالعربي التبّسي بتبسة،

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

-وبموجب القرار رقم 362 المؤرّخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كيفيات إعداد ومناقشة مذكّرة الماستر، لاسيما المادة 7 منه،

-وبموجب القرار رقم القرار 1080 المؤرّخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمّن تأهيل مؤسسات التعليم العالي لضمان التكوين لنيل شهادة الماستر اختصاص جيوتقني بعنوان السّنة الجامعية 2025 / 2024،

-وبموجب المقرّر رقم 198 المؤرّخ في 2025/06/04.والمتضمّن تعيين لجنة مناقشة مذكّرة الماستر،

-وبعد الاطّلاع على مقرر تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرّخ في 2025/06/04

يقرّر ما يأتي:

المادة1: يُرخّصُ للطالبة قلمامي اسراء، المولود بتاريخ04 أوت 2002 بالونزة .تبسة،بمناقشة مذكّرة الماستر والموسُومة بـ

Évaluation de la qualité de stabilité des gradins d'une mine à ciel ouvert. Cas : la mine de fer de l'est de l'Ouenza.

المادة 2: يكلّف رئيس قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرّر الّذي يسلّم نسخة عنه إلى الطّالب المعني بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمان نشره عبر فضاءات المؤسّسة المادية والرقمية.

المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرّر ضمن الملفّ البيداغوجي للطّالب المعني وينشر في النّشرة الرّسمية لجامعة العربي التبسي.

حُرّر ب تبسة، في: 04 جوان 2025

عن المدير، وبتفويض منه

مدير المعهد

مدير معهد المناجم
د.عولمي زوبير

Scanned with CamScanner

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة العربي التبسي- تبسة

مقرر رقم : 197 مؤرخ في : 04 جوان 2025

يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إنّ مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

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

-و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم :12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتمم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في :04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعةالعربي التبّسي بتبسة،

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

-وبموجب القرار رقم 362 المؤرّخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كيفيات إعداد ومناقشة مذكّرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و11 منه،

-وبموجب القرار رقم 1080 المؤرّخ في 13 أكتوبر 2015والمتضمّن موائمة التكوينات في الماستر، اختصاص جيوتقني،

-وبعد الاطّلاع على محضر المجلس العلميلمعهد المناجمرقم 03 المؤرّخ في 12 ديسمبر 2024

يقرّر ما يأتي:

المادة 1:تُعيَّنُ بموجب هذا المقرّر لجنة مناقشة مذكّرة الماستر المحضَّرة من طرف الطّالب :

قلماني اسراء..المولود بتاريخ04 أوت 2002 بالونزة تبسة

والموسُومة بـ:

Évaluation de la qualité de stabilité des gradins d'une mine à ciel ouvert. Cas : la mine de fer de l'est de l'Ouenza.

والمسجّل (ة) بمعهدالمناجم

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

رقم	الاسم واللّقب	الرتبة	مؤسّسة الانتماء	الصّفة
1	بن غازي زياد	أستاذ محاضر –ا	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	مبروك فوزي	أستاذ مساعد–ا	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفا
3	عمراني دنيا	أستاذ مساعد – أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مناقشا

المادة 3: يكلّف رئيس قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرّر الّذي يُسلّم نسخةً عنه إلى كلّ من الطّالب المعني والمشرف على المذكّرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

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

حُرّر ب تبسة، في:.. 04 جوان 2025

عن المدير، وبتفويض منه

مدير المعهد

مدير معهد المناجم

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي تبسة - معهد المناجم

CS Scanned with CamScanner

إهداء

أولاً، الحمد لله رب العالمين، الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله تتحقق الأمنيات
له الحمد كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه، فلولاه ما وصلت، وما ثابرت، وما نلت هذا الشرف.
إليه أرفع شكري، ودعائي، وامتناني على ما منحني من قوة وصبر ويقين في كل مراحل هذا المشوار.
أهدي تخرجي هذا...
إلى والدي الحبيب فتحي، القدوة والمثل، من علّمني أن الرجولة موقف، وأن الكفاح لا يُورَّث، بل يُكتسب بالإيمان والعزيمة. كنت السند الصلب، والروح التي تدفعني كلما تعبت... فلك كل الامتنان والحب والدعاء.
إلى أمي الحنونة صليحة، من غرست فيّ بذور النجاح، وسقتها بدعواتها وسهرها وقلبها. كنتِ الوطن والملجأ، كنتِ كل شيء جميل في هذه الرحلة... دعاؤك كان نورًا أنار لي طريقي، ورضاكِ هو تاج هذا الإنجاز.
إلى إخوتي الأعزاء أمين وأحمد، من كانوا الفرح في أيامي، والضحكة التي تخفّف عني ثقل اللحظات، شكراً لوجودكم في حياتي، ولقلوبكم البيضاء التي تحتويني.

إلى أختي الغالية شيماء، رفيقة الطفولة والدرب، من كانت تفهمني بصمت، وتحتويني بكلمة، وتدفعني للأمام بابتسامتها وثقتها بي.

إلى صديقاتي العزيزات، وفاء, أميرة , شيماء, اسراء , اية, وفاء, نور, صفاء, رحمة, خلود, رباب أنتن لسن مجرد أسماء، بل محطات جميلة في ذاكرة القلب... كل لحظة جمعتني بكنّ كانت سنداً ودفعاً للاستمرار، فشكرًا على كل لحظة دعم، وكل كلمة صادقة، وكل وجود محفّز.

وإلى العائلتين الكريمتين قلمامي وخليفة، شكرًا للقلوب التي احتضنتني، وللأيادي التي امتدت بالعون، وللمحبة التي لا تُقدَّر بثمن... لقد كنتم جزءًا أصيلاً من رحلتي، وستبقون كذلك دائمًا
إلى كل من آمن بي، ودفعني بكلمة، أو بدعاء، أو بابتسامة...
هذا التخرّج ليس لي وحدي، بل هو لكم جميعاً، فأنتم من كنتم النور في دربي... وها أنا اليوم أقطف ثمرة جهدٍ لم يكن ليرى النور لولاكم.

Remerciement

Remerciements à Dieu, puis à ceux qui m'ont soutenu dans ce parcours

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour sa bénédiction et son aide qui ont rendu ce succès possible.

Louange à Lui pour sa guidance et pour avoir facilité chaque étape de ce chemin.

Que Sa volonté soit toujours le guide de mes pas.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche,

M. MEBROUK Faouzi, qui a été un excellent mentor et guide tout au long de mon parcours académique.

Merci pour votre soutien constant, vos conseils précieux et votre encadrement qui ont été d'une grande importance pour la réalisation de ce projet.

Je remercie vivement l'ensemble des membres de jury de soutenance pour leur disponibilité, leurs observations constructives et leur contribution à l'enrichissement de ce travail

M.BENGHAZI Zied et Mme.AMRANI Dounia

Je tiens également à adresser mes remerciements à tous mes enseignants, qui ont contribué à mon apprentissage et à mon développement personnel et professionnel.

Je tiens à remercier plus particulièrement :

M. DJELLALI Adel, M. HAMDANE Ali , M.BERRAH Yassine, et M. BRAHMI Serhane

Merci à vous pour votre soutien et vos encouragements constants.

Enfin, Je souhaite exprimer mes remerciements à l'ensemble des travailleurs de la mine de l'Ouenza, qui ont été une partie intégrante de mon expérience pratique.

Résumé :

Cette étude vise à analyser et évaluer la qualité de la stabilité des pentes dans la mine d'El Ouenza, avec une attention particulière portée à la zone de Zerga, en étudiant les fractures rocheuses et en appliquant les méthodes de classification géomécanique.

Un logiciel spécialisé a été utilisé pour l'analyse de la stabilité, en appliquant la méthode des éléments finis à travers le logiciel PLAXIS, afin de calculer le facteur de sécurité et identifier les zones de faiblesse.

Les résultats ont révélé que les gradins actuels de la mine présentent un état d'instabilité manifeste, ce qui a nécessité la proposition de modifications techniques appropriées visant à réduire les risques et à garantir la sécurité des travailleurs et des équipements sur le site.

Mots clés : stabilté , classification géomécanique , le facteur de sécurité , gradins

Abstract:

This study aims to analyze and evaluate the quality of slope stability at the El Ouenza mine, with a particular focus on the Zerga area, by studying rock fractures and applying geomechanical classification methods.

A specialized software was used for stability analysis using the finite element method through the PLAXIS application, in order to calculate the safety factor and identify areas of weakness.

The results showed that the current mine benches suffer from a clear state of instability, which led to the proposal of appropriate engineering modifications aimed at reducing risks and ensuring the safety of workers and equipment at the site.

Keywords: stability, geomechanical classification, safety factor, benches

ملخص :

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل وتقييم نوعية الاستقرار لمنحدرات منجم الونزة، مع التركيز بشكل خاص على منطقة الزرقاء، وذلك من خلال دراسة التشققات الصخرية وتطبيق منهجيات التصنيف الجيوميكانيكي.

وقد تم اعتماد برنامج متخصّص لتحليل الاستقرار باستخدام طريقة العناصر المنتهية من خلال برنامج PLAXIS

لحساب معامل الأمان وتحديد مناطق الضعف.

أظهرت النتائج أن مدرجات المنجم الحالية تعاني من حالة عدم استقرار واضحة، مما استدعى اقتراح تعديلات هندسية مناسبة تهدف إلى الحد من المخاطر وضمان سلامة العاملين والمعدات داخل الموقع.

الكلمات المفتاحية : استقرار , التصنيف الجيوميكانيكي , معامل الأمان , مدرجات

Table de matiére

Résumé I

Table des matiéres II

Liste des Figures III

Liste des tableaux IV

INTROUDUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : Généralités sur les méthodes de caractérisation geomecaniques

I.1 Introduction 3
I.2 Types et buts des systèmes de classification 3
I.2.1 Désignation de la qualité de la roche (RQD) (Rock Quality Designation 5
I.2.2 Indice de la masse rocheuse (RMR) Rock Mass Rating 6
I.2.3 Évaluation de la masse de la pente (SMR) Slope Mass 8
I.2.4 Indice de résistance géologique GSI (Geological Strength Index 10
I.2.5 Indice d'évaluation des talus rocheux (Slope Quality Index "SQI") 11
I.3 Étude des discontinuités 13
I.3.1 Classification des discontinuités 13
I.3.2 Les joints de stratification 13
1.3.3 Les diaclases 14
I.3.4 Les failles 14
I.3.5 Les fractures 14
I.4 Paramètre géométrique des discontinuités 14
I.4.1 Nombre de familles des discontinuités 14
I.4.2 L'orientation (direction 15
I.4.3 L'espacement 15
I.4.4 La persistance 16
I.4.5 Rugosité et ondulation 16
I.4.6 L'ouverture et remplissage 17
I.5 Conclusion 18

CHAPITRE II **: Etude geologique, hydrogeologique et géotechnique**

II.1. Introduction 19
II.2 cadre géographique 19

II.2.1 Situation géographique de djebel OUENZA 19
II.2.2 Quartier Zergua 20
II.3.1 la géologie régionale 20
II.3.2 la stratigraphie 20
II.3.3 la Géologie de Quartier Zergua 25
II.4 Le Cadre tectonique 25
II.4.1 Les principales modalités de la tectonique 26
II.4.1.1 La subsidence 26
II.4.1.2 le diapyrisme 26
II.4.1.4 la tectonique cassante 27
II.4.1.5 Fossé d'effondrement 27
II.5.1 L'hydrogéologie 28
II.5.2 Réseaux hydrographique 28
II.6 Climatologie 29
II.6.2 : Précipitation et température 29
II.7 Reconnaissance géotechnique 30
II.7.1 Essai en laboratoire 30
II.7.2 Essai in situ 32
II.8 : Conclusion 34

CHAPITRE III : Application des méthodes de classification géomécaniques

III.1 Introduction 35
III.2 Rock Quality Designation (RQD) 35
III.3 Rock Mass Rating (RMR 39
III.4 Représentation stéréographique 44
III.4.1 La projection des pendages et direction des discontinuités de ZERGA 44
III.4.2 La stabilité geomecanique
III.4.3 L'orientation de la face des gradins 50
III.5 Slope Mass Raiting (SMR) 50
III 5.1 La classification du massif rocheux de chaque gradin par le système SMR 51
III.6 Système du GSI (Geological Strength Index) 53
III.7 Indice d'évaluation des talus rocheux (Slope Quality Index"SQI") 57
III.8 Conclusion 59

Chapitre IV **: Modélisation numériques**

IV.1 Introduction 61
IV.2 Buts et objectifs 61
IV.3 Réseau scientifique 61
IV.4 Création des modèles numériques 62
IV.4.1 - Saisie graphique des modèles géométriques 62
IV.4.2 –Forages 62
IV.4.2.1 -Modèle de Mohr-Coulomb 62
IV.4.2.2 -Modèle de Roche Jointée (JR) 63

IV.4.2.3 -Modèles de sols avancés 64
IV.4.3 -Les étapes de la création de modèle numérique 65
IV.4.3.1 -La géométrie et paramètres géotechniques des modèles 65
IV.4.3.3 -Générations du Maillage 66
IV.4.3.4 -Procédure des calculs 67
IV.5 -Les déformations de cisaillement 67
IV.6 interprétation des résultats obtenus par le calcul numérique 67
IV**.7** Amélioration par modification géométrique 76
IV**.7.1** interprétation des résultats obtenus 77
IV**.8** Conclusion 79
Conclusion générale et recommendation 80
Références bibliographique 83

Liste des figures

Figure. I.1 :	Définition de la direction et le pendage	15
Figure I.2 :	Persistance de différents ensembles de fractures	16
Figure. I.3	L'ouverture et remplissage d'une discontinuité	18
Figure II-1 :	: Situation géographique d'EL OUENZA	19
Figure II-2 :	Carte géologique schématique du quartier Zergua	20
Figure II-3 :	Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue	24
Figure II-4 :	Carte géologique du massif de l'Ouenza (Dubourdieu, 1956)	25
Figure II-5 :	Diapir de l'Ouenza ceinturé par des séries crétacées qui dessinent au Sud-Ouest la fermeture périclinale du massif de l'Ouenza au Nord-Est celle de Djebel Ladjebel	27
Figure II-6 :	Les moyennes mensuelles des températures exprimées en (°C) de la station de Tébessa (1969-2007).	29
Figure II-7 :	Les moyennes mensuelles des précipitations exprimées en (mm) de la station de Tébessa (1969-2007)	30
Figure II-8 :	La section 07 /gradin 01	33
Figure III.1 :	Projection stéréographique section 01/ gradin 01	44
Figure III.2 :	Projection stéréographique section 01/ gradin 02	45
Figure III.3 :	Projection stéréographique section 01/ gradin 03	45
Figure III.4 :	Projection stéréographique section 01/ gradin 04	46
Figure III.5 :	La stabilité geomecanique section 01/ gradin 01	46
Figure III.6 :	La stabilité geomecanique section 01/ gradin 02	47
Figure III.7 :	La stabilité geomecanique section 01/ gradin 03	47
Figure III.8 :	La stabilité geomecanique section 01/ gradin 04	
Figure III.9 :	classification GSI pour le gradin 01	54
Figure III.10 :	classification GSI pour le gradin 02	55
Figure III.11 :	classification GSI pour le gradin 03	56
Figure III.12 :	classification GSI pour le gradin 04	57
Figure VI.1 :	La surface de contrainte de Mohr-Coulomb dans l'espace des Contraintes principales (c = 0)	62
Figure IV.3 :	Plan d glissement	63
Figure IV.4 :	profiles géométriques étudiées	64
Figure IV.5 :	le maillage des modèles géométriques	66
Figure IV.6 :	les Phases de calcul, a-initiale (K0) b- Phase 1(Safety)	67
Figure IV.7 :	Les déformations de cisaillement dans la marne	67
Figure IV.8 :	Les déformations de cisaillement dans le Fer	68
Figure IV.9 :	Les déformations de cisaillements dans le Calcaire	68
Figure IV.10 :	le coefficient de sécurité dans la marne	69
Figure IV.11 :	le coefficient de sécurité dans le Fer	69
Figure IV.12 :	le coefficient de sécurité dans le calcaire	70
Figure IV.13 :	Les déformations de cisaillement dans la marne pour des orientations de fractures (110°) (135°) (145°)	70
Figure IV.14 :	Les déformations de cisaillements dans la marne pour des orientations de fractures (110°) et (135°)	71
Figure IV.15 :	Les déformations de marne pour des orientations de fractures (145°)	71

Figure IV.16 : Les déformations de cisaillement dans le Fer pour des orientations de fractures (136°) (145°) (169°) 72
Figure IV.17 : Les déformations de cisaillement dans le Fer pour des orientations de fractures (136°) (145°) (169°) 72
Figure IV.18 : Les déformations de cisaillement dans le Calcaire pour des fractures 73
Figure IV.19 : Les déformations de cisaillement dans le Calcaire pour des orientations de fractures (145°) (153°) 74
Figure IV.20 : Les déformations de cisaillements dans le Calcaire pour une fracture (160°) 74
Figure IV.21 : les valeurs de FS – a (Marne un seul gradin) -b (Marne 4 gradins) 74 75
Figure IV.22 : la valeur de FS – a) un seul gradin) – b) 4 gradins
Figure IV.23 : la valeur de FS dans le Calcaire- a) un seul gradin) –b 4 gradins 75
Figure IV.24 : Les déformations de cisaillement dans la Marne après l'amélioration - a) gradin) –b) 4 gradins 76
Figure IV.25 : Les déformations de cisaillement dans le Fer après l'amélioration – a) gradin – b) 4 gradins) 76
Figure IV.26 : Les déformations de cisaillement dans le Calcaire après l'amélioration – a) gradin) –b) 4 gradins 77
Figure IV.27 : les valeurs de FS pour – a) la Marne- b) Fer 77
Figure IV.28 : la valeur de FS (Calcaire) 78

Liste des tableau

Tableau I-1	Systèmes de classification du massif rocheux	4
Tableau I-2	Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux	5
Tableau I-3	Classification du massif rocheux selon le RMR	8
Tableau I-4	le Tableau de classification de Romana	9
Tableau I-5	Les différentes classes de stabilité par la valeur du SMR	10
Tableau I-6	les suggestions de soutènement selon la classe du SMR	10
Tableau I-7	Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI	11
Tableau I-8	Système SQI pour les pentes rocheuses : classification qualitative et Quantitative	11
Tableau I-9	Facteurs et paramètres pris en compte dans le système SQI	12
Tableau I-10	La description suggérée par ISRM	14
Tableau I-11	Description de l'espacement des discontinuités	16
Tableau I-12	La persistance description suggérée par l'ISRM	16
Tableau I-13	La description d'ouverture	18
Tableau II-1	Les résultats de calcul la teneur en Eau	31
Tableau II-2	Les résultats de calcul la masse volumique absolue	31
Tableau II-3	Les résultats de calcul la masse volumique apparente	32
Tableau II-4	Les valeurs du Scléromètre	32
Tableau II-5	les résultats de la projection (G1/S07)	33
Tableau III.1	RQD de Deere.	35
Tableau III.2	les résultats de RQD des différentes sections /GRADIN 01	36
Tableau III.3	les résultats de RQD des différentes sections /GRADIN 02	36
Tableau III.4	les résultats de RQD des différentes sections /GRADIN 03	37
Tableau III.5	les résultats de RQD des différentes sections /GRADIN 04	38
Tableau III.6	Qualité de la masse rocheuse de Quartier Zerga	38
Tableau III.7	Paramètres de classification des roches et notes de pondération	40
Tableau III.8	Classification du massif rocheux selon le RMR	40
Tableau III.9	Exemple de classification/gradin 01	41
Tableau III.10	les résultats de RMR du défirent Sections de GRADIN 01	41
Tableau III.11	les résultats de RMR des différentes sections / GRADIN 02	42
Tableau III.12	les résultats de RMR des différentes sections / GRADIN 03	42
Tableau III.13	les résultats de RMR des différentes sections / GRADIN 04	43
Tableau III.14	les classes du massif rocheux de ZERGA	43
Tableau III.15	les résultats des familles trouvés par la projection des différentes sections dans le GRADIN 01	48
Tableau III.16	les résultats de la projection pour les différentes Sections dans le GRADIN 02	48
Tableau III.17	les résultats de la projection des différentes sections / GRADIN 03	49
Tableau III.18	les résultats de la projection des différentes sections / GRADIN 04	49
Tableau III.19	Directions et Pendages des talus des différentes sections (01/02)	50
Tableau III.20	Directions et Pendages des talus des différentes sections (03/04)	50
Tableau III.21	Exemple de classification Section 04 / gradin 01	51

Tableau III.22	les résultats de SMR du défirent Sections de GRADIN 01	52
Tableau III.23	les résultats de SMR du défirent Sections de GRADIN 02	52
Tableau III.24	les résultats de SMR du défirent Sections de GRADIN 03	52
Tableau III.25	les résultats de SMR du défirent Sections de GRADIN 04	53
Tableau III.26	Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI	53
Tableau III.27	le GSI et la qualité de la roche pour chaque Section de GRADIN 01	54
Tableau III.28	le GSI et la qualité de la roche pour chaque Section de GRADIN 02	55
Tableau III.29	le GSI et la qualité de la roche pour chaque Section de GRADIN 03	56
Tableau III.30	le GSI et la qualité de la roche pour chaque Section de GRADIN 04	57
Tableau III.31	Système SQI pour les pentes rocheuses : classification qualitative et quantitative	58
Tableau III.32	l'État de stabilité de Calcaire ZERGUA	58
Tableau III.33	l'État de stabilité de Fer ZERGUA	58
Tableau III.34	l'État de stabilité de Marne ZERGUA	59
Tableau IV.1	les profiles géométriques	65
Tableau IV.2	Les caractéristiques de la Marne (Mohr coulomb)	66
Tableau IV.3	Les caractéristiques de la Marne (Roche jointée)	66
Tableau IV.4	Les géométries des modèles proposés	77

Liste des abréviations

E_{ref} : Module de Young

ν : Coefficient de Poisson

G : Module de cisaillement

E_{oed} : Module œdométrique

C : Cohésion

φ : Angle de frottement

ψ : Angle de dilatance

E_t : Module de Young pour la roche continu

N_{nt} : Coefficient de Poisson pour la roche continu

E_n : Module de Young perpendiculaire à la direction

G_{nt} : Module de cisaillement perpendiculaire à la direction

Nts : Coefficient de Poisson perpendiculaire au Plan 1

Introduction générale

Introduction générale :

L'instabilité des talus dans les mines à ciel ouvert représente un enjeu crucial en ingénierie géotechnique minière, en raison de ses répercussions directes sur la sécurité des opérations, la continuité de l'exploitation et la protection des infrastructures. Elle résulte d'un déséquilibre entre les forces déstabilisantes et les forces de résistance au sein du massif rocheux ou meuble, ce qui peut conduire à des ruptures sous forme de glissements.

La stabilité d'un versant dépend d'une interaction complexe entre divers paramètres géomécaniques. Parmi eux figurent les propriétés physico-mécaniques des matériaux, telles que la cohésion, l'angle de frottement interne et le module d'élasticité ; la géométrie du talus, incluant sa hauteur, son inclinaison et son orientation ; la présence ainsi que l'agencement des discontinuités géologiques comme les diaclases, failles ou plans de litage. S'y ajoutent les conditions hydrogéologiques, notamment le niveau piézométrique et la pression interstitielle, ainsi que les influences anthropiques telles que les excavations, les tirs de mines ou les modifications du relief topographique.

Pour caractériser la qualité du massif rocheux et quantifier sa susceptibilité à la rupture, le recours aux systèmes de classification géo mécanique s'impose comme une approche standardisée.permettent une évaluation rigoureuse de la résistance globale du massif en fonction de critères géologiques, structuraux et hydromécaniques.

Ces classifications constituent des outils fondamentaux pour l'estimation du facteur de sécurité (FS), l'élaboration de modèles de comportement en conditions réelles ou simulées, et la mise en œuvre de solutions de stabilisation. Face aux enjeux de sécurité et de durabilité.

Dans ce contexte, nous avons décidé d'étudier la stabilité de la mine d'El Ouenza (Quartier ZERGA). Ainsi, notre mémoire est structuré comme suit :

- Chapitre 01 : Présenter un aperçu des méthodes de caractérisation géo mécanique, de leurs classifications, ainsi que de la description géométrique et géo mécanique des discontinuités.

- Chapitre 02 : Consacré a l'analyse des caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques qui influencent la stabilité des gradins de la mine d'Ouenza, ainsi que les différentes données physiques et mécaniques des roches et les résultats des essais au laboratoire.
- Chapitre 03 : Application des systèmes de classification géo mécanique pour évaluer la stabilité des masses rocheuses, en utilisant les systèmes RQD, RMR,SMR,SGI et SQI pour évaluer les risques et orienter les méthodes de renforcement appropriées.
- Chapitre 04 : Concentre à la modélisation par la méthode des éléments finis pour analyser la stabilité des gradins actuelles et les propositions d'amélioration, en simulant avec le logiciel PLAXIS 2D V10 2024.

Finalement, une conclusion générale est présentée avec des recommandations

Chapitre I

I.1 Introduction

La connaissance du comportement des massifs rocheux constitue un enjeu majeur dans les projets de génie civil, minier et géotechnique. Avant toute opération de conception ou d'exploitation, il est indispensable d'évaluer la qualité du massif rocheux et sa réponse face aux sollicitations naturelles ou induites. C'est dans ce cadre que s'inscrit la caractérisation géomécanique, une discipline qui combine des observations géologiques, des mesures structurales et des essais mécaniques pour établir un diagnostic fiable du terrain rocheux.

La caractérisation géomécanique permet d'identifier les propriétés physiques et mécaniques des roches, de déterminer la nature et la disposition des discontinuités (fractures, failles, diaclases…), et d'estimer la résistance globale du massif. Grâce à cette approche, les ingénieurs peuvent adapter les techniques de soutènement, prévenir les risques d'instabilité, et optimiser la sécurité et la durabilité des ouvrages.

I.2 Types et buts des systèmes de classification

Les systèmes de classification des massifs rocheux fracturés ont évolué pour répondre aux besoins de l'ingénierie géotechnique, notamment dans les projets d'excavation et de construction souterraine. Ces classifications sont utilisées lorsque des informations détaillées sur les propriétés mécaniques, hydrologiques et l'état de contrainte in-situ du massif rocheux sont manquantes. Elles permettent d'estimer indirectement des propriétés mécaniques essentielles, telles que la résistance à la compression, la cohésion, l'angle de frottement interne, et le module de déformation. Elles aident également à évaluer le "stand-up time", ou le temps pendant lequel un massif peut rester stable sans soutènement, et à donner des recommandations sur le soutènement des ouvrages.

Les facteurs considérés incluent la résistance de la matrice rocheuse, la présence d'eau, et les caractéristiques des discontinuités. Ces systèmes ont facilité la communication entre géologues, ingénieurs et entrepreneurs, mais leur efficacité a été remise en question avec le temps. Les classifications modernes, bien que toujours utilisées, sont désormais considérées comme moins systématiques, et les systèmes anciens, basés sur l'observation empirique, sont jugés moins fiables pour des situations complexes.

Il est donc recommandés de faire preuve de prudence lors de l'utilisation de ces systèmes, car ils ont été développés dans des contextes spécifiques et peuvent ne pas être adaptés aux projets actuels. En résumé, bien qu'utiles par le passé, ces systèmes doivent être appliqués avec précaution dans les projets contemporains, en tenant compte des conditions géologiques variées et complexes [1]

Il existe plusieurs systèmes de classification modernes dans la littérature. Le Tableau suivant énumère ceux-ci, ainsi que les systèmes plus anciens

Tableau I-1 : Systèmes de classification du massif rocheux [1]

Système de classification	Référence	Pays d'origine	Applications
Rock Loads	Terzaghi, 1946	É.-U.A	Tunnels avec support en acier
Stand-up time	Lauffer, 1958	Autriche	Tunnels
New Austrian tunnelling method (NATM)	Rabcewicz, 1964/1965, 1975	Autriche	Tunnels
Rock Quality Designation	Deere, 1968	É.-U.A.	Carottes de forage, tunnels
Rock Strength Rating (RSR)	Wickham et al. 1972	É.-U.A.	Tunnels
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973,1974, 1976,1979 Bieniawski, 1989	Afrique du Sud É.-U.A.	Tunnels, mines, SLOPES, fondations
Extensions du système RMR	Laubscher 1977 ; 1984 Ghose and Raju, 1981 Kendorski et al. 1983 Serafim and Pereira, 1983 Gonzales de Vallejo, 1983 Unal, 1983 Romana, 1985 Newman et Bieniawski, 1985	Norvège	Mines Mines de charbon Mines en roche dure Fondations Tunnels Support du toit/charbon Stabilité des pentes Mines de charbon
Rock Mass Quality	Barton et al. 1974	Canada	Tunnels, chambres
Strength-Size	Franklin, 1975	-	Tunnels
Basic geotechnical description	ISRM, 1981a	Canada	Communication générale
Geological strength index (GSI)	Hoek et al. 1995		Mines

Les systèmes de classification des massifs rocheux les plus utilisés sont le Rock Quality Designation (RQD), le Rock Mass Rating (RMR) et le Geological Strength Index (GSI). Bien qu'ils visent à évaluer la qualité du massif rocheux, chaque système repose sur une philosophie différente et caractérise la roche de manière distincte. Chacun présente des avantages et des limites, et il est essentiel de bien comprendre leurs spécificités avant de les appliquer. [1]

I.2.1 Désignation de la qualité de la roche (RQD) (Rock Quality Designation)

Deere (1964) a introduit l'indice RQD (Rock Quality Designation) pour évaluer la qualité du massif rocheux. Cet indice est calculé à partir des carottes de forage géologique, en prenant en compte uniquement les morceaux de roche intacts de plus de 10 cm. La somme de ces morceaux est divisée par la longueur totale du forage. Ce paramètre est défini comme suit :

$$\text{RQD (\%)} = \frac{\sum \text{longueurs de morceaux de plus de 100 mm}}{\text{longueur totale de la cours}} 100 \quad \text{.....1}$$

Deere et al. (1967) ont montré que l'indice RQD est utile pour déterminer le facteur de réduction du module de déformation entre la roche intacte et le massif fracturé. Deere (1968) a établi une relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif. Cette relation est souvent présentée sous forme de tableau ci-dessous [1]

Tableau I-2 : Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux

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

Priest et Hudson (1976) ont proposé une méthode alternative pour estimer l'indice **RQD** en utilisant l'espacement des joints mesuré sur la surface exposée du massif rocheux. Ils ont établi une relation entre cet espacement (en joints par mètre) et l'indice RQD, permettant d'évaluer la qualité du massif en fonction des fractures observées.

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1) \quad \text{……..2}$$

Palmström (1982) propose une méthode pour estimer l'indice RQD en l'absence de forage, basée sur le nombre de joints ou de discontinuités par unité de volume et la somme volumétrique des joints (Jv) du massif rocheux.

$$RQD = 115 - 3,3Jv \quad \text{…….3}$$

$$\text{Pour } Jv < 4,5 \text{ le } RQD = 100$$

Le système de classification RQD repose sur des forages géologiques standards et se distingue par sa simplicité, sa rapidité d'acquisition et son faible coût. Cependant, il doit être interprété comme un indicateur de la qualité du massif lorsque la roche présente des caractéristiques problématiques, comme un haut degré de détérioration, un comportement ductile, une zone de cisaillement ou un massif fracturé (Deere et Deere, 1988). Cela signifie que l'indice RQD évalue uniquement la partie intacte du massif rocheux, sans prendre en compte les zones fracturées ou altérées.[1]

I.2.2 Indice de la masse rocheuse (RMR) Rock Mass Rating

La classification RMR a été développée par Bieniawski en 1973 au South African Council of Scientific and Industrial Research (SACSIR). Elle repose sur l'étude de plusieurs centaines de tunnels, principalement réalisés dans des roches sédimentaires à profondeur modérée. Pour utiliser cette classification, il est nécessaire de diviser le site en régions géologiquement homogènes, chaque région étant ensuite classée séparément. Le RMR est calculé en additionnant cinq notes de caractérisation (de A1 à A5) ainsi qu'une note d'ajustement.

Dans la classification RMR, la valeur finale, comprise entre 0 et 100 pour le massif rocheux, est surtout déterminée par la fracturation (plus de 70%), tandis que les propriétés de la matrice rocheuse et la présence d'eau influencent chacune à hauteur de 15%.[1]

La signification des indices du RMR sont définis comme suit :

- A1 (Strength of intact rock material) : la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse, qui peut être déterminée soit par une procédure d'écrasement d'un échantillon, soit par une méthode de chargement ponctuel. La note attribuée varie de 0 à 15.

- A2 (Rock QualityDesignation - RQD, Deere [1964]) : Cette note évalue la qualité des carottes de sondage en calculant le rapport entre la longueur cumulée des carottes intactes, supérieures à 10 cm, et la longueur totale de la carotte. La note attribuée varie de 3 à 20 .
- A3 (Spacing of discontinuities) : En cas de présence de plusieurs familles de fractures, c'est la note minimale attribuée à l'espacement des fractures qui est considérée. La note attribuée varie de 5 à 20.
- A4 (Conditions of discontinuities) : Cet indice évalue les caractéristiques des discontinuités, telles que leur extension, leur ouverture, leur rugosité, le matériau de remplissage et l'altération des épontes. (note: de 0 à 30).
- A5 (Groundwater conditions) : évalue les conditions hydrogéologiques du massif en mesurant le flux d'eau ou les pressions interstitielles dans les joints, avec une note de 0 à 15.
- B (Adjustment for joint orientation) : est un facteur correctif qui évalue l'impact de l'orientation des 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).

Les sommes des cinq premiers indices caractérisent le RMR de base. Quand aux travaux souterrains, il faut ajouter l'effet du facteur correctif. Le RMR_{89}s'écrit alors :

$$\mathbf{RMR} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 4$$

Le système RMR ne prend pas en compte l'état de contrainte in-situ, la rugosité des fractures, l'angle de frottement du matériau de remplissage, ni les roches gonflantes. Il est principalement utilisé pour les massifs rocheux où la résistance de la matrice est bonne et où les discontinuités dominent le comportement du massif.

La version 1976 du système de classification (RMR_{76}) l'utilisation du RMR se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants et leurs pondérations.[1]

- A1:Résistance en compression uni axiale de la roche intacte.
- A2:RockQuality Index (RQD).
- A3:Espacement des diaclases.
- A4:Condition des joints.
- A5:L'état d'infiltration d'eau souterraine.
- A6:Orientation des discontinuités

$$RMR_{76} = A1 + A2 + A3 + A4 + A4 + A6 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 4$$

Tableau I-3 : Classification du massif rocheux selon le RMR; traduit de Bieniawski.[1]

Classe du massif	RMR	Qualification
I	81-100	Excellente
II	61-80	Bonne
III	41-60	Moyenne
IV	21- 40	Faible
V	< 20	Très faible

I.2.3 Évaluation de la masse de la pente (SMR) Slope Mass Rating

Le système SMR de Romana (1985) évalue la stabilité des pentes rocheuses en ajustant le RMR de Bieniawski, en tenant compte de l'effet des joints, de la pente et de la méthode d'excavation.

$$SMR = RMR_{BASE} + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad \text{.....5}$$

Où RMR de base est évaluée selon Bieniawski (1979, 1989) en ajoutant les évaluations de quatre paramètres. F1, F2, F3 sont des facteurs d'ajustement liés à l'orientation des joints par rapport à l'orientation des pentes, et F4 est le facteur de correction.[1]

- Le facteur **F1** est déterminé empiriquement et dépend du parallélisme entre les directions des joints et des talus. Ce facteur peut varier de 1 (lorsque les deux directions sont presque parallèles) à 0,15 (lorsque l'angle entre les deux dépasse 30°, ce qui réduit considérablement la probabilité de rupture).

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

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

- Le facteur **F2** dépend du pendage des joints dans le cas du mode de rupture plan. Les valeurs de F2 varient de 1 (pour des joints ayant un pendage supérieur à 45°) à 0,15 (pour des joints ayant un pendage inférieur à 20°). En cas de rupture par "toppling", le facteur reste égal à 1. Ce facteur a été déterminé empiriquement par l'équation suivante :

$$F2 = \tan^2 \beta j$$

βj : le pendage des joints

- Le facteur **F3** est lié à la relation entre la pente du talus et le pendage des joints. Ce paramètre varie également en fonction du type de rupture, nécessitant une distinction entre une rupture plane et une rupture par "toppling".

- Le facteur **F4** se rapporte à l'adaptation de la méthode de l'excavation il comprend de coupe creusée par pré-découpage, grenaillage lisse, grenaillage normal, pauvre dynamitage et d'excavation mécanique:

Pentes naturelles: Elles sont généralement plus stables en raison de l'érosion de longue date et des mécanismes de protection intégrée, tels que la végétation et la croûte de dessiccation. Dans ce cas F4 = 15.

Grenaillage normal appliqué dans des conditions de méthode : Cette méthode n'affecte pas la stabilité des pentes, donc F4 = 0.

Déficience ou dommages à la stabilité des pentes : Lorsque la méthode d'excavation entraîne des dommages à la stabilité des pentes, F4 = -8.

Excavations mécaniques des pentes : Généralement, en cas de déchirure, la roche très fracturée est souvent combinée avec des explosifs préliminaires. Le plan de la pente est difficile à maintenir et cette méthode n'affecte ni n'améliore la stabilité de la pente, donc F4 = 0. [1]

Tableau I-4 : le Tableau de classification de Romana [1]

TYPE OF FAILURE			VERY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	UNFAVORABLE	VERY UNFAVORABLE
P	A	$\lvert\alpha_j-\alpha_s\rvert$	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
T	A	$\lvert\alpha_j-\alpha_s-180\rvert$	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
W	A	$\lvert\alpha_j-\alpha_s\rvert$	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
P/T/W	**F_1**		**0.15**	**0.40**	**0.70**	**0.85**	**1.00**
P/W	B	$\lvert\beta_j\rvert$ ó $\lvert\beta_i\rvert$	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
P/W	**F_2**		**0.15**	**0.40**	**0.70**	**0.85**	**1.00**
T	**F_2**		**1.00**				
P	C	$\beta_j-\beta_s$	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)
W	C	$\beta_j-\beta_s$	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)
T	C	$\beta_j+\beta_s$	<110°	110-120°	>120°	-	-
P/T/W	**F_3**		0	-6	-25	-50	-60

EXCAVATION METHOD (F_4)			
Natural slope	+15	Blasting or mechanical	0
Presplitting	+10	Deficient blasting	-8
Smooth blasting	+8		

P: planar failure; T: toppling failure; W: wedge failure.

Selon les valeurs SMR, Roman (1985) a défini cinq classes de stabilité Ceux-ci sont décrits dans le tableau Il a déduit du tableau que les pentes avec une valeur inférieure à 20 SMR peu échouer très rapidement. Aucune pente n'a été enregistrée avec une valeur de SMR en dessous de 10, parce que cette pente ne pourrait exister physiquement.

Tableau I-5 : Les différentes classes de stabilité par la valeur du SMR[1]

Classe	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Description	Très mauvaise	Mauvaise	Normal	Bonne	Très bonne
Stabilité	Complètement instable	Instable	Partiellement stable	Stable	Complètement stable
Chute	Grand plan, sol ou circulaire	Plane	Grand plan	Chute de blocs	Pas de chute
Probabilité de chute	0.9	0.6	0.4	0.2	0

De nombreuses mesures correctives peuvent être prises pour soutenir une pente. L'étude détaillée de l'ingénierie est nécessaire pour stabiliser une pente. Les systèmes de classification peuvent nous donner les techniques habituelles pour chaque classe différente des supports comme indiqué dans le Tableau suivant :

Tableau I-6 :les suggestions de soutènement selon la classe du SMR [1]

Classe de SMR	Valeur de SMR	Suggestion de soutènement
Ia	91-100	Aucun
Ib	81-90	Scaling
IIa	71-80	Boulonnage
IIb	61-70	Système de boulonnage
IIIa	51-60	Boulonnage systématique et béton projeté
IIIb	41-50	Boulonnage systématique, ancrage, béton projeté et mur de soutènement
IVa	31-40	Béton projeté renforcé, mur de soutènement ou excavation et drainage
IVb	21-30	Béton projeté renforcé, mur de soutènement ou excavation et drainage profond
V	11-20	Mur ancré, excavation

I.2.4 Indice de résistance géologique GSI (Geological Strength Index)

Introduit par Hoek - Brown en 1995, le GSI est un nombre sans dimension, déterminé empiriquement, il varie entre 5 et 85, et qui peut être estimé à partir d'un examen de la

qualité de la masse rocheuse in situ. La méthode GSI s'appuie donc sur une observation directe de la structure du massif rocheux.

Tableau I-7 : Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI [2]

Valeur du GSI	76-85	56-75	41-55	21-40	<20
Qualité du massif rocheux	Très bonne	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise

I.2.5 Indice d'évaluation des talus rocheux (Slope Quality Index "SQI")

Malgré l'existence de divers systèmes de classification prenant en compte certains aspects de la stabilité des pentes, il demeure nécessaire d'avoir un système plus complet qui intègre un plus grand nombre de facteurs influençant l'analyse de la stabilité des pentes rocheuses. C'est ainsi qu'un nouveau système, appelé "Slope Quality Index (SQI)", a été développé pour intégrer un large éventail de facteurs internes et externes, liés à la qualité et à la stabilité des pentes.

Ce système repose sur celui de Liu et Chen (2007), mais avec l'ajout de plusieurs facteurs et paramètres supplémentaires. Chaque facteur a un poids spécifique, et les valeurs du SQI varient de 1 à 5, représentant respectivement des conditions de qualité de pente allant de très bonnes à très mauvaises. Cette approche permet à la fois une évaluation qualitative et quantitative de la qualité des pentes.[2]

Tableau I-8 : Système SQI pour les pentes rocheuses : classification qualitative et quantitative.[2]

SQI	**État de la pente**
[1; 1,4]	Très bien
[1,5; 2,4]	Bon
[2,5; 3,4]	Moyen
[3,5; 4,2]	Mauvais
[4.3; 5]	Très mauvais

- **Concept :**

Le système SQI vise principalement à calculer un indice basé sur neuf facteurs distincts, directement ou indirectement liés à la stabilité des pentes. Ce système comprend également d'autres sous-systèmes d'évaluation destinés à classer certains de ces neuf facteurs. Pour déterminer la valeur appropriée de chaque facteur, plusieurs paramètres doivent être d'abord évalués dans une fourchette de 1 à 5, la même échelle que celle

utilisée pour le SQI, afin de garantir la cohérence du calcul. Enfin, pour obtenir l'indice final du SQI, les différents facteurs sont pondérés en fonction de leur importance.[2]

- **Pondération du facteur :**

Étant donné que l'impact de chaque facteur sur l'évaluation de la stabilité des pentes varie, chaque facteur est associé à un coefficient de pondération qui reflète son importance et son niveau d'influence. Ainsi, le SQI offre une évaluation quantitative de la qualité de la pente et de l'urgence d'une intervention, tout en identifiant les paramètres clés sur lesquels l'intervention devrait se concentrer pour maximiser son efficacité sur la stabilité de la pente.[2]

Tableau I-9 : Facteurs et paramètres pris en compte dans le système SQI. [2]

Facteur	Paramètre
Géométrie	Hauteur et inclinaison de la pente et largeur du banc
Géologique	Systèmes de classification empirique (RMR, SMR ou Q). Type de formation et risque de chute de pierres
Système de drainage	Système de drainage en surface et en Système de drainage profondeur (état d'existence et de conservation)
Inspections	Évaluation de l'état d'entretien et de Inspections conservation
Surveillance	Résultats des systèmes de surveillance, y compris les inclinomètres, les marques topographiques, les piézomètres, etc.
Environnement	Existence de surcharges (maisons, etc.) et de vibrations possibles (travaux, etc.)
Historique	Historique des accidents sur la pente et des interventions
Protection	Protection de surface (grillage métallique, boulons, etc.) et couverture végétale
Environnement/circulation	Zone sismique, précipitations et trafic

Commentaire sur les systèmes de classification :

Les classifications quantitatives des massifs rocheux fracturés sont utilisées depuis plusieurs décennies pour la conception et la construction d'ouvrages dans ces massifs. Elles reposent sur la connaissance des paramètres décrivant la qualité du massif rocheux et combinent les différents paramètres mesurés sur le site pour attribuer une note à la qualité du massif. Ces méthodes sont particulièrement utiles lors de l'avant-projet. Cependant, elles présentent certaines limitations, que l'on résume ci-dessous :

- Les paramètres de classification sont appliqués de manière universelle à tous les types de massifs rocheux, sans tenir compte des caractéristiques spécifiques de chaque massif ou du projet envisagé.
- Les propriétés complexes du massif, telles que son anisotropie et son comportement différé (dépendant du temps), ne sont pas prises en compte. Les paramètres de déformabilité et de résistance sont donc relatifs à un milieu isotrope.
- La notion de Volume Elémentaire Représentatif (VER) n'est pas intégrée dans ces classifications.
- En général, ces méthodes empiriques simplifiées ne prennent pas en compte les mécanismes de rupture, de déformation et l'interaction entre le support et la roche.
- Le RMR n'est pas adapté au cas de roches tendres. [1]

I.3 Étude des discontinuités

Pour étudier le comportement mécanique d'un massif rocheux, il est essentiel de connaître son degré de fracturation ainsi que la répartition des discontinuités dans l'espace. Des mesures in situ permettent de définir les diverses familles de discontinuités et leurs paramètres de façon statistique. 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. Donc, pour ajuster les lois de distribution d'une famille, il faut distinguer cette famille dans l'ensemble des discontinuités. La méthode classique de classification est celle de la projection stéréographique. L'objectif principal d'une étude géométrique des discontinuités est de déterminer :

• Si elles sont classables en familles (orientations voisines)

• Si elles structurent le massif rocheux en blocs (continuité et connectivité importante).[3]

I.3.1 Classification des discontinuités

Tout massif rocheux, indépendamment de son histoire et de sa localisation, présente des discontinuités. Celles-ci peuvent être visibles ou invisibles, cimentées ou non, mais elles sont toujours présentes. Elles partagent des caractéristiques communes : une faible résistance au cisaillement, une résistance à la traction négligeable et une grande conductivité hydraulique, surtout en comparaison avec la matrice rocheuse environnante.

On distingue généralement quatre grandes familles de discontinuités, par exemple pour les falaises calcaires [1]

I.3.2 Les joints de stratification

Ce sont des joints qui segmentent régulièrement le massif en bancs parallèles, dont l'épaisseur varie selon la nature des séquences de dépôt et leur mode de mise en place. La stratification engendre ainsi des discontinuités de grande extension.

I.3.3 Les diaclases

Ce sont des discontinuités de faible extension, généralement intra-bancs, sans déplacement relatif des épontes. Dans les roches sédimentaires de couverture, les diaclases résultant des différentes phases de déformation (notamment le plissement de la roche) sont généralement perpendiculaires aux bancs.

I.3.4 Les failles

Ce sont des discontinuités caractérisées par un déplacement relatif des épontes, résultant d'épisodes de déformation. Les failles présentent généralement une grande extension (continuité).

I.3.5 Les fractures

Ce sont des discontinuités de forte extension, généralement intra-bancs sans déplacement relatif des épontes.

I.4 Paramètre géométrique des discontinuités

La modélisation de la distribution spatiale et de l'emplacement des familles de fractures dans un massif rocheux fracturé repose principalement sur la connaissance des paramètres géométriques des discontinuités, associés à une variable aléatoire dont les lois de distribution sont dérivées des données collectées sur le terrain. Dans ce qui suit, nous définirons brièvement chacun de ces paramètres.[3]

I.4.1 Nombre de familles des discontinuités

Les discontinuités sont généralement organisées en familles (discontinuités parallèles). Le nombre de familles de discontinuités peut atteindre jusqu'à cinq. Typiquement, une famille de discontinuités découpe le massif rocheux en plaques, 2 familles perpendiculaires découpent la roche en colonnes et 3 en blocs.

Plus de 3 familles découpent la roche en de formes variées et de coins.

Tableau I-10 : La description suggérée par ISRM [3]

I	Massives, fractures aléatoires occasionnelles
II	Une famille de discontinuités
III	Une famille de discontinuités plus fractures aléatoires
IV	Deux familles de discontinuités
V	Deux familles de discontinuités plus fractures aléatoires
VI	Trois familles de discontinuités
VII	Trois familles de discontinuités plus fractures aléatoires
VIII	Quatre familles de discontinuités
IX	Quatre familles de discontinuités plus fractures aléatoires

Les propriétés mécaniques du massif rocheux sont influencées par les familles. Plus le nombre de familles est grand, plus les possibilités de glissements potentiels sont grandes.[1]

I.4.2 L'orientation (direction)

L'orientation d'une discontinuité est définie par la direction et le pendage de son plan moyen, mesurés sur le terrain à l'aide d'une boussole géologique, que ce soit sur des affleurements, des parois de gradins ou de galeries. Le **pendage** est l'angle entre la ligne de plus grande pente et l'horizontale, compris entre 0 et 90°.

La **direction** est l'angle entre l'horizontale du plan de discontinuité et le Nord magnétique. En mécanique des roches, le **vecteur pendage** est préféré, représentant l'angle entre la projection horizontale de la ligne de plus grande pente du plan et le Nord magnétique.

La direction et l'azimut sont mesurés dans le sens des aiguilles d'une montre : la direction de 0 à 180° et l'azimut de 0 à 360° pour tenir compte de l'orientation du vecteur pendage.[4]

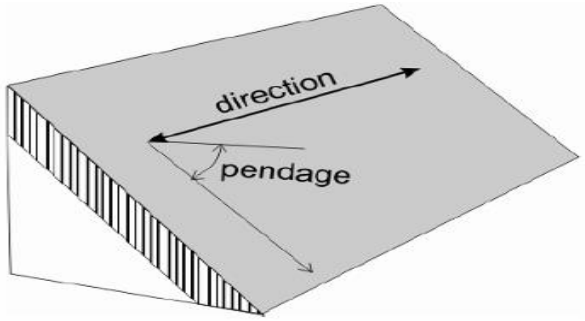


Figure. I.1 : Définition de la direction et le pendage .[4]

I.4.3 L'espacement

C'est la distance moyenne qui sépare deux intersections successives d'une ligne droite, appelée également ligne d'échantillonnage, avec les traces de fractures d'un affleurement. (Wyllie et al, 2004). Cette grandeur dépend de la ligne de levé et de l'extension des discontinuités.

En effet, pour un nombre constant de traces sur une surface, les traces longues ont plus de chances d'être intersectées par la ligne de levé et paraissent plus rapprochées.[4]

Tableau I.11 : Description de l'espacement des discontinuités [4]

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

I.4.4 La persistance

La persistance est la longueur de la trace de l'intersection (ou l'extension spatiale) d'une discontinuité sur la surface topographique. Elle peut être mesurée directement en observant les longueurs des traces des discontinuités sur les affleurements.

La persistance est un facteur clé dans l'évaluation des systèmes de glissements à grande échelle, des ruptures de pente en marches d'escalier, ainsi que dans la conception de fondations de barrages et l'excavation de tunnels. [2]

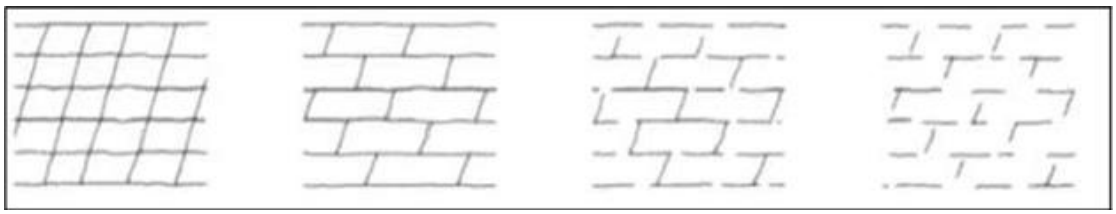


Figure I-2 : Persistance de différents ensembles de fractures [2]

Tableau I-12 : La persistance description suggérée par l'ISRM [2]

La description suggérée par l'ISRM	Longueur de la trace (m)
Persistance très faible	< 1
persistance faible	1 – 3
Persistance moyenne	3 – 10
Persistance élevée	10 – 20
Persistance très élevée	> 20

I.4.5 Rugosité et ondulation

Une discontinuité est une interface entre deux surfaces en contact, qui peuvent être lisses ou rugueuses. La rugosité de la surface de la discontinuité mesure les irrégularités à petite échelle et les ondulations à grande échelle de cette surface. La rugosité influence

principalement la résistance au cisaillement de la discontinuité, ce qui a un impact direct sur la stabilité des blocs rocheux.

Pour décrire la rugosité, il convient d'utiliser les termes suivants :

- Très rugueuse : la surface est très rugueuse et présente d'importantes aspérités visuelles, semblables à du gravier fin ou de calibre moyen.
- Rugueuse : lorsqu'on passe la frôle du doigt, la surface est rugueuse comme du papier de verre à gros grains. Les aspérités peuvent être visuelles.
- Légèrement rugueuse : la surface est rugueuse comme du papier de verre à grain plus fin. Les aspérités ne sont pas visibles à l'œil nu.
- Lisse : la surface est plutôt lisse, comme du papier.
- Miroir de faille : la surface est très lisse, voire polie, et présente une striation due à un déplacement en cisaillement. [2]

I.4.6 L'ouverture et remplissage

L'ouverture correspond à la distance perpendiculaire entre les épontes de la discontinuité, Ce paramètre affecte largement la perméabilité des discontinuités et par suite leur comportement hydraulique. La détermination de l'ouverture est limitée souvent aux relevés examinés directement sur un affleurement ou sur des carottes de sondages. Il est très rare que les deux surfaces d'une discontinuité soient en contact, généralement il existe un espace entre elles appelé ouverture qu'elle soit remplie d'air, d'eau (joint ouvert) ou avec des matériaux de remplissage (Schroeder, 2010). En général, les propriétés du matériel de remplissage affectent la résistance au cisaillement, la déformabilité et la perméabilité des discontinuités.

On peut distinguer :

- Matériaux tendres : qui peuvent être rayés à l'ongle ou essuyés à la main (argile, sable) ;
- Matériaux durs : qui ne peuvent être rayés à l'ongle (minéraux comme la calcite, le quartz, etc.).[4]

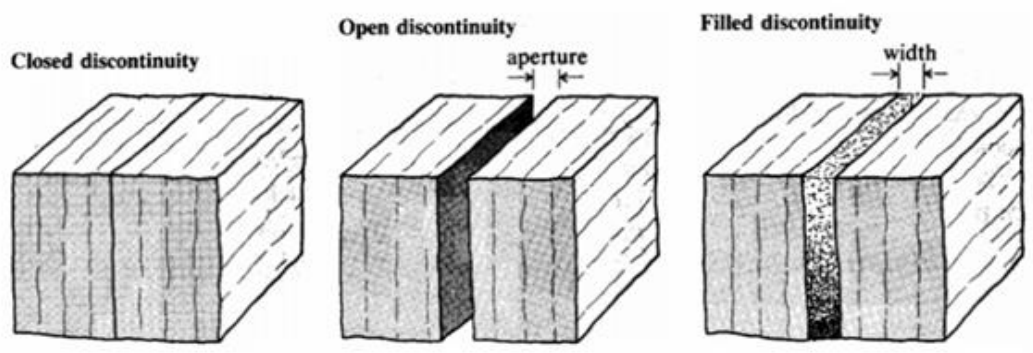


Figure. I.3 : L'ouverture et remplissage d'une discontinuité. [4]

Tableau I-13: La description d'ouverture [2]

Ouverture	Description	
<0,1 (mm)	Très étroit	Dispositif fermé
0,1 - 0,25 (mm)	Etroit	
0,25 - 0,5 (mm)	Partiellement ouvert	
0,5 - 2,5 (mm)	Ouvert	Dispositif espacé
2,5 - 10 (mm)	Largement ouvert	
1 - 10 (cm)	Très largement ouvert	Dispositif ouvert
10 – 100 (cm)	Extrêmement largement ouvert	
>1 m	Caverneux	

I.5 Conclusion

La caractérisation géomécanique des massifs rocheux joue un rôle fondamental dans la réussite des projets d'ingénierie en milieu rocheux. Elle permet de comprendre le comportement du massif à travers l'analyse des propriétés physiques et mécaniques, des discontinuités, ainsi que par l'utilisation de systèmes de classification appropriés. Ces données sont essentielles pour anticiper les risques, dimensionner les ouvrages, et choisir les méthodes de soutènement les plus adaptées. En résumé, cette démarche assure une conception fiable, sécurisée et durable des infrastructures ancrées dans la roche.

Chapitre II

II.1. Introduction

Dans le cadre de l'évaluation approfondie de la stabilité des gradins d'une mine à ciel ouvert.

Ce chapitre présente une analyse approfondie des facteurs géologiques, hydrologiques et géotechniques influençant la stabilité des gradins d'une mine à ciel ouvert. Il examine la localisation géographique, la lithostratigraphie, la tectonique, ainsi que les conditions hydrologiques et géotechniques locales. L'étude inclut également l'évaluation des propriétés physiques et mécaniques des formations géologiques, obtenues par des essais en laboratoire et sur site.

II.2 cadre géographique

II.2.1 Situation géographique de djebel OUENZA

La région de Djebel Ouenza est située au Nord-Est de l'Algérie. Il se trouve à 150 km au Sud de la ville d'Annaba, à 83 km au Nord de la ville de Tébessa et à 15 km de la frontière algéro tunisienne, sur la route nationale n°82 qui relie Tébessa à Souk-Ahras. Le massif de Djebel Ouenza est situé dans la région des monts de Mellègue, qui fait partie du diapyrisme triasique de l'Atlas Saharien oriental, formé dans son ensemble par une structure anticlinale orienté Sud-Ouest Nord-Est. Cette structure est formée par les sédiments du Mésozoïque du Tertiaire et du Quaternaire.

Le gisement ferrifère de l'Ouenza repose sur le flanc nord d'un massif montagneux qui culmine à 1288 m au niveau du pic, il est d'environ de 12km de longueur sur 5km de largeur. Les amas métallifères se présentent sous la forme de mamelons grossièrement elliptiques. Ils comprennent successivement du nord-est au sud-ouest : le Koudiat Douamis, Koudiat Hallatif, la région des conglomérats, le quartier Sainte-barbe, le gisement de Chagoura (Nord, Sud, Pic) et le Koudiat ez Zergua. Le minerai affleure sur des longueurs atteignant parfois 250 mètres et des hauteurs de 45 mètres, réalisant les conditions types pour l'exploitation à ciel ouvert (CHAIN. R, 2006). [5]



Figure II-1 : Situation géographique d'EL OUENZA. Google Earth

II.2.2 Quartier Zergua

Le chantier Zergua est formé par une colline, dénommée Koudiat ez Zergua située à environ 3,5 km au Sud-Ouest du centre-ville de l'Ouenza. Ce quartier est une partie de la terminaison de l'axe minéralisé du gisement de fer de l'Ouenza. Il est situé immédiatement au Sud-Est du Chagoura Sud de Djebel l'Ouenza entre le Chabet es-Sennguet au Nord et le cours supérieur de l'oued-el-Djebs au Sud.

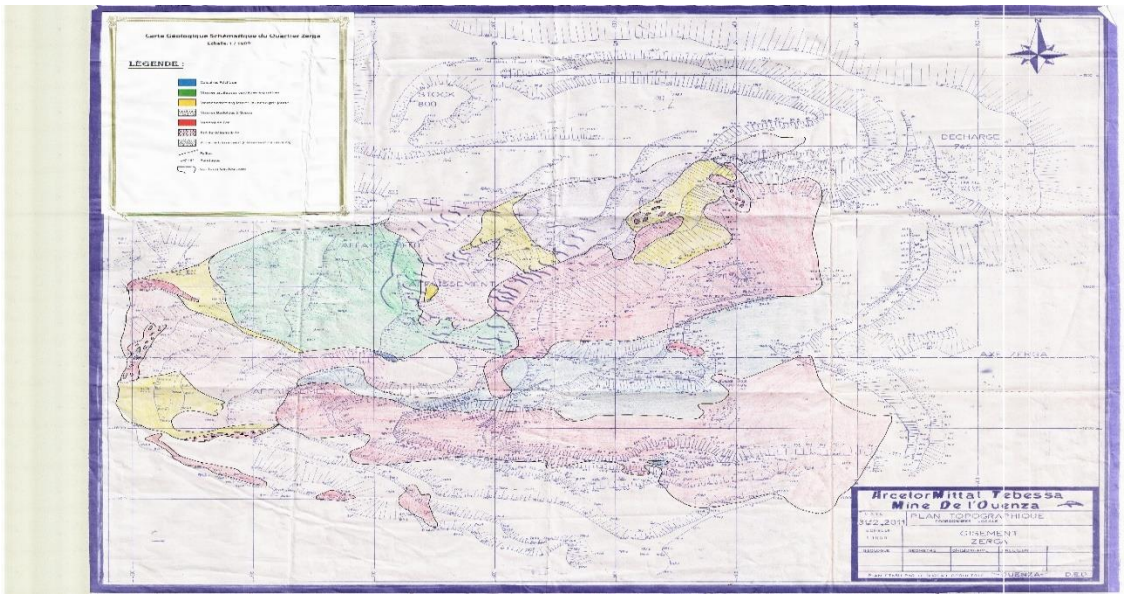


Figure II-2 : Carte géologique schématique du quartier Zergua. (DED)

II.3 Cadre géologique

II.3.1 la géologie régionale

Le massif de l'Ouenza est compris entre le Tell et l'Atlas Saharien. Il appartient à la zone des hautes plaines, constituée par des calcaires Aptiens effondrés qui affectent la forme de dômes coupés de failles, ce massif renferme d'importants gisements de minerai de fer.

Les Monts constitutifs de cette région, sont dits « Monts de Mellegue » (G. Dubourdieu, 1956). Ce sont des anticlinaux ou des synclinaux perchés. Ils ne constituent pas de chaînons continus, mais des reliefs isolés et souvent escarpés. Ils surgissent comme des îles au-dessus des régions basses faiblement ondulées ou rigoureusement uniformes.

La région est caractérisée par des reliefs élevés. L'altitude maximale est observée au niveau du Djebel Ouenza qui culminait à 1288m avant l'exploitation. Elle avoisine actuellement les 1225m.[2]

II.3.2 la stratigraphie : L'échelle stratigraphique de la région de Djebel Ouenza a été établie par G. DUBOURDIEU (1956). En se basant sur des travaux anciens, nous nous

contenterons de donner un bref résumé sur la lithostratigraphie rencontrées dans les différents étages géologiques de cette partie des monts de Mellègue. Cette région est caractérisée par les formations datées du Trias. Jurassique, Crétacé, Éocène, Miocène et Quaternaire.[5]

A- Le Trias :

Dans la région des monts de Mellègue les formations les plus anciennes rencontrées à l'affleurement appartiennent au Trias. Il s'agit essentiellement des marnes bariolées à gypse qui renferment également des dolomies et calcaires dolomitiques, à fins lits microquartziques ainsi que des grés rouges. Les formations triasiques ont été remontées en surface grâce à des phénomènes diapiriques prenant une extension remarquable au Nord-Est du Djebel Ouenza où on peut les suivre sur prés de Vingt Kilomètre. Dans ce Trias diapirique, il n'est pas possible d'établir de succession lithologique valable au sein des affleurements toujours disloqués et chaotiques. En certains endroits de la région, quelques éléments de roches éruptives de types « Ophite » se trouvent emballés dans les masses marno-gypseuses des structures diapiriques.[5]

B- Le Jurassique :

Les dépôts du Jurassique n'ont pas été observés jusqu'à présent dans la région de l'Ouenza. Toute fois Dubourdieu (1956) a signalé dans le « Socle » de la série carbonatée de l'Ouenza (secteur Conglomérat) la présence d'une brèche gypsifère sédimentaire renfermant de gros débris de calcaires dolomitiques avec des fossiles radiolaire que l'on peut dater du Jurassique ou au Crétacé inférieur.[5]

C- Le Crétacé :

Le Crétacé inférieur est représenté par les étages suivants :

C-1 Le Crétacé inférieur

C-1-1 Barrémien

Il affleure dans l'anticlinal de Sidi Embareka au Nord-Est de Djebel Ouenza (Dubourdieu, 1956). Il est constitué de marnes grises et jaunes non fossilifères, intercalés par des calcaires argileux, noduleux. Sa puissance est de 200m en moyenne (Dubourdieu ; 1956). [5]

C-1-2 L'aptien

Il affleure sur des vastes surfaces, et de ce fait il devient le plus remarquable dans la région. Les dépôts de l'Aptien sont distribués surtout dans les bandes soulignées par les diapirs, dans le noyau des anticlinaux, et dans d'autres horsts de la région. Ils sont étudiés en détail par rapport à leur rôle de milieu encaissant pour la mise en place de minéralisations polymétallique et ferrifère. [10]

C-1-3 Albien

L'Albien est marqué par une faune riche en Ammonites. Durant l'Albien supérieur, la couverture albo-aptienne est percée par le Trias, entraînant le redressement des couches et la complexité des structures (plis évasés, plis en champignon, etc..) , généralement

scellées par le Vraconien (Othmanine, 1987 et Bouzenoune, 1993). L'Albien se caractérise par des marnes argileuses dans la partie inférieure, des calcaires argileux dans la partie moyenne et des marnes noires dans la partie supérieure. Dubourdieu, (1956) a étudié plusieurs massifs de la région de l'Ouenza. Il a démontré que les calcaires aptiens sont surmontés par des marnes datées de l'Albien inférieur par des Ammonites. La puissance des dépôts albiens est d'environ 400 – 500 m.[5]

C-1-4 Vraconien

Il est généralement transgressif sur le Trias à l'Ouenza (Thibieroz et Madre, 1976) et sur l'Aptien au Djebel Slata (Smati, 1986) et au Djebel Hmeimet (Othmamine,1987). Il est composé totalement de marno- calcaires gris, bleus, séparant des petits bancs de calcaires et vers le bas des marno- calcaires très gréseux de 500m d'épaisseur.[5]

C-2 Crétacé supérieur

Le Crétacé supérieur comprend les étages suivants :

C-2-1 Cénomanien

Il est constitué de marnes argileuses verdâtres, caractérisées par des intercalations de la calcite fibreuse. Dubourdieu. (1959) a distingué la présence de deux assises : L'assise inférieure qui est formée par des marnes jaunes avec des marno-calcaires blancs feuilletées, et l'assise supérieure constituée des calcaires argileux, gris blancs avec quelques niveaux de calcaires gris noirs. La puissance du Cénomanien est de 600 à 900 m.[5]

C-2-2 Turonien

Les formations du Turonien n'affleurent qu'à Koura Ouenza aux environ de l'Ouenza. Elles constituent les flancs des grands anticlinaux et synclinaux. Elles sont présentées par des calcaires marneux en plaquettes gris- foncé à noir, et à la base, avec de la matière organique et de rares concentrations pyritiques et marcacitiques. Ces calcaires caractérisent stratigraphiquement le Cénomanien supérieur et le Turonien inférieur. Le Turonien supérieur est caractérisé par le développement des faciès marno-calcaires. La puissance totale du Turonien est de 150 à 250 m.[5]

C-2-3 Coniacien

L'épaisseur des dépôts de cet étage vari de 270 à 280 m de marnes gris-bleu avec quelques intercalations marno-calcaires blanches qui contiennent des fragments de tests d'inocérames.[5]

C-2-4 Santonien

II est constitué de marnes de couleur gris-bleu, alternant avec de petits bancs de calcaires marneux blanc-ocres, un peu crayeux, qui contiennent des inocérames et des ammonites. Deux ou trois lentilles calcaires qui apparaissent dans le Santonien à l'Ouest du plateau d'EI Guessâat, représentent un faciès calcaire de ce niveau.[10]

C-2-5 Campanien

Le Campanien de la région de l'Ouenza est représenté par des marnes argileuses de couleur gris foncée, des calcaires blancs a intercalation de petits bancs de marnes gris claires, avec une puissance moyenne d'environ 500 à 600 m.[5]

C-2-6 Maëstrichtien

Il est remarqué par des calcaires blancs bien lités, d'environ 60m d'épaisseur, recouverts par une très forte accumulation de marnes argileuses grises a noires 150m ces dernières admettent à leur base quelques intercalations de calcaires. [2]

D- paléogène

D-1 Eocène

L'Eocène inférieur et moyen sont représentés par des calcaires à silex et des calcaires à Nummulites, près des périmètres des Monts de Mellègue, avec une puissance de 200 m.[5]

E- néogène

E-1 Miocène

Le Miocène inférieur et moyen présentent des dépôts qui reposent transgressivement sur les formations d'âge albien-sénonien et même sur le Trias. Il s'agit d'une accumulation de marnes et de grès. A leur base, les formations miocènes comportent des conglomérats contenant des éléments de calcaires variés, de silex gris, des galets ferrugineux et des éléments empruntés au Trias, témoignant d'une activité diapirique (Bouzenoune, 1993), avec une épaisseur moyenne de 150m (Dubourdieu, 1956).[5]

F- Le Quaternaire

Il est caractérisé par des dépôts qui se répartissent dans les parties basses des reliefs et couvrent des surfaces importantes. Il renferme des croûtes de calcaires, limons, éboulis, cailloutis et poudingues avec une épaisseur de 10 à 30 m dans les fossés (Dubourdieu ; 1956).[5]

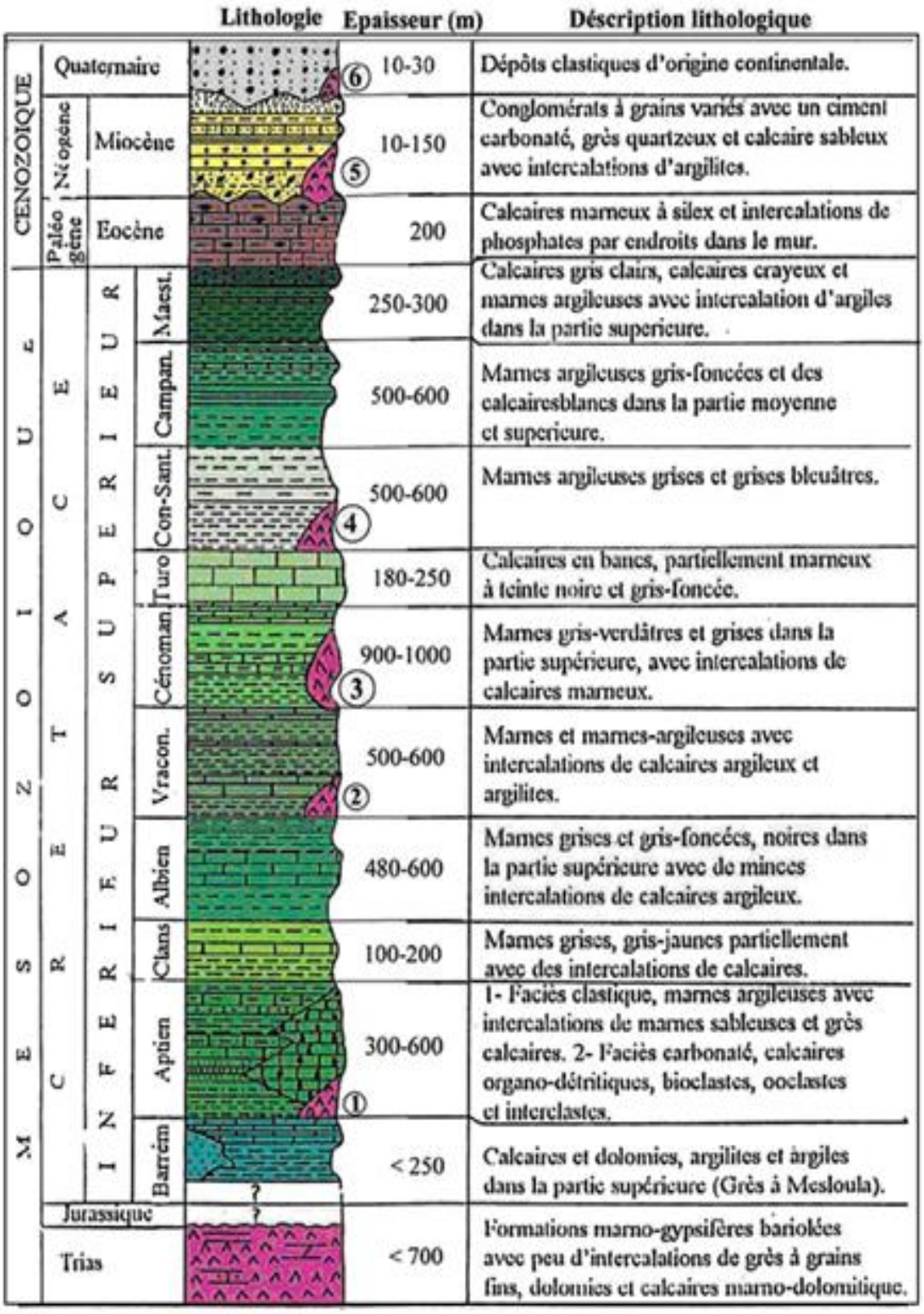


Figure II-3 : Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue (d'après : Dubourdieu 1956, 1959 ; David 1956 ; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thibieroz et Madre 1976 ; Chikhi, 1980 ; Otmanine 1987, Bouzenoune 1993 et Vila et al, 2000) [5]

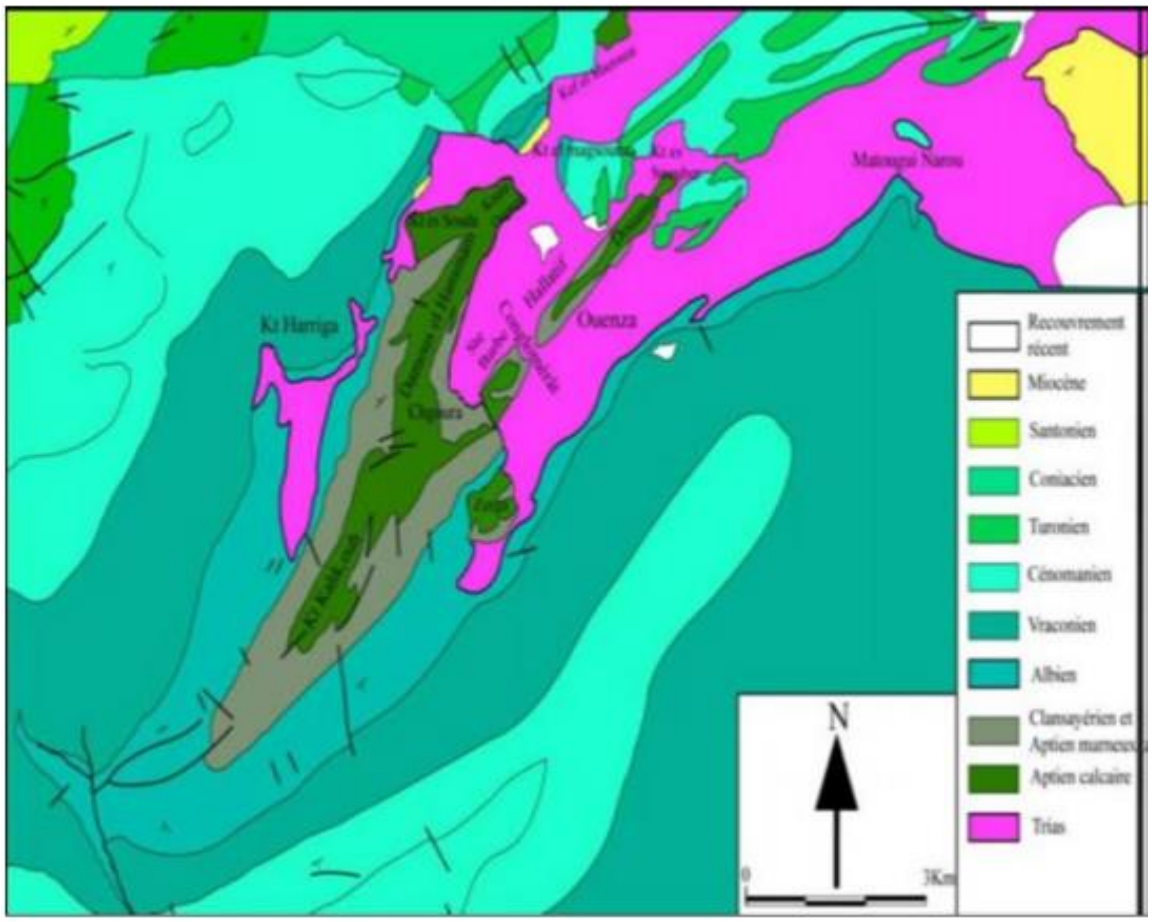


Figure II-4 : Carte géologique du massif de l'Ouenza (Dubourdieu, 1956).[6]

II.3.3 la Géologie de Quartier Zergua

La colline de Zergua occupe, au Sud-Est du Pic, un îlot ceinturé par le Trias, Répartis par des contacts tectoniques. Le contact Trias-marnes albiennes est parfois jalonné par des lambeaux de brèches minéralisées en barytine et oxydes de fer dont l'attribution à l'Aptien (ROUVIER, 1990).

La structure de Koudiat ez Zergua est simple en apparence : elle est constituée par un monoclinal de calcaires aptiens dont certains niveaux ont été remplacés par du minerai de fer. Des affleurements de marnes en continuité avec ce monoclinal affleurent au Sud. Les calcaires aptiens sont recoupés par une minéralisation filonienne essentiellement à fluorite et barytine. Les bancs calcaires du monoclinal sont très dressants (80° à 90°) ; leur direction est constante sur l'ensemble du massif (75° Nord). La fracturation est représentée par une faille majeure de direction 90°N qui jalonne, à l'Ouest, le contact Trias-Aptien. En contrebas de la carrière elle fait apparaître des marnes albiennes qui viennent au contact des calcaires transformés en minerai oxydé. [5]

II.4 Le Cadre tectonique

La tectonique dans la région d'Ouenza est beaucoup plus complexe que celle de plusieurs régions Le Dj de Ouenza est un anticlinal à direction NE-SO avec une terminaison périclinale dans la partie SO. Dans la partie SO (en bas du pic) cette forme

est occupée par une dislocation affaissante. Cette structure anticlinale ayant une longueur de 4km et une largeur de 2km, sur le domaine de la structure anticlinale d'Ouenza nous observons deux grandes dislocations tectoniques.[18]

II.4.1 Les principales modalités de la tectonique

II.4.1.1 La subsidence

Après le Trias, les terrains les plus anciens reconnus dans la région de l'Ouenza sont datés du Barrémien.

Au cours de Crétacé la tendance générale qui caractérise le bassin de l'Atlas Saharien est une subsidence considérable, rapide et continue (près de 5000m de sédiments post-aptiens) entraînant des poussées horizontales de direction NE- SW. Cette subsidence est suivie d'un bombement sous-marin formant des hauts- fonds de direction NE- SW qui sont induits par l'activité diapirique à partir des fractures profondes du socle Masse et al, (1982) et Bouzenoune, (1993).[5] [6]

II.4.1.2 le diapyrisme

Les diapirs représentent l'une des principales caractéristiques de l'Atlas saharien oriental. A l'affleurement ils sont allongés sur une bande de 80 km environ, de direction NE-SW. Le diapirisme est contrôlé par le fluage et l'ascension (Perthuisot, 1988).[6]

a) Le fluage

L'écoulement fluide des évaporites est d'autant plus important que la température soit élevée, il est pratiquement réalisé aux alentours de 300° C pour le sel gemme et à des températures plus basses pour les sels potassiques ou les sulfates hydratés.[6]

b) L'ascension

Elle est assurée par la densité, il s'agit d'une migration verticale du matériel plastique jusqu'à une altitude qui dépend du rapport des densités. Cette migration ne peut se faire sauve si la densité du matériel plastique est inférieure à la densité globale de la couverture, on appelle ce phénomène « Halocinèse ». En Algérie, la série triasique n'est connue que partiellement en surface. Des roches du Trias affleurent à la faveur d'extrusions soit, sous forme de masses chaotiques où dominent le gypse, les argiles et les dolomies, soit organisées en unités stratifiées localisées plutôt sur lesplans des structures.

Les chlorures, signalés dans le salifère principal du Nord-Est saharien (Busson et Cornet, 1989), sont présents dans la région du Mellègue dans la partie enracinée du diapir de l'Ouenza. Les pointements triasiques, très nombreux dans la région, sont localisés dans la partie Nord-Est de l'Ouenza, (Dubourdieu, 1964 et Madre, 1969) et Sud-Ouest de Boukhadra et au cœur de Djebel Mesloula.[6]

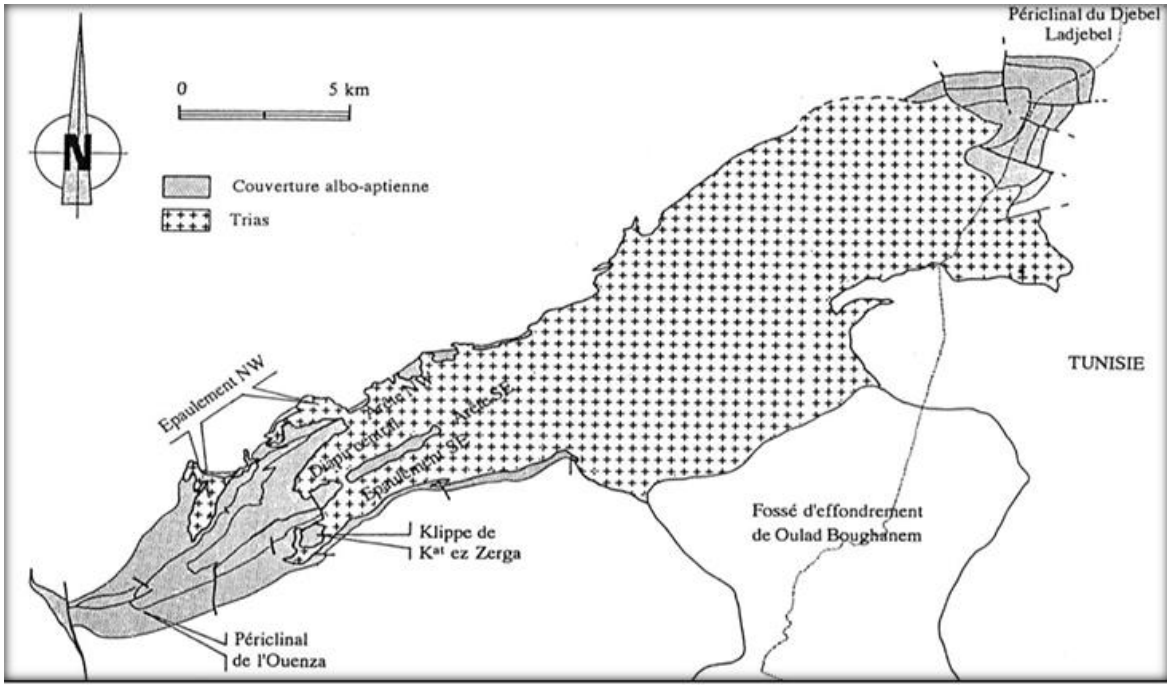


Figure II-5 : Diapir de l'Ouenza ceinturé par des séries crétacées qui dessinent au Sud-Ouest la fermeture périclinale du massif de l'Ouenza au Nord-Est celle de Djebel Ladjebel (d'après A. BOUZENOUNE, 1993) [5]

II.4.1.3 les Plissements

L'ensemble des formations sédimentaires a été plissé suivant une direction NE-SW. Ces plis anticlinaux souvent percés dans leurs charnières par le Trias-diapirique. Ils sont généralement relayés par des vastes structures synclinales. D'après (Dubourdieu, 1956), la série du Mellègue a été plissée au cours du Paléogène (Eocène supérieur-Oligocène).[6]

II.4.1.4 la tectonique cassante

En dehors des accidents de faible ampleur et de directions diverses, les structures anticlinales sont recoupées par deux systèmes de failles : - Le premier système est constitué par des failles principales ou bien ce qu'on appelle les failles majeures orientées, en principe, subparallèlement aux axes des anticlinaux sous l'effet du plissement. Les couches tendres se plissent et les couches dures se cassent au niveau des pendages des roches qui sont subverticaux à inverses. Ce système est orienté suivant deux directions tectoniques majeures : Nord-est (30°-60°) et Nord-Ouest (280° 320°). - Les failles du deuxième ordre, sont caractérisées par des rejets importants et des pendages de l'ordre de 60° de direction Est-Ouest. Elles sont presque perpendiculaires aux failles principales, et parfois, elles les regroupent, ce qui favorise des concentrations métallifères.[6]

II.4.1.5 Fossé d'effondrement

Les confins algéro-tunisiens, sont représentés par des fossés d'effondrements de direction N O -SE et E-O, qui sont bordés par des accidents majeurs, qui sont formés par des dépôts plio-quaternaires avec une puissance de 170m dans le fossé de Tébessa-

Morsott (Dubourdieu et al., 1950) et environ 300 m dans celui de Kasserine (Zouari, 1984 ; Durozoy, (1950) ; Castany, (1951 et 1954) ; Dubourdieu, (1956); David, (1956); Kazi Tani (1986); Othmanine (1987). Ils sont considérés ces fossés d'effondrements comme étant le résultat d'une intense activité tectonique distensive post-miocène inférieure. Alors que les premières manifestations sont enregistrées au Crétacé et l'effondrement majeur a eu lieu au Pliocène, selon Bismuth, (1973) ; Chihi, (1984) ; Chihi et al. (1984 et 1991) ; Ben Ayad et al. (1991).[6]

II.5 Cadre hydrogéologique

II.5.1 L'hydrogéologie

Le comportement hydrogéologique des terrains existants à Ouenza se résume comme suit :

Les terrains triasiques contenant du gypse et du sel, du fait de leur hétérogénéité, sont perméables. Les eaux qui y circulent deviennent saumâtres et ne peuvent convenir qu'à l'utilisation industrielle.

Les calcaires s'ils sont fissurés permettent l'infiltration des eaux et même leur circulation. Les marnes qui forment malheureusement la plus grande surface affleurant dans la région sont imperméables et toute les eaux de pluie ruissellent ou s'évaporent. Les intercalations calcaires peu épaisses ne permettent pas le captage que d'une quantité infime d'eau.

Les terrains quaternaires toujours peu épais n'ont de ce fait aucune importance hydrogéologique.

Les aquifères connus à l'Ouenza sont : Douamis (descenderie de captage ZI) et Conglomérat (descenderie de captage ZII) qui forment probablement un seul bassin aquifère. Les surfaces respectives d'impluvium sont de 20 à 40 ha, pour une pluviométrie annuelle de 400mm d'eau. Douamis à elle seule reçoit 80000 m3 et les autres chantiers 16000 m3

À Douamis, où le coefficient d'infiltration est compris entre 13.4% et 20% (détermination expérimentale ancienne) seuls 10000 à 16000 m3 peuvent s'y infiltrer.

En dehors de la source thermale de Hammam Sidi Yahia et de quelques suintements à la base des grès miocènes et de quelques sources dans les oueds, les points d'eau naturelle sont rares. La ville de l'Ouenza est alimentée récemment par le sondage d'Ain Chania. La mine pour ses besoins en eau potable des chantiers puisent celle-ci du sondage de souda.[Kar]

II.5.2 Réseaux hydrographique

Le relief hydrographique est assez dense, bien développé, peut abondant en eau, les principauxcours d'eau sont Oued Mellègue et Oued Kseub, leurs débit n'est pas permanant et dépend de la saison et la quantité de précipitatil

Ces deux Oueds délimite Ouenza comme suite

- Au SW deux Oueds, Meskiana et Chabro se joignent pour former Oued Mellègue qui longe la limite Nord de la ville.
- Au Sud, le bassin versant entouré par Dj. Ouenza et Dj. Boukhadra donne naissance à l'Oued Kseub (limite sud de l'Ouenza) qui diverse ses eaux dans l'Oued Mellègue a la limite de la frontière algéro-tunisienne.[8]

II.6 Climatologie

II.6.1 Climat

L'influence des facteurs climatiques sur les formations géologiques semble très importante, ces facteurs ont un impact d'une façon ou d'une autre, directement ou indirectement sur le relief en modifiant les caractéristiques physiques et chimiques des roches et du sol, cela prouve que la climatologie possède une stricte liaison avec la géotechnique.[8]

II.6.2 : Précipitation et température

Les données sur la température et la précipitation qu'on dispose, sont des valeurs moyennes mensuelles et annuelles, mesurées à la station de Tébessa sur une période allant de 1969 à 2007.

Remarque : à cause du manque des données et d'informations dans la station météorologique de l'Ouenza, nous avons exploité les données climatiques de la station de Tébessa.[5]

Au cours d'une période de 38 ans, il a été observé que la température moyenne atteint un maximum de **27,31°C** au mois de juillet, tandis qu'elle atteint son minimum en janvier avec une moyenne de **6,44°C**. Cette variation témoigne d'un climat marqué par des étés chauds et des hivers froids.

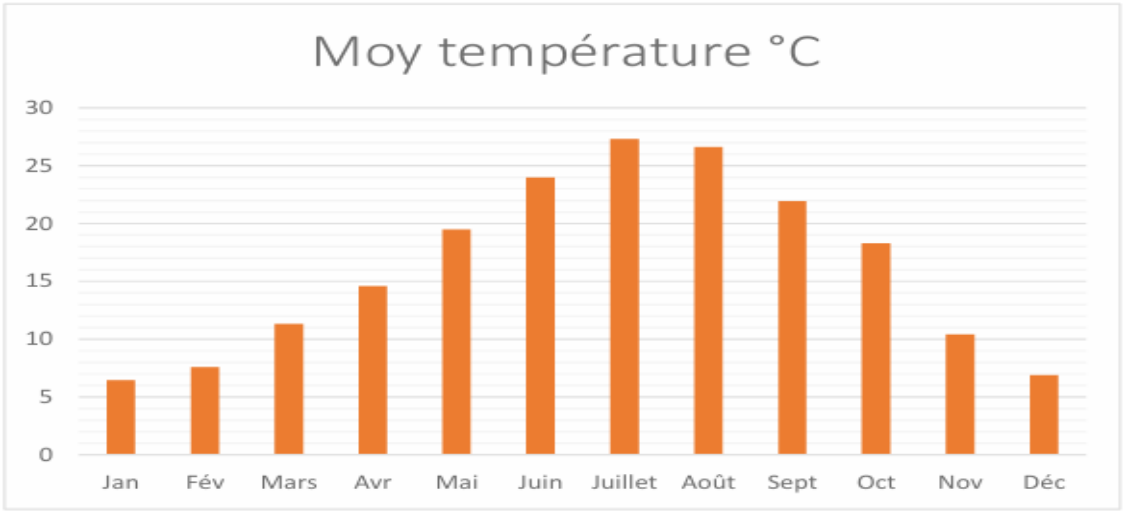


Figure II-6 : Les moyennes mensuelles des températures exprimées en (°C) de la station de Tébessa (1969-2007). [5]

En termes de précipitations, la région de Tébessa connaît un maximum au mois de mars avec 40,90 mm, tandis que le mois de juillet enregistre le minimum avec seulement

13,44 mm. En moyenne, la quantité de précipitations annuelles dans la région est d'environ 361,05 mm. Ces chiffres indiquent une distribution des précipitations plus abondante au printemps et une période estivale relativement plus sèche.

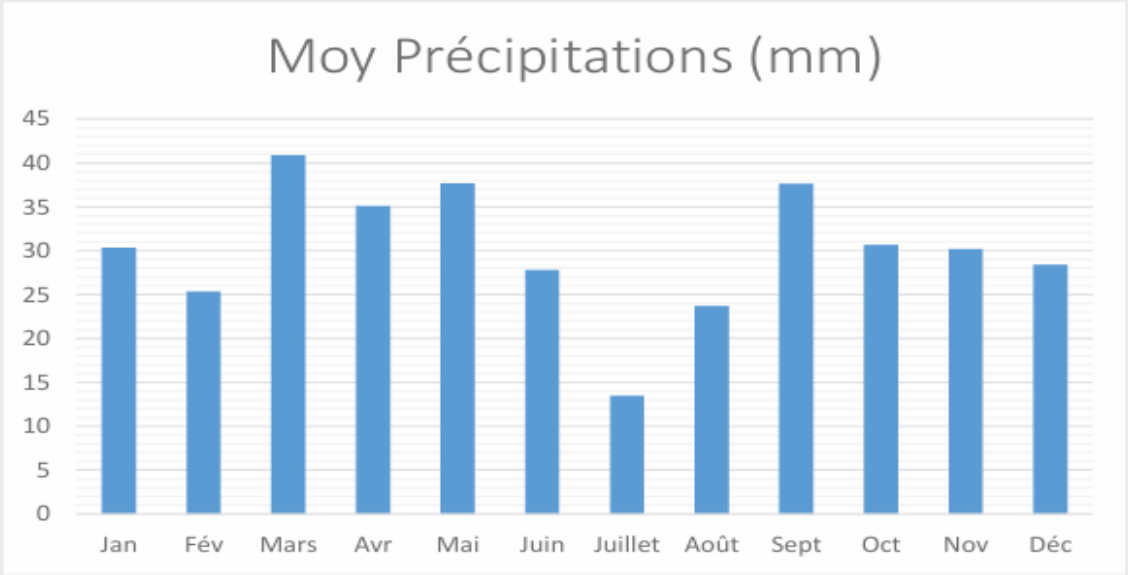


Figure II-7 : Les moyennes mensuelles des précipitations exprimées en (mm) de la station de Tébessa (1969-2007). [5]

En conclusion, on peut affirmer que le site étudié se situe dans une région au climat continental semi-aride, caractérisé par deux périodes distinctes : une période froide et humide qui s'étend de l'automne à l'hiver, et une période chaude et sèche qui couvre le printemps et l'été.

II.7 Reconnaissance géotechnique

II.7.1 Essai en laboratoire

Les propriétés physico-mécaniques des roches sont le point clé pour comprendre le comportement des massifs rocheux.

Il a un rôle majeur dans la stabilisation du terrain. Parmi les propriétés physiques, les plus importantes sont :La teneur en eau, La masse volumique, la porosité, densité et la dureté...etc.

Parmi les propriétés mécaniques : la résistance à la compression, la résistance à la traction et la résistance au cisaillement…etc.

- **La teneur en eau**

Le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec[13]

$$\mathbf{W = E/P_s = (P_h - P_s)/P_s}$$

Avec :

- **E** : Poids d'eau dans le matériau.
- **Ps** : Poids du matériau sec.
- **P_h** : Poids du matériau humide.

Les résultats de calcul la teneur en Eau sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau II.1: Les résultats de calcul la teneur en Eau

Échantillon	Fer			Calcaire			Marne		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Poids humide + Tare (g)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Eau (g)	2,2	2,4	2,5	2	2,6	2	1,8	2,3	2
Poids sec (g)	97,8	97,6	97,5	98	97,4	98	98,2	97,7	98
Teneur en Eau %	2,24	2,45	2,56	2,04	2,66	2,04	1,83	2,35	2,04
Moy%	2,41			2,24			2,07		

- **La masse volumique**

Est une mesure qui indique combien de matière (masse) il y a dans un certain volume. En général, plus un matériau est dense, plus il est "lourd" pour un même volume.[12]

- **La masse volumique absolue** : est la masse d'un matériau solide pur divisée par son volume réel, sans tenir compte des pores ou des vides. Elle mesure la compacité propre de la matière.

Les résultats de calcul la masse volumique absolue sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Les résultats de calcul la masse volumique absolue

Échantillon	Fer			Calcaire			Marne	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse d'échantillon (g)	67,8	92,8	71,8	68,1	25,9	70,9	73,3	119,8
Echantillon + paraffine (g)	73,1	101,1	78,9	77,9	32,5	80,3	83,7	131,9
Masse de paraffine (g)	5,3	8,3	7,1	9,8	6,6	9,4	10,4	12,1
Volume de paraffine (cm^3)	6,02	9,43	8,06	11,13	7,5	10,68	11,81	13,75
Volume d'eau (cm^3)	500	500	500	500	500	500	500	500
Volume eau +échant+paraf	530	550	530	540	520	535	550	570
La masse vol (g/cm^3)	2,86	2,28	3,27	2,35	2,07	2,91	1,91	2,12
Moy	2,8			2,4			2	

- **La masse volumique apparente** : est la masse d'un matériau rapportée à son volume total, y compris les vides et les pores. Elle s'applique surtout aux matériaux non compacts comme les poudres ou les sols.

Tableau II.3 : Les résultats de calcul la masse volumique apparente

Échantillon	**Fer**			**Calcaire**			**Marne**	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse d'échantillon (g)	66	56,5	88,3	71,1	26	68,1	79,3	124,6
Volume d'eau (cm^3)	500	500	500	500	500	500	500	500
Volume d'eau+ échantillon (cm^3)	520	530	540	530	510	520	530	560
Volume absolue d'échantillon (cm^3)	20	30	40	30	10	20	30	60
La masse vol (g/cm^3)	3,3	1,8	2,2	2,3	2,6	3,4	2,6	2
Moy	2,4			2,7			2,3	

II.7.2 Essai in situ

- **Scléromètre**

Le principe de cet appareil est basé sur le principe de Schmidt qui consiste à placer la tige contre la surface à tester, en appuyant fortement sur le manchon, on fait pénétrer la tige dans l'ouvrage, jusqu'au moment ou un déclic se produit, libérant une masse qui frappe la tige contre la surface.[11]

Le tableau suivant représente quelque valeur du Scléromètre :

Tableau II.4 : Les valeurs du Scléromètre

	Fer	Calcaire	Marne
1	18	35	9
2	24	38	14
3	23	34	10
4	24	29	7
5	20	31	11

- **Le pendage et direction**

- La direction correspond à l'orientation horizontale de la fissure, exprimée par un angle azimutal mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord géographique (0° ou 360°).
- Le pendage est l'angle formé entre la fissure et un plan horizontal, mesuré dans la direction maximale d'inclinaison. La figure suivante représentée section 03 gradin01 :



Figure II-8 : La section 07 /gradin 01

Le tableau suivant représente les résultats de la projection pour l'une des stations étudiées :

Tableau II.5 : les résultats de la projection (G1/S07)

Direction (°)	**Pendage (°)**	**Direction (°)**	**Pendage(°)**	**Direction (°)**	**Pendage(°)**
345	45	20	40	30	80
345	32	10	70	20	40
10	40	10	70	350	60
310	75	350	50	20	60

II.8 : Conclusion

La zone d'étude, correspondant au massif de la mine à ciel ouvert d'El Ouenza, est principalement constituée de formations géologiques issues des périodes mésozoïque et cénozoïque, comprenant le Trias, le Jurassique, le Crétacé, l'Éocène, le Miocène et le Quaternaire. Située dans un climat semi-aride à faible précipitation, cette région présente un contexte géologique varié.

Le massif de Djebel Ouenza est situé dans la région des monts de Mellègue, qui fait partie du diapyrisme triasique de l'Atlas Saharien oriental, formé dans son ensemble par une structure anticlinale orienté Sud - Ouest Nord - Est

Les résultats des essais en laboratoire révèlent que la marne et le minerai de fer affichent une résistance à la compression très faible, inférieure à 25 MPa, alors que le calcaire se distingue par une résistance moyenne, comprise entre 25 et 50 MPa, le rendant plus solide que les autres formations géologiques présentes dans la région.

Chapitre III

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons les différents systèmes de classification des massifs rocheux, tels que le RQD, le RMR, le SMR, le GSI et le SQI. Ces outils permettent d'évaluer la qualité du massif rocheux et d'analyser la stabilité des gradins en fonction des faciès géologiques rencontrés (marne, fer et calcaire) dans le massif d'El Ouenza, au niveau du quartier Zergua.

III.2 Rock Quality Designation (RQD):

Deere (1964) a introduit l'indice RQD (Rock Quality Designation) pour évaluer la qualité du massif rocheux. Cet indice est calculé à partir des carottes de forage géologique, en prenant en compte uniquement les morceaux de roche intacts de plus de 10 cm. La somme de ces morceaux est divisée par la longueur totale du forage. Ce paramètre est défini comme suit :[9]

$$\text{RQD (\%)} = \frac{\sum \text{longueurs de morceaux de plus de 100 m}}{\text{longueur totale de la cours}} \times 100$$

Tableau III.1 : RQD de Deere.

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

Tableau III-2 : les résultats de RQD des différentes sections /GRADIN 01.

Gradin 01							
Section	**Line de trace**	**RQD%**	**RQD moy %**	**Section**	**Line de trace**	**RQD %**	**RQD moy %**
01	**01**	**78**	**78**	**06**	**01**	74	73
	02	**81**			**02**	75	
	03	**76**			**03**	72	
02	**01**	**79**	**80**	**07**	**01**	73	81
	02	**82**			**02**	85	
	03	**81**			**03**	86	
03	**01**	**82**	**86**	**08**	**01**	76	75
	02	**81**			**02**	79	
	03	**97**			**03**	71	
04	**01**	**77**	**80**	**09**	**01**	<25	<25
	02	**78**			**02**	<25	
	03	**87**			**03**	<25	
05	**01**	**85**	**89**				
	02	**87**					
	03	**96**					

RQD % Calcaire	Varie de 77 et 97
RQD % Fer	Varie de 71 et 82
RQD %Marne	Inférieur à 25

Les résultats de RQD de gradin 02 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : les résultats de RQD des différentes sections /GRADIN 02.

Gradin 02							
Section	**Line de trace**	**RQD%**	**RQD moy %**	**Section**	**Line de trace**	**RQD %**	**RQD moy %**
01	**01**	**52**	**56**	**05**	**01**	43	45
	02	**50**			**02**	50	
	03	**68**			**03**	42	
02	**01**	**50**	**56**	**06**	**01**	<25	<25
	02	**59**			**02**	<25	
	03	**59**			**03**	<25	
03	**01**	**24**	**32**	**07**	**01**	<25	<25
	02	**49**			**02**	<25	
	03	**24**			**03**	<25	
04	**01**	**51**	**47**	**08**	**01**	<25	<25
	02	**52**			**02**	<25	
	03	**38**			**03**	<25	

RQD % Fer	Varie de 24 et 68
RQD % Marne	Inférieur à 25

Les résultats de RQD de gradin 03 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.4: les résultats de RQD des différentes sections /GRADIN 03.

Gradin 03											
Section	**Line de trace**	**RQD %**	**RQD Moy %**	**Section**	**Line de trace**	**RQD %**	**RQD Moy %**	**Section**	**Line de trace**	**RQD %**	**RQD moy %**
01	01	50	46	13	01	79	56	25	01	23	20
	02	47			02	57			02	23	
	03	43			03	33			03	16	
02	01	78	64	14	01	64	48	26	01	44	35
	02	58			02	62			02	26	
	03	56			03	20			03	16	
03	01	50	40	15	01	54	45	27	01	<25	<25
	02	53			02	51			02	<25	
	03	17			03	30			03	<25	
04	01	71	66	16	01	48	47	28	01	<25	<25
	02	69			02	62			02	<25	
	03	60			03	32			03	<25	
05	01	64	56	17	01	26	18	29	01	39	37
	02	53			02	14			02	33	
	03	52			03	16			03	40	
06	01	47	51	18	01	22	33	30	01	42	35
	02	57			02	46			02	44	
	03	51			03	33			03	21	
07	01	62	65	19	01	<25	<25	31	01	41	32
	02	70			02	<25			02	30	
	03	63			03	<25			03	24	
08	01	52	51	20	01	47	44	32	01	<25	<25
	02	56			02	46			02	<25	
	03	45			03	39			03	<25	
09	01	42	60	21	01	53	50	33	01	<25	<25
	02	71			02	49			02	<25	
	03	69			03	48			03	<25	
10	01	49	32	22	01	32	41	34	01	<25	<25
	02	22			02	43			02	<25	
	03	27			03	50			03	<25	
11	01	<25	<25	23	01	63	<25	35	01	<25	<25
	02	<25			02	39			02	<25	
	03	<25			03	40			03	<25	
12	01	30	32	24	01	<25	<25				
	02	32			02	<25					
	03	36			03	<25					

RQD % Calcaire	Varie de 14 à 79
RQD % Fer	Varie de 16 à 63
RQD % Marne	Varie de 16 à 44

Les résultats de RQD de gradin 04 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : les résultats de RQD des différentes sections /GRADIN 04.

Gradin 04							
Section	**Line de trace**	**RQD%**	**RQD moy %**	**Section**	**Line de trace**	**RQD %**	**RQD moy %**
01	**01**	**20**	**25**	**07**	**01**	16	**15**
	02	**24**			**02**	18	
	03	**31**			**03**	11	
02	**01**	**18**	**20**	**08**	**01**	<25	**<25**
	02	**23**			**02**	<25	
	03	**21**			**03**	<25	
03	**01**	**27**	**28**	**09**	**01**	09	**21**
	02	**46**			**02**	27	
	03	**13**			**03**	29	
04	**01**	**19**	**23**	**10**	**01**	<25	**<25**
	02	**21**			**02**	<25	
	03	**37**			**03**	<25	
05	**01**	**34**	**36**	**11**	**01**	<25	**<25**
	02	**34**			**02**	<25	
	03	**41**			**03**	<25	
06	**01**	**41**	**35**	**12**	**01**	<25	**<25**
	02	**28**			**02**	<25	
	03	**36**			**03**	<25	

RQD % Calcaire	Varie de 46 et 13
RQD % Fer	Varie de 41 et 11
RQD % Marne	Varie de 27 et 09

B- Présentation des résultats :

L'interprétation du résultat de chaque gradin est représentée dans le tableau suivant :

Tableau III.6 : Qualité de la masse rocheuse de Quartier Zerga.

"RQD" ZERGA			
	Calcaire	**Fer**	**Marne**
RQD moy %	**59**	**45**	**26**
Qualité de la masse rocheuse	**Moyenne**	**Pauvre**	**Pauvre**

III.3 Rock Mass Rating (RMR):

La classification RMR a été développée par Bieniawski en 1973 au Conseil sud-africain de la recherche scientifique et industrielle (South African Council of Scientific and Industrial Research (SACSIR)). Elle repose sur l'étude de plusieurs centaines de tunnels, principalement réalisés dans des roches sédimentaires à profondeur modérée. Pour utiliser cette classification, il est nécessaire de diviser le site en régions géologiquement homogènes, chaque région étant ensuite classée séparément. Le RMR est calculé en additionnant cinq notes de caractérisation (de A1 à A5) ainsi qu'une note d'ajustement.

Dans la classification RMR, la valeur finale, comprise entre 0 et 100 pour le massif rocheux, est surtout déterminée par la fracturation (plus de 70%), tandis que les propriétés de la matrice rocheuse et la présence d'eau influencent chacune à hauteur de 15%.[9]

La signification des indices du RMR sont définis comme suit :

- A1:Résistance en compression uniaxiale de la roche intacte.
- A2:Rock Quality Index (RQD).
- A3:Espacement des diaclases.
- A4:Condition des joints.
- A5:L'état d'infiltration d'eau souterraine.
- A6:Orientation des discontinuités

$$\mathrm{RMR}_{76} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6$$

Tableau III.7 : Paramètres de classification des roches et notes de pondération

Paramètre			Coefficient						
1	Résistance Delaroche	Indice Franklin	>8MPa	4-8 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Indicefranklinnon utilisable		
		Résistance à la compression	>200 MPa	100-200 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	10-25 MPa	3-10 MPa	1-3 MPa
	Note		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Note		20	17	13	8	3		
3	Espacementdesjoints		>3m	1-3 m	0.3-1m	50-300mm	<50mm		
	Note		30	25	20	10	5		
4	Naturedes joints		Surface très rugueuse continue éponteen contacte éponte non altéré	Surface légère rugueuse épaisseur <1mm éponte non altéré	Surfaces légères rugueuse s épaisseur <1mm Éponte altéré	Surfaces lustrées ou remplissag e<5mmou jointouvert 1 à 5mm joints continus	Remplissagemou>5mm ou joint Ouverts > 5 mm joints continus		
	Note		25	20	12	6	0		
5	Venuesd'eau	Débit10m	Aucunevenued'eau		<25 l/min	25-125 l/min	>25l/min		
		Pression d'eau contrainte principale	0		0.0-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Hydro géologie	Complètementsec		Suinteme nt (eau interstitie lle)	Pression d'eau modérée	Problèmesérieuxde venues d'eau		
	Note		10		7	4	0		

Tableau III.8 : Classification du massif rocheux selon le RMR; traduit de Bieniawski.

Classe du massif	RMR	Qualification
I	81-100	Excellente
II	61-80	Bonne
III	41-60	Moyenne
IV	21- 40	Faible
V	< 20	Très faible

A- **La classification du massif rocheux de chaque gradin par le système RMR**

Tableau III.9 : Exemple de classification/gradin 01

Roche	**Fer**	**Calcaire**	**Marne**
Rc (MPa)	**29,5**	**52,5**	**17**
Note	**4**	**7**	**2**
RQD %	**74**	**97**	**<25**
Note	**13**	**20**	**3**
Espacement des joints	**50-300 mm**	**50-300 mm**	**<50mm**
Note	**10**	**10**	**5**
Nature des jointes	Remplissage mou >5 mm ou joint Ouverts > 5 mm joints continus au Surfaces légères rugueuses épaisseur <1mm Éponte altéré.	Surfaces lustrées ou remplissage <5mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus au Surface légère rugueuse épaisseur<1 mm éponte non altéré	Remplissage mou >5mm ou joint Ouverts >5mm joints continus.
Note	**6**	**13**	**0**
Venues d'eau	**Aucune venue d'eau**	**Aucune venue d'eau**	**Aucune venue d'eau**
Note	**10**	**10**	**10**
RMR	**43**	**60**	**20**

Les résultats de RMR de gradin 01 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.10 : les résultats de RMR du défirent Sections de GRADIN 01

Section	**RMR**	**Section**	**RMR**	**Section**	**RMR**
01	**51**	**04**	**57**	**07**	**43**
	51		**57**		**47**
	51		**57**		**47**
02	**51**	**05**	**57**	**08**	**47**
	51		**57**		**47**
	51		**60**		**43**
03	**57**	**06**	**43**	**09**	**20**
	57		**43**		**20**
	60		**43**		**20**

RMR Calcaire	Varie de 60 à 57
RMR Fer	Varie de 51 à 47
RMR Marne	20

Les résultats de RMR de gradin 02 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.11 : les résultats de RMR des différentes sections / GRADIN 02

Section	RMR	Section	RMR	Section	RMR
01	**40,5**	**04**	**40,5**	**07**	**20**
	40,5		**40,5**		**20**
	40,5		**35,5**		**20**
02	**40,5**	**05**	**35,5**	**08**	**20**
	40,5		**40,5**		**20**
	40,5		**35,5**		**20**
03	**30,5**	**06**	**42**		
	35,5		**42**		
	30,5		**42**		

RMR Fer	Varie de 30,5 à 42
RMR Marne	20

Les résultats de RMR de gradin 03 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.12 : les résultats de RMR des différentes sections / GRADIN 03

Section	RMR	Section	RMR	Section	RMR	Section	RMR
01	**58**	**10**	**53**	**19**	**33**	**28**	**28**
	53		**48**		**33**		**28**
	53		**53**		**33**		**28**
02	**62**	**11**	**48**	**20**	**38**	**29**	**33**
	58		**48**		**38**		**33**
	58		**48**		**38**		**33**
03	**58**	**12**	**53**	**21**	**50**	**30**	**55**
	58		**53**		**45**		**55**
	48		**53**		**45**		**50**
04	**58**	**13**	**62**	**22**	**43**	**31**	**36**
	58		**62**		**48**		**36**
	58		**53**		**48**		**31**
05	**58**	**14**	**62**	**23**	**50**	**32**	**40**
	58		**62**		**45**		**40**
	58		**48**		**45**		**40**
06	**53**	**15**	**62**	**24**	**37**	**33**	**20**
	58		**62**		**37**		**20**
	58		**53**		**37**		**20**
07	**58**	**16**	**53**	**25**	**37**	**34**	**20**
	58		**62**		**37**		**20**
	58		**53**		**37**		**20**
08	**58**	**17**	**48**	**26**	**33**	**35**	**26**
	58		**43**		**33**		**26**
	53		**43**		**28**		**26**
09	**53**	**18**	**40**	**27**	**23**		
	58		**45**		**23**		
	58		**45**		**23**		

RMR Calcaire	Varie de 62 et 48
RMR Fer	Varie de 50 et 33
RMR Marne	Varie de 40 et 20

Les résultats de RMR de gradin 04 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.13 : les résultats de RMR des différentes sections / GRADIN 04

Section	RMR	Section	RMR	Section	RMR
01	**48**	**05**	**42**	**08**	**20**
	48		**42**		**20**
					20
	53		**42**		
02	**48**	**06**	**38**	**09**	**20**
	48		**46**		**25**
	48		**38**		**25**
03	**53**	**07**	**26**	**10**	**20**
	53		**26**		**20**
	48		**26**		**20**
04	**48**				
	48				
	48				

RMR Calcaire	Varie de 48 à 53
RMR Fer	Varie de 38 à 46
RMR Marne	Varie de 20 à 25

Présentation des résultats :

L'interprétation du résultat de chaque gradin est représentée dans le tableau suivant :

Tableau III.14 : les classes du massif rocheux de ZERGA

"RMR" ZERGA			
	Calcaire	**Fer**	**Marne**
RMR moy %	**52**	**39**	**22**
La classe de la roche	**03**	**04**	**04**
Qualité de la masse rocheuse	**Moyenne**	**Faible**	**Faible**

- Interprétation des résultats :

On constate que la moyenne des valeurs combinées des indices RMR et RQD pour les roches calcaires correspond à une qualité moyenne, tandis que celle des roches de fer et marne indique une qualité faibles

III.4 Représentation stéréographique :

Nous intègrerons les résultats des levés de fissuration réalisés section par section dans chaque gradin, puis on utilise le logiciel Dips 7 fondé sur la projection stéréographique pour analyser et visualiser les orientations des discontinuités identifiées sur le terrain.

III.4.1 La projection des pendages et direction des discontinuités de ZERGA :

Les figures suivantes illustrent les résultats de la projection stéréographique pour chaque gradin analysé :

La projection des pendages et direction des discontinuités section 01/ gradin 01 :

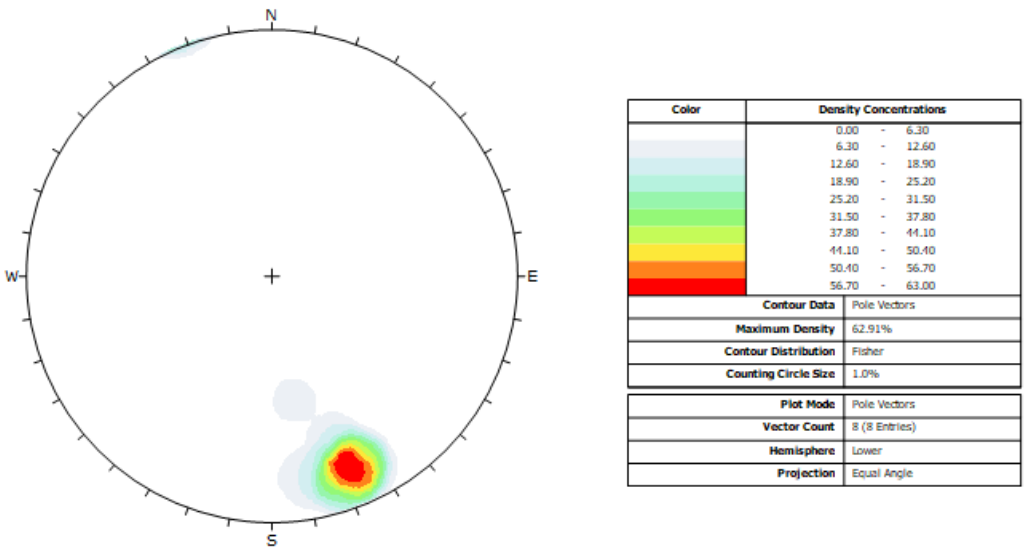


Figure III.1 : Projection stéréographique section 01/ gradin 01

La projection des pendages et direction des discontinuités section 01/ gradin 02 :

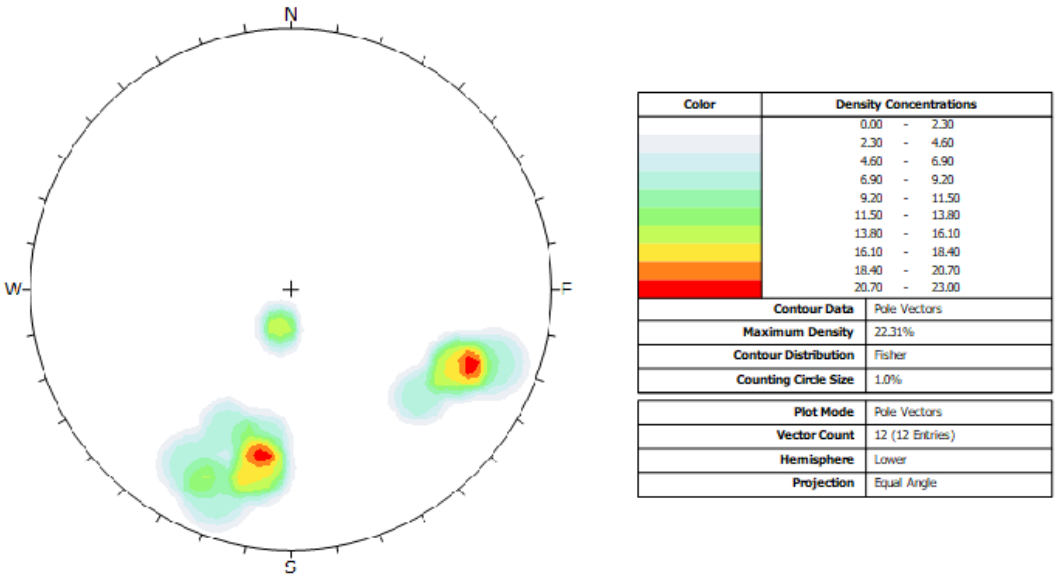


Figure III.2 : Projection stéréographique section 01/ gradin 02

La projection des pendages et direction des discontinuités section 01/ gradin 03 :

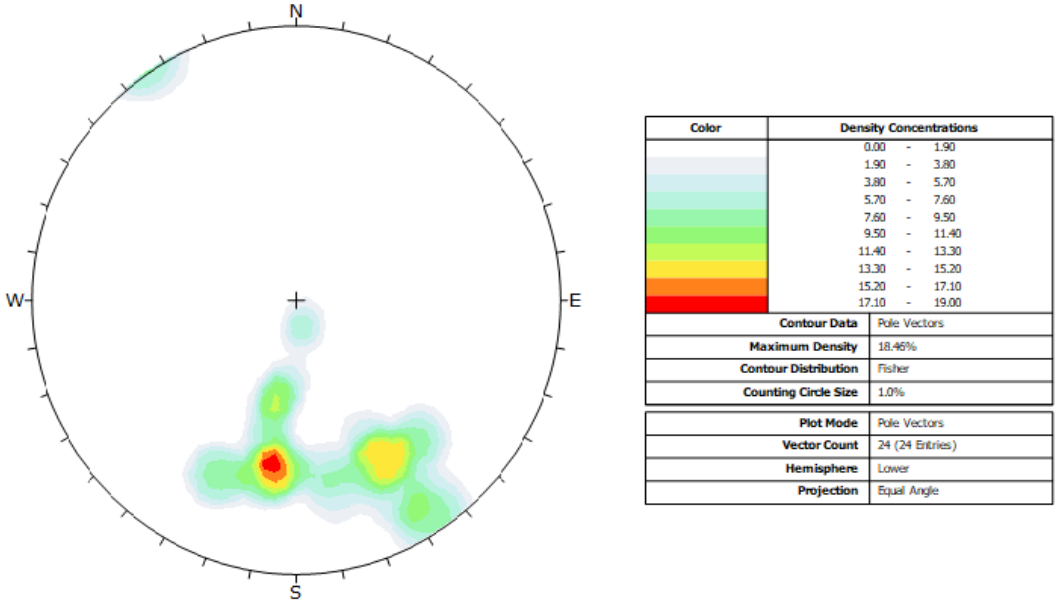


Figure III.3 : Projection stéréographique section 01/ gradin 03

La projection des pendages et direction des discontinuités section 01/ gradin 04 :

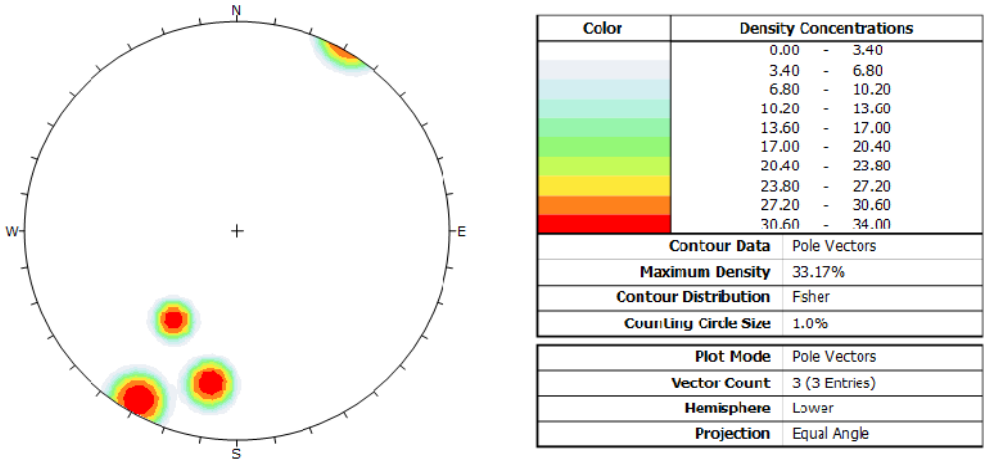


Figure III.4 : Projection stéréographique section 01/ gradin 04

III.4.2 Stabilité Geomécanique

Les figures suivantes illustrent les résultats de la stabilité Geomécanique pour chaque gradin analysé :

la stabilité Geomécanique section 01/ gradin 01 :

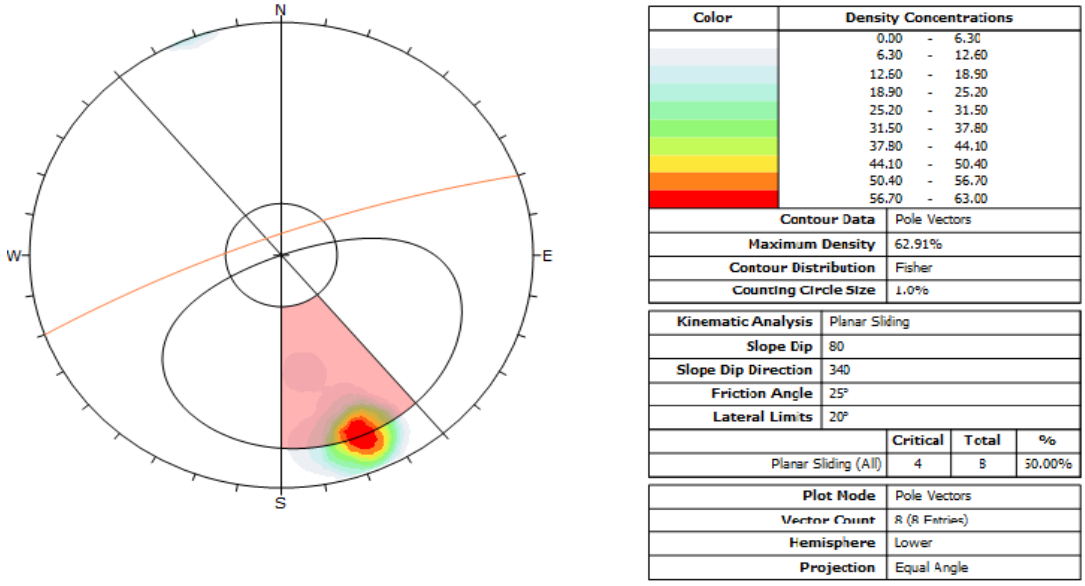
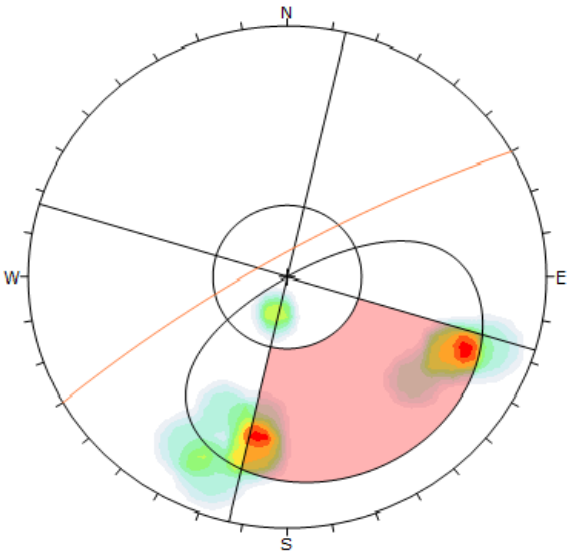


Figure III.5 : la stabilité Geomécanique section 01/ gradin 01

la stabilité Geomécanique section 01/ gradin 02 :



Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.30
	2.30 - 4.60
	4.60 - 6.90
	6.90 - 9.20
	9.20 - 11.50
	11.50 - 13.80
	13.80 - 16.10
	16.10 - 18.40
	18.40 - 20.70
	20.70 - 23.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	22.31%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

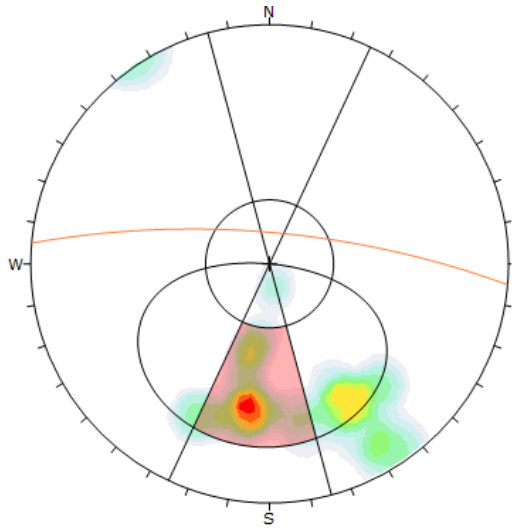
Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	80
Slope Dip Direction	330
Friction Angle	32°
Lateral Limits	43°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	6	12	50.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	12 (12 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figure III.6 : la stabilité Geomécanique section 01/ gradin 02

La stabilité Geomécanique section 01/ gradin 03 :



Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.90
	1.90 - 3.80
	3.80 - 5.70
	5.70 - 7.60
	7.60 - 9.50
	9.50 - 11.40
	11.40 - 13.30
	13.30 - 15.20
	15.20 - 17.10
	17.10 - 19.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	18.46%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	75
Slope Dip Direction	5
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	13	24	54.17%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	24 (24 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figure III.7 : la stabilité Geomécanique section 01/ gradin 03

la stabilité Geomécanique section 01/ gradin 04 :

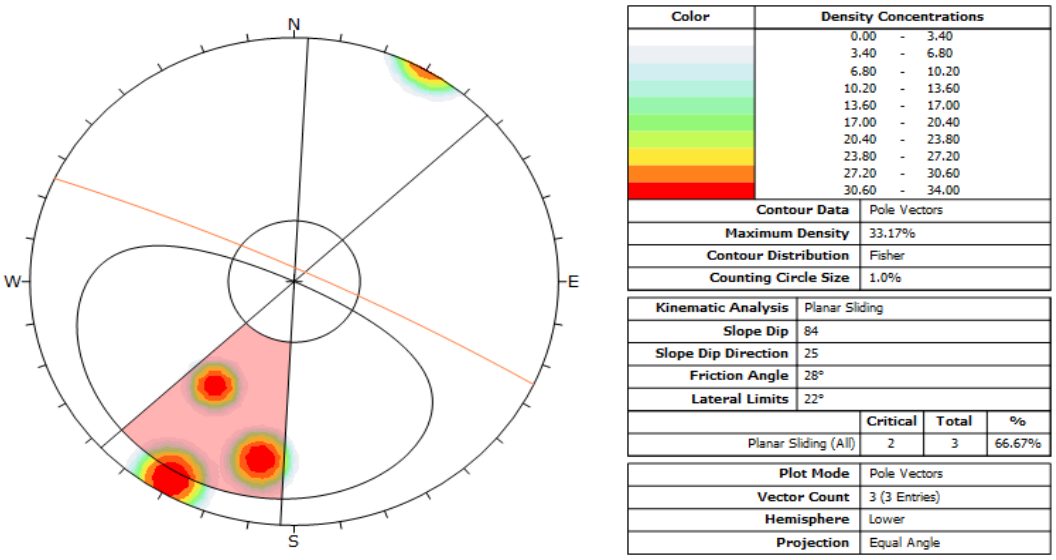


Figure III.8 : la stabilité Geomécanique section 01/ gradin 04

Présentation des résultats de la projection :

Tableau III.15 : les résultats des familles trouvés par la projection des différentes sections dans le GRADIN 01 :

Section	Famille	Direction des joints	Pendage des joints	Section	Famille	Direction des joints	Pendage des joints
01	01	158	10	05	01	169	30
02	01	155	14	06	01	169	35
03	01	162	22	07	01	160	14
	02	200	56				
04	01	151	61	08	01	195	31
	02	173	10				
	03	205	60				

Tableau III-16 : les résultats de la projection pour les différentes Sections dans le GRADIN 02

Section	Famille	Direction des joints	Pendage des joints	Section	Famille	Direction des joints	Pendage des joints
01	01	113	16	04	01	191	30
	02	190	24				
02	01	196	30	05	01	193	29
	02	226	32				
03	01	193	46				

Tableau III-17 : les résultats de la projection des différentes sections / GRADIN 03

Section	Famille	Direction des joints	Pendage des joints	Section	Famille	Direction des joints	Pendage des joints
01	01	189	28	13	01	151	24
02	01	183	09	14	01	173	27
0304	01	189	22	15	01	181	17
					02	196	45
05	01	195	28	16	01	145	39
					02	195	29
06	01	160	08	17	01	110	24
					02	191	20
07	01	145	14	18	01	170	2
	02	191	08				
08	01	157	16	19	01	143	12
					02	245	20
09	01	164	07	20	01	145	03
10	01	164	08	21	01	136	14
11	01	160	27	22	01	230	30
12	01	163	21				

Tableau III-18 : les résultats de la projection des différentes sections / GRADIN 04

Section	Famille	Direction des joints	Pendage des joints	Section	Famille	Direction des joints	Pendqge des joints
01	01	190	17	06	01	201	07
	02	215	36				
	03	210	05				
02	01	188	23	07	01	141	7
03	01	204	25	08	01	220	61
04	01	140	18	09	01	189	00
05	01	146	20				
	02	217	35				

III.4.3 L'orientation de la face des gradins :

Tableau III-19 : Directions et Pendages des talus des différentes sections (01/02)

Gradin 01			Gradin02		
Section	Direction	Pendage	Section	Direction	Pendage
01	300	75	01	110	75
02	282	75	02	65	75
03	245	75	03	100	75
04	340	75	04	67	75
05	94	75	05	110	75
06	178	75			
07	196	75			
08	50	75			

Tableau III-20 : Directions et Pendages des talus des différentes sections (03/04)

Gradin 03						Gradin 04		
Section	Direction	Pendage	Section	Direction	Pendage	Section	Direction	Pendage
01	110	75	12	315	75	01	25	75
02	124	75	13	196	75	02	11	75
03	93	75	14	134	75	03	67	75
04	70	75	15	173	75	04	220	75
05	322	75	16	108	75	05	184	75
06	241	75	17	165	75	06	21	75
07	329	75	18	218	75	07	272	75
08	273	75	19	116	75	08	39	75
09	238	75	20	165	75	09	08	75
10	295	75	21	38	75			
11	206	75						

III.5 Slope Mass Raiting (SMR):

Le système SMR de Romana (1985) évalue la stabilité des pentes rocheuses en ajustant le RMR de Bieniawski, en tenant compte de l'effet des joints, de la pente et de la méthode d'excavation.

SMR= $RMR_{\text{BASE}}+(F1 \times F2 \times F3)F4$…….3

Où RMR de base est évaluée selon Bieniawski (1979, 1989) en ajoutant les évaluations de quatre paramètres. F1, F2, F3 sont des facteurs d'ajustement liés à l'orientation des joints par rapport à l'orientation des pentes, et F4 est le facteur de correction. [7]

- Le facteur **F1** est déterminé empiriquement et dépend du parallélisme entre les directions des joints et des talus. Ce facteur peut varier de 1 (lorsque les deux directions sont presque parallèles) à 0,15 (lorsque l'angle entre les deux dépasse 30°, ce qui réduit considérablement la probabilité de rupture).

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

A : L'angle entre les directions des joints et du talus.

- Le facteur **F2** dépend du pendage des joints dans le cas du mode de rupture plan. Les valeurs de F2 varient de 1 (pour des joints ayant un pendage supérieur à 45°) à 0,15 (pour des joints ayant un pendage inférieur à 20°). En cas de rupture par "toppling", le facteur reste égal à 1. Ce facteur a été déterminé empiriquement par l'équation suivante :

$$F2 = \tan^2 \beta j$$

βj : Le pendage des joints

- Le facteur **F3** est lié à la relation entre la pente du talus et le pendage des joints. Ce paramètre varie également en fonction du type de rupture, nécessitant une distinction entre une rupture plane et une rupture par "toppling".
- Le facteur **F4** se rapporte à l'adaptation de la méthode de l'excavation il comprend de coupe creusée par pré-découpage, grenaillage lisse, grenaillage normal, pauvre dynamitage et d'excavation mécanique[9]

III 5.1 La classification du massif rocheux de chaque gradin par le système SMR :

Tableau III-21 : Exemple de classification Section 04 / gradin 01

Les familles	1er famille	2eme famille	3eme famille
Pendage du joint	61	10	60
Pendage du talus	75	75	75
Direction du joint	151	173	205
Direction du talus	340	340	340
RMR	57	57	57
SMR = RMR + (F1×F2×F3) +F4			
F1	0,15	0,15	0,15
F2	1	0,15	1
F3	-60	-60	-60
F4	-8	-8	-8
SMR	40	47,6	40

Les résultats de SMR de gradin 01 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.22 : les résultats de SMR du défirent Sections de GRADIN 01

Section	Famille	SMR	SMR moy	Section	Famille	SMR	SMR moy
01	01	41,6	41,6	06	01	26	26
02	01	41,6	41,6	07	01	30,7	30,7
03	01	46,9	44,2	08	01	30,7	30,7
	02	41,5					
04	01	40	42,5	09	01	<20	<20
	02	47,6					
	03	40					
05	01	49,1	49,1				

Les résultats de SMR de gradin 02 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.23 : les résultats de SMR du défirent Sections de GRADIN 02

Section	Famille	SMR	SMR moy	Section	Famille	SMR	SMR moy
01	01	23,5	26,2	05	01	26,4	26,4
	02	28,9					
02	01	26,2	26,2	06	01	<32	<32
	02	26,2					
03	01	17,3	17,3	07	01	<10	<10
04	02	23,7	23,7	08	01	<10	<10

Les résultats de SMR de gradin 03 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.24 : les résultats de SMR du défirent Sections de GRADIN 03

Section	Famille	SMR	SMR moy	Section	Famille	SMR	SMR moy	Section	Famille	SMR	SMR moy
01	01	43,9	43,9	13	01	<47,5	<47,5	25	01	<27	<27
02	01	<50	<50	14	01	42,8	42,8	26	01	14,9	13,9
									02	12,9	
03	01	43,6	43,6	15	01	<47,5	<47,5	27	01	<13	<13
04	01	<48	<48	16	01	<47,5	<47,5	28	01	<18	<18
05	01	46,4	46,4	17	01	36,6	36,6	29	01	<23	<23
06	01	43,9	43,9	18	01	30,9	30,9	30	01	40,9	40,9
									02	40,9	
07	01	<48	<48	19	01	<23	<23	31	01	17,9	17,9
08	01	<46	<46	20	01	26,4	26,4	32	01	<30	<30
09	01	<46	<46	21	01	35,9	35,9	33	01	<10	<10
10	01	41,1	41,1	22	01	<35	<35	34	01	10,6	6,5
									02	2,4	
11	01	38,6	38,6	23	01	29,9	29,9	35	01	14,4	14,4
	02	38,6									
12		43,6	43,6	24	01	27,6	24,4				
					02	21,3					

Les résultats des SMR dans le gradin 04 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.25 : les résultats de SMR du défirent Sections de GRADIN 04

Section	Famille	SMR	SMR moy	Section	Famille	SMR	SMR moy
01	01	41,1	33,8	06	01	30,4	36,9
	02	19,3					
	03	41,1					
02	01	36,4	36,4	07	01	14,4	14,4
03	01	38,9	38,9	08	01	3	3
04	01	38,6	38,9	09	01	13,1	13,1
05	01	30,4	29	10	01	<10	<10
	02	27,7					

- **Interprétation**

Les résultats trouvés dans les différentes sections dans le cartier Zergua par la classification SMR indiquent premièrement que les massifies rocheux et de mauvaise a très mauvaise qualité dans les marnes et le Fer (qui peuvent être instable), d'une qualité moyenne (moyennement stable) dans les calcaires avec l'apparition des glissements plans dans la plus part des sections avec la présence d'une seul famille de discontinuité dominante dans la plus part des section, sans oublier qu'il y a des section ou on a trouvées deux a trois famille de discontinuités qui signifie qu'en peut avoir des glissement de type coin ou basculement.

III.6 Système du GSI (Geological Strength Index):

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

Tableau III.26 : Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI [1]

Valeur du GSI	76-85	56-75	41-55	21-40	<20
Qualité du massif rocheux	Très bonne	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise

L'observation sur le terrain du massif rocheux dans les quatre gradins du quartier ZERGA (Annexe …) révèle des valeurs de GSI allant de très mauvaise à mauvaise dans les sections dominées par la marne, moyenne dans les zones où le fer prédomine, et bonne dans les zones calcaires.

Les projections des résultats de la classification du gradin 01 sont présentées dans la figure ci-dessous :

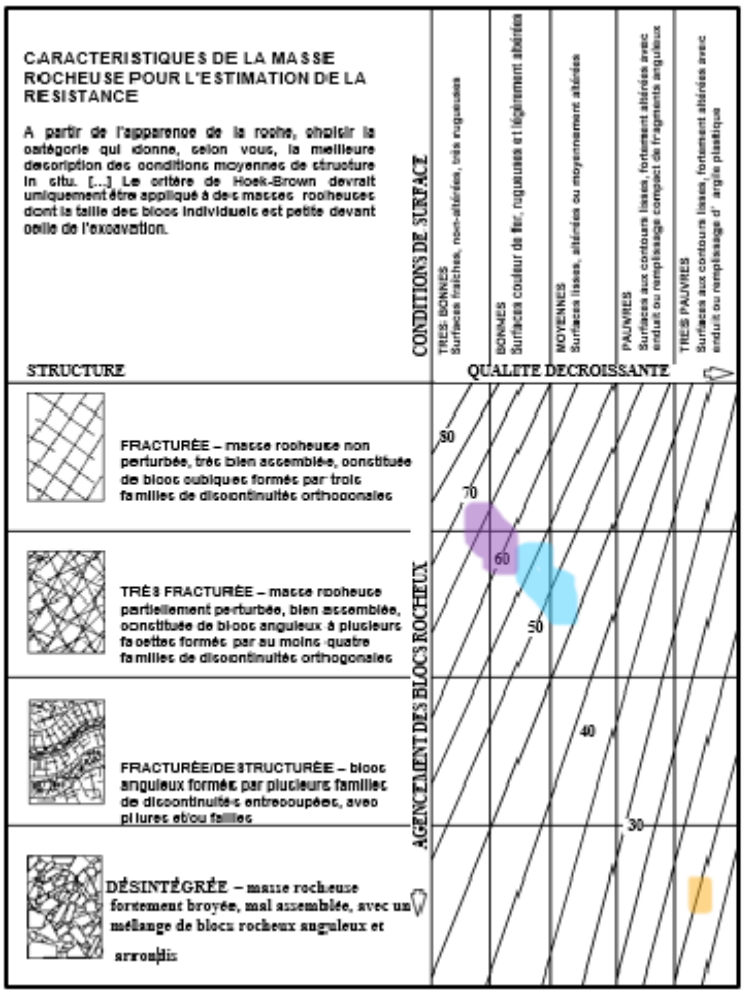


Figure III.9 : classification GSI pour le gradin 01

Les résultats de classification du gradin 01 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.27 : le GSI et la qualité de la roche pour chaque Section de GRADIN 01

Section	GSI	Qualité de la roche	Section	GSI	Qualité de la roche
01	55	Moyenne	06	45	Moyenne
02	55	Moyenne	07	50	Moyenne
03	65	Bonne	08	50	Moyenne
04	60	Bonne	09	15	Très Moyenne
05	55	Moyenne			

Les résultats de la classification du gradin 02 sont présentés dans la figure ci-dessous :

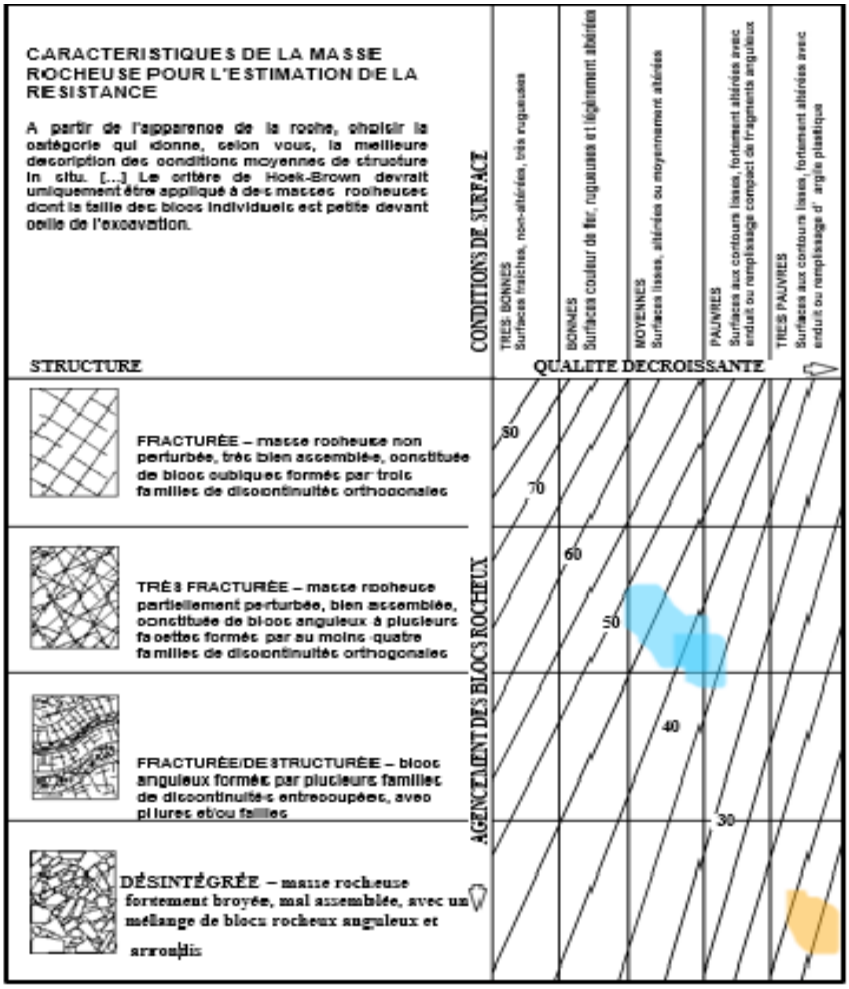


Figure III.10 : classification GSI pour le gradin 02

Les résultats de classification du gradin 02 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.28 : le GSI et la qualité de la roche pour chaque Section de GRADIN 02

Section	GSI	Qualité de la roche	Section	GSI	Qualité de la roche
01	50	Moyenne	05	40	Mauvaise
02	45	Moyenne	06	35	Mauvaise
03	45	Moyenne	07	15	Trés mauvaise
04	45	Moyenne	08	10	Trés mauvaise

Les es résultats de la classification du gradin 04 sont présentées dans la figure ci-dessous :

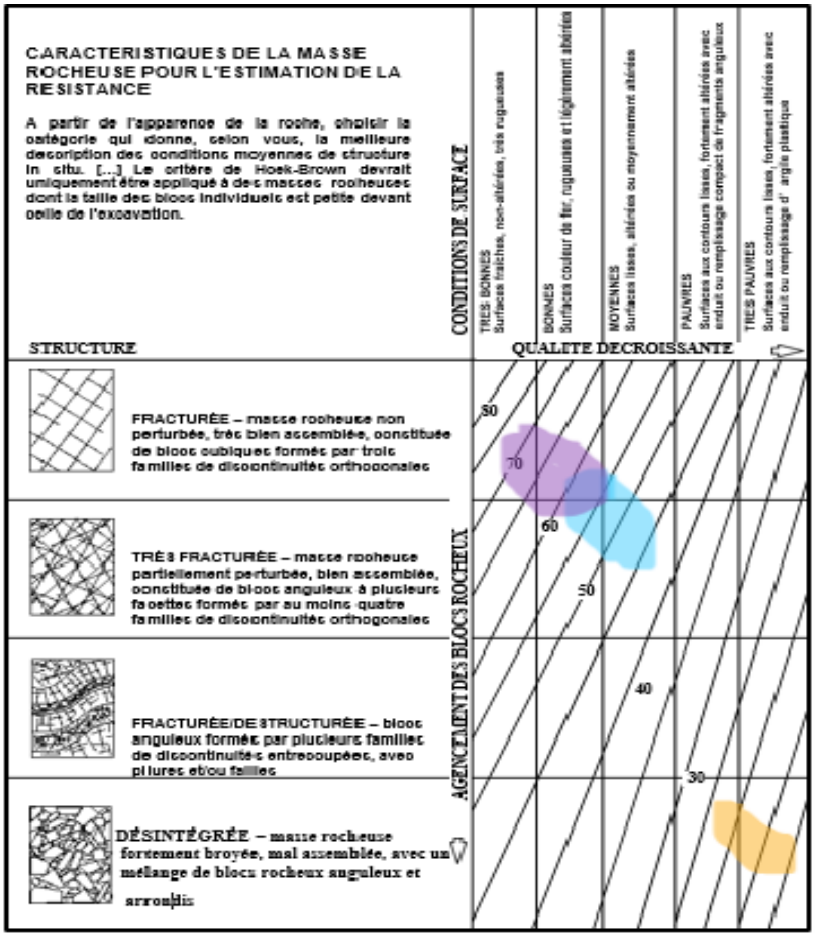


Figure III.11 : classification GSI pour le gradin 03

Les résultats de classification du gradin 03 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.29 : le GSI et la qualité de la roche pour chaque Section de GRADIN 03

Section	GSI	Qualité de la roche	Section	GSI	Qualité de la roche	Section	GSI	Qualité de la roche
01	60	Bonne	13	70	Bonne	25	45	Moyenne
02	55	Moyenne	14	70	Bonne	26	20	Trés mauvaise
03	55	Moyenne	15	65	Bonne	27	15	Trés mauvaise
04	55	Moyenne	16	55	Moyenne	28	15	Trés mauvaise
05	55	Moyenne	17	50	Moyenne	29	20	Trés mauvaise
06	60	Bonne	18	50	Moyenne	30	55	Moyenne
07	60	Bonne	19	45	Moyenee	31	30	Mauvaise
08	60	Bonne	20	45	Moyenne	32	50	Moyenne
09	60	Bonne	21	50	Moyenne	33	10	Trés mauvaise
10	60	Bonne	22	50	Moyenne	34	10	Trés mauvaise
11	55	Moyenne	23	45	Moyenne	35	10	Trés mauvaise
12	60	Bonne	24	45	Moyenne			

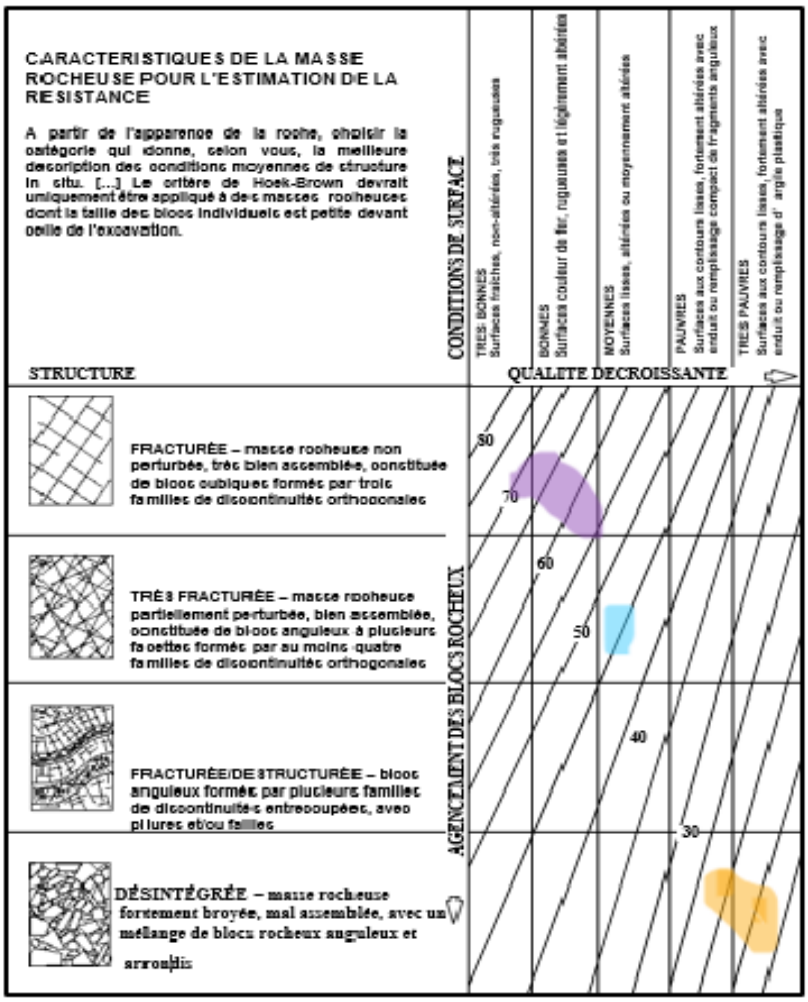


Figure III.12 : classification GSI pour le gradin 04

Les résultats de classification du gradin 04 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.30 : le GSI et la qualité de la roche pour chaque Section de GRADIN 04

Section	GSI	Qualité de la roche	Section	GSI	Qualité de la roche
01	65	Bonne	06	60	Bonne
02	60	Bonne	07	15	Trés mauvaise
03	60	Bonne	08	15	Trés mauvaise
04	65	Bonne	09	20	Trés mauvaise
05	55	Moyenne	10	20	Trés mauvaise

III.7 Indice d'évaluation des talus rocheux (Slope Quality Index"SQI"):

Malgré l'existence de divers systèmes de classification prenant en compte certains aspects de la stabilité des pentes, il demeure nécessaire d'avoir un système plus complet qui intègre un plus grand nombre de facteurs influençant l'analyse de la stabilité des

pentes rocheuses. C'est ainsi qu'un nouveau système, appelé "Slope Quality Index (SQI)", a été développé pour intégrer un large éventail de facteurs internes et externes, liés à la qualité et à la stabilité des pentes.

Ce système repose sur celui de Liu et Chen (2007), mais avec l'ajout de plusieurs facteurs et paramètres supplémentaires. Chaque facteur a un poids spécifique, et les valeurs du SQI varient de 1 à 5, représentant respectivement des conditions de qualité de pente allant de très bonnes à très mauvaises. Cette approche permet à la fois une évaluation qualitative et quantitative de la qualité des pentes.[1]

Tableau III.31 : Système SQI pour les pentes rocheuses : classification qualitative et quantitative.[1]

SQI	État de la pente
[1; 1,4]	Très bien
[1,5; 2,4]	Bon
[2,5; 3,4]	Moyen
[3,5; 4,2]	Mauvais
[4.3; 5]	Très mauvais

A. Présentation des résultats :

Les résultats de SQI de trois faciès (Maren, Fer, Calcaire) sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.32 : l'État de stabilité de Calcaire ZERGUA.

ClassificationSQI				
N°degradin\section	**G01/S05**	**G02/02**	**G03/S20**	**G04/S01**
Valeurde"SQI"	**2,93**	**2.79**	**2.76**	**2,8**
Étatde la pente	**Moyen**	**Moyen**	**Moyen**	**Moyen**

Tableau III.33 : l'État de stabilité de Fer ZERGAu.

Classification SQI				
N° de gradin \ section	**G01/S06**	**G03/04**	**G03/S13**	**G04/S05**
Valeur de "SQI"	**2,8**	**2.83**	**2.83**	**2,82**
État de la pente	**Moyen**	**Moyen**	**Moyen**	**Moyen**

Tableau III.34 : l'État de stabilité de Marne ZERGUA.

Classification SQI				
N° de gradin \ section	**G01/S09**	**G02/S08**	**G03/S33**	**G04/S08**
Valeur de "SQI"	**2,93**	**2.93**	**2.93**	**2,93**
État de la pente	**Moyen**	**Moyen**	**Moyen**	**Moyen**

B. Interprétation des résultats:

L'analyse des résultats de l'indice de qualité des pentes (SQI) révèle une stabilité moyenne globale des pentes étudiées dans toutes les fasciées de la région de Zirgha. Toutefois, cette convergence des résultats s'explique principalement par la similarité et l'interdépendance de plusieurs critères tels que les données géotechniques, le système de drainage et les conditions environnementales, tandis que d'autres critères varient, comme le trafic, l'activité sismique, les dispositifs de protection, ainsi que le manque d'informations concernant la surveillance, la conservation et l'entretien. Par conséquent, les valeurs calculées pour les trois types de façades rocheuses (ferrugineuses, calcaires et marneuses) se situent dans la même plage, variant entre 2,7 et 2,9.

III.8 Conclusion

Une étude détaillée a été réalisée sur les quatre gradins de la mine située dans le quartier ZERGA en appliquant des approches géomécaniques et empiriques, ce qui a permis de tirer plusieurs constats.

Tout d'abord, l'application des méthodes géomécaniques (RQD, RMR, GSI) a permis de classer les faciès en trois catégories :

- **Calcaire et Fer** : qualité de roche moyenne à bonne.
- **Marne** : qualité généralement mauvaise à très mauvaise.

Ensuite, la classification SMR associée à une projection stéréographique a mis en évidence la présence d'une famille principale et de deux familles diffuses de discontinuités réparties sur les trois gradins. Ces discontinuités jouent un rôle déterminant dans la stabilité des gradins, surtout dans les zones où la marne est dominante. La classification SMR nous a données des classes de massif rocheux

En appliquant la classification SQI, on a observé que les valeurs calculées pour les trois faciès (Fer, Calcaire et Marne) sont très proches, comprises entre 2,7 et 2,9. Ce faible écart résulte des similitudes observées entre les paramètres géométriques, le

système de drainage, les conditions environnementales, le trafic, la sismicité et les dispositifs de protection, mais également du manque de données concernant la surveillance, la conservation et la maintenance.

Enfin, il est important de souligner qu'un glissement de terrain majeur a été observé dans la carrière de ZERGA, affectant particulièrement les zones marneuses et mettant en évidence la vulnérabilité de ces secteurs à l'instabilité. Cela confirme la nécessité de mener une analyse de stabilité approfondie, de calculer le coefficient de sécurité et de proposer des solutions techniques pour renforcer la stabilité des gradins et prévenir de futurs glissements.

En conclusion, les méthodes géomécaniques appliquées (RQD, RMR, SMR, GSI et SQI) permettent une caractérisation complète de l'état du massif rocheux. Les méthodes RQD et RMR fournissent une évaluation globale de l'état du massif, tandis que les autres méthodes apportent une analyse plus fine en tenant compte des discontinuités (nombre, orientation et pendage) ainsi que des facteurs de surveillance, de maintenance et des antécédents géologiques et historiques, y compris les glissements survenus.

Chapitre IV

IV.1 Introduction

PLAXIS est un logiciel d'éléments finis développé pour l'analyse de la déformation, de la stabilité et de l'écoulement des eaux souterraines en géotechnique. Il fait partie de la gamme de produits PLAXIS, une suite de logiciels d'éléments finis utilisée dans le monde entier pour l'ingénierie et la conception géotechniques. Le développement de PLAXIS a débuté en 1987 à l'Université de Technologie de Delft, à l'initiative du ministère néerlandais des Travaux publics et de la Gestion de l'eau.

L'objectif initial était de développer un code d'éléments finis 2D facile à utiliser pour l'analyse des digues fluviales sur les sols meubles des basses terres hollandaises. Au cours des années suivantes, PLAXIS a été étendu à la plupart des autres domaines de la géotechnique. Face à la croissance continue de ses activités, la société PLAXIS (Plaxis BV) a été créée en 1993. Depuis 2018, PLAXIS fait partie de Bentley Systems, Incorporated, une société américaine spécialisée dans les logiciels de planification, de conception et de maintenance de projets d'infrastructures. Dans le cadre de la vision de Bentley visant à intégrer la profession géotechnique aux flux de travail numériques et interdisciplinaires liés aux infrastructures, PLAXIS a intégré Seequent, la société Bentley Sub surface, en 2021.

En 1998, le premier PLAXIS 2D pour Windows a été lancé. Entre-temps, un noyau de calcul pour les calculs par éléments finis 3D a été développé, ce qui a donné naissance au programme 3DTunnel en 2001. 3DFoundation, deuxième programme PLAXIS tridimensionnel, a été développé en collaboration avec TNO. 3DFoundation a été lancé en 2004. Cependant, ni 3DTunnel ni 3DFoundation ne permettaient de définir des géométries 3D arbitraires en raison de leurs limitations géométriques. PLAXIS 3D est un programme complet de calcul par éléments finis tridimensionnels qui allie une interface intuitive à des capacités de modélisation 3D avancées. Le premier programme PLAXIS 3D a été lancé en 2010.

IV.2 Buts et objectifs :

PLAXIS vise à fournir un outil d'analyse pratique aux ingénieurs géotechniciens qui ne sont pas nécessairement des spécialistes du numérique. Les ingénieurs en exercice considèrent souvent les calculs par éléments finis non linéaires comme fastidieux et chronophages.

L'équipe de recherche et développement de PLAXIS a résolu ce problème en concevant des procédures de calcul robustes et théoriquement solides, encapsulées dans une interface logique et conviviale. De nombreux ingénieurs géotechniciens du monde entier ont ainsi adopté le produit et l'utilisent à des fins d'ingénierie et de conception.

IV.3 Réseau scientifique :

Le développement des produits PLAXIS ne serait pas possible sans la recherche menée dans les universités et les instituts de recherche du monde entier. Afin de garantir le maintien du haut niveau technique de PLAXIS et l'adoption de nouvelles technologies, l'équipe de développement est en contact avec un large réseau de chercheurs dans le domaine de la géo-ingénierie et des méthodes numériques.[18]

IV.4 Création des modèles numériques

IV.4.1 - Saisie graphique des modèles géométriques.

La saisie des données de sol, des structures, des étapes de construction, des charges et des conditions limites s'appuient sur des procédures de dessin CAO pratiques, permettant une modélisation détaillée de la géométrie.

À partir de ce modèle géométrique, un maillage par éléments finis est facilement généré.

IV.4.2 -Forages :

Les couches de sol sont définies au moyen de forages. Plusieurs forages peuvent être placés dans la géométrie pour définir une stratigraphie de sols non horizontaux ou une surface de sol inclinée. PLAXIS interpole automatiquement les positions des couches et de la surface de sol entre les forages.

IV.4.2.1 -Modèle de Mohr-Coulomb

Ce modèle non linéaire, robuste et simple, repose sur des paramètres de sol connus dans la plupart des situations pratiques. Cependant, il ne prend pas en compte toutes les caractéristiques non linéaires du comportement du sol. Le modèle de Mohr-Coulomb permet de calculer des capacités portantes et des charges d'effondrement réalistes pour les semelles, ainsi que d'autres applications où le comportement à la rupture du sol joue un rôle prépondérant. Il permet également de calculer un facteur de sécurité par une approche de « réduction phi-c ». [15]

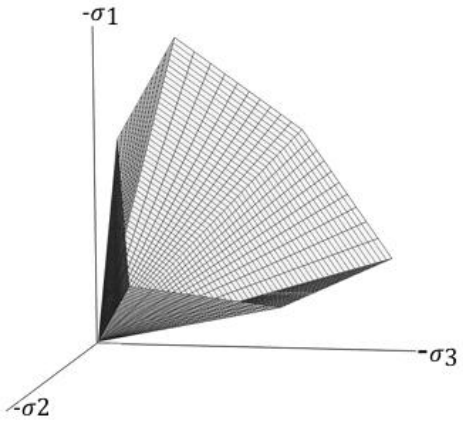


Figure IV.1 : La surface de contrainte de Mohr-Coulomb dans l'espace des

Contraintes principales (c = 0)

- ✓ **Paramètres du modèle de Mohr-Coulomb**

Le modèle de Mohr-Coulomb linéaire, parfaitement élastique et plastique, requiert cinq paramètres : deux paramètres de rigidité et trois paramètres de résistance, généralement connus de la plupart des ingénieurs géotechniciens et pouvant être obtenus à partir d'essais simples sur des échantillons de sol. Les paramètres de rigidité, avec leurs unités standard, sont :

- Eref Module de Young [kN/m²]

- ν Coefficient de Poisson [-]

Au lieu d'utiliser le module de Young comme paramètre de rigidité, d'autres paramètres peuvent être saisis.

Ces paramètres, avec leurs unités standard, sont listés ci-dessous :

- G Module de cisaillement [kN/m²]
- Eoed Module œdométrique [kN/m²]

Les paramètres de résistance du modèle de Mohr - Coulomb sont :

- C Cohésion [kN/m²]
- φ Angle de frottement [°]
- ψ Angle de dilatance [°]
- σt Seuil de rupture en traction et résistance à la traction [17]

IV.4.2.2 -Modèle de Roche Jointée (JR)

Les matériaux peuvent avoir des propriétés différentes selon les directions. Par conséquent, ils peuvent réagir différemment lorsqu'ils sont soumis à des conditions particulières dans une direction ou une autre. Cet aspect du comportement des matériaux est appelé anisotropie. Lors de la modélisation de l'anisotropie, on distingue l'anisotropie élastique et l'anisotropie plastique. L'anisotropie élastique fait référence à l'utilisation de différentes propriétés de rigidité élastique selon les directions. L'anisotropie plastique peut impliquer l'utilisation de différentes propriétés de résistance selon les directions, comme le montre le modèle de roche jointée. Une autre forme d'anisotropie plastique est le durcissement cinématique. Ce dernier n'est pas pris en compte dans PLAXIS.[17]

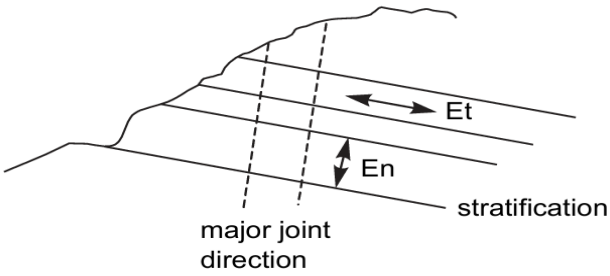


Figure IV.2 : Visualisation du concept derrière le modèle Jointed Rock

Le modèle de Roche Jointée est un modèle élastoplastique anisotrope, spécialement conçu pour simuler le comportement des couches rocheuses impliquant une stratification et des directions de faille particulières. La plasticité ne peut se produire que dans trois directions de cisaillement (plans de cisaillement) au maximum. Chaque plan possède ses propres paramètres de résistance φ et c.

L'application du modèle de roches jointives se justifie en présence de familles ou d'ensembles de joints. Ces ensembles doivent être parallèles, non remplis de failles, et leur espacement doit être faible par rapport à la dimension caractéristique de la structure.

Voici quelques caractéristiques de base du modèle de roches jointives :
• Comportement élastique anisotrope pour roche intacte : Paramètres Et, En,νnt,νts,Gnt
• Rupture par cisaillement selon Coulomb dans 3 directions : Paramètres ci, φi et ψi
• Résistance limitée à la traction dans 3 directions : Paramètres σt,i

Un maximum de trois directions de glissement (plans de glissement) peuvent être défini dans le modèle Jointed Rock. Le premier plan de glissement correspond à la direction de l'anisotropie élastique. De plus, un maximum de deux autres directions de glissement peuvent être défini.

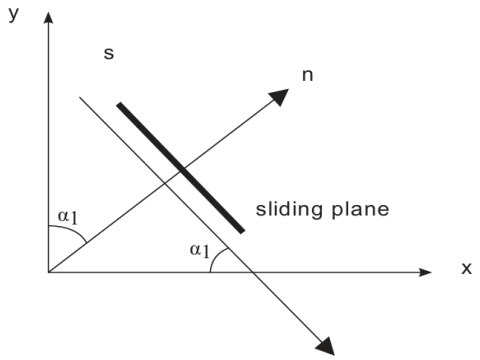


Figure IV.3 : Plan d glissement

- Et Module de Young pour la roche continu [kN/m²]
- νnt Coefficient de Poisson pour la roche continu [-]

Paramètres élastiques anisotropes, direction « Plan 1 » (par exemple, direction de stratification)

- En Module de Young perpendiculaire à la direction « Plan 1 »
  [kN/m²]
- Gnt Module de cisaillement perpendiculaire à la direction « Plan 1 »
  [kN/m²]
- Nts Coefficient de Poisson perpendiculaire au 'Plan 1' νts< En Et (1−νnt 2) [-]

Paramètres de résistance dans les directions des joints (plan i = 1, 2, 3) :

- ci Cohésion
  [kN/m²]
- φi Angle de frottement [°]
- ψi Angle de dilatance
  [°]
- σt,i Résistance à la traction
  [kN/m²]

IV.4.2.3 -Modèles de sols avancés :

Un modèle hyperbolique de type élastoplastique, appelé modèle de sol durcissant, est disponible comme modèle général du second ordre.

Ce modèle prend en compte le compactage plastique (durcissement de la couche) ainsi que le cisaillement plastique dû à une charge déviatorique (durcissement par

cisaillement). Pour tenir compte de la rigidité accrue des sols sous faibles déformations, le modèle de sol durcissant avec rigidité aux faibles déformations (HSsmall) est disponible. Pour analyser avec précision le comportement en compression logarithmique et temporelle des sols meubles normalement consolidés, un modèle de fluage, appelé modèle de fluage des sols meubles, est disponible. Pour évaluer le comportement en liquéfaction dans l'application dynamique des sols sableux, les modèles UBC3D-PLM et PM4Sand sont disponibles. Pour simuler la résistance et la rigidité temporelles des structures en béton et en béton projeté, l'écrouissage et le ramollissement en compression et en traction, ainsi que le fluage et le retrait, le modèle Béton est disponible.[17]

IV.4.3 -Les étapes de la création de modèle numérique

Nous allons réaliser une étude bidimensionnelle (déformation plane) pour l'évaluation du coefficient de sécurité de la carrière selon plusieurs profile qui présente les états les plus critiques trouvés dans la classification géomécaniques. La création de modèle géométrique passe par plusieurs étapes ou nous débutant par la géométrie ensuite l'introduction des données (propriétés physiques et mécaniques des roches, les lois de comportements Mohr couloumb, jointed rock etc.), ensuite le maillage est réalisé automatique est raffiné globalement avec la création des conditions aux limites, finalement les procédures de calcul sont réalisées [16]

IV.4.3.1 -La géométrie et paramètres géotechniques des modèles :

La carrière est formée par trois formations (Marne, Fer, calcaire) composent la géologie du site, à cause de l'arrangement de ces couches, et à partir des résultats de classification des massifs rocheux on a introduit les fissures trouvées dans les classifications et choisir les profiles les plus critique formée par la marne jaune, le fer est le calcaire qui sont de mauvaise a moyenne qualité ou il y a risque de glissement. La géométrie des modèles est donnés dan le tableau suivant

Tableau IV.1 : les profiles géométriques

N° des gradins	La hauteur	La largeur	L'angled'inclinaison
1 Seul gradin	**35**	**44**	**75**
4 Gradins	**80**	**116**	**75**

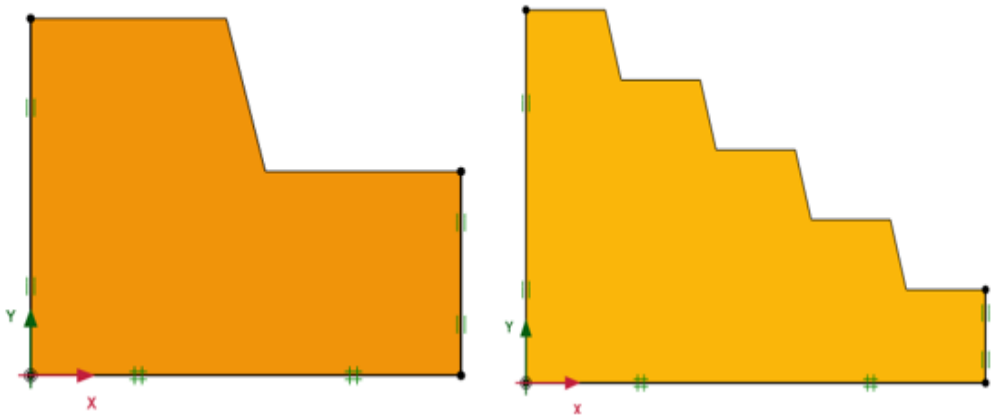


Figure IV.4 : profiles géométriques étudiées

IV.4.3.2 -Caractéristiques des matériaux :

Nous avons choisir deux lois de comportement différentes premièrement les lois de comportement Mohr Couloumb et ensuite les lois de comportement pour les roches jointés pour avoir une vision détailler sur l'effet de la fracturation sur la stabilité des gradins. Les propriétés de la Marne jaune, le minerai de fer et le calcaire sont regroupés dans le tableau suivant :

Le tableau suivant représente les caractéristiques de la Marne avec mmodèle Mohr coulomb :

Tableau IV.2 : Les caractéristiques de la Marne (Mohr coulomb)

- **Les caractéristiques de la Marne**							
Name	**Type**	***γ*_unsat**	***γ*sat**	***N***	**E_ref**	**c_ref**	***φ***
		[kN/m]	[kN/m]	[-]	kN/m²]	kN/m²]	[°]
Marne	**Drainer**	21	23	0.3	10^6	12	20

Le tableau suivant représente les caractéristiques de la Marne avec modèle de Roche Jointée (JR) :

Tableau IV.3 : Les caractéristiques de la Marne (Roche jointée)

Les caractéristiques de la Marne										
Name	**Type**	***γ* _unsat**	***γ* sat**	**E_t**	**V_{nt}**	***E_n***	**G_{nt}**	**c_ref**	***φ***	***α*11**
		[kN/m³]	[kN/m³]	kN/m²]	[-]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[°]	[°]
Marne	**drainer**	21	23	10^6	0.3	10^5	10^5	17	10	135

IV.4.3.3 -Générations du Maillage:

Dans cette étape, la géométrie de la pente est discrétisée par des éléments spécifiques trigonométriques. Le modèle de référence se fait part des éléments à 15 nœuds. Le nombre des éléments et de 524 et 4321 nœuds dans un gradin et de

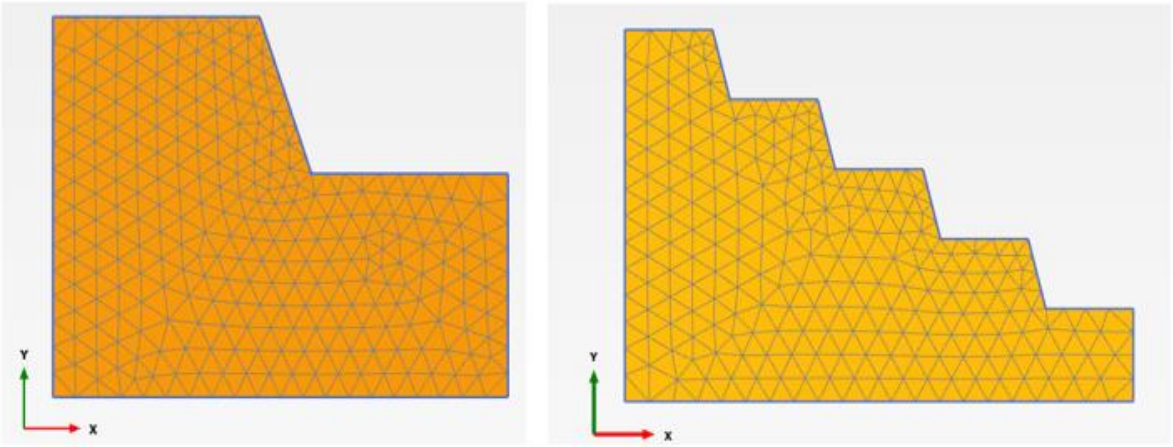


Figure IV.5 : le maillage des modèles géométriques

IV.4.3.4 -Procédure des calculs :

Le calcul du modèle de référence se fait défini en deux phases comme suite :

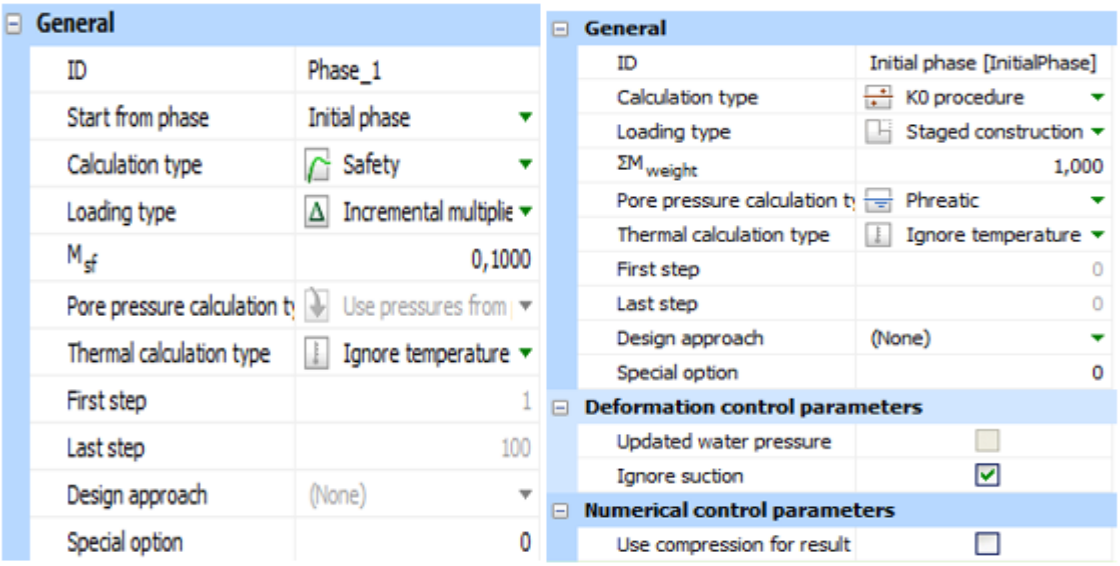


Figure IV.6 : les Phases de calcul, a-initiale (K0) **b-** Phase 1(Safety)

IV.5 -Les déformations de cisaillement :

Les résultats des déformations trouvées et l'allure des cercles de glissements indiquent que le gradin et instable pour une hauteur de 15 m et un ongle de 75°.

- **Les déformations de cisaillement (Mohr Coulomb) :**

Les déformations de cisaillement des couches ou on utilisant la loi de comportement (Mohr coulomb) représentent dans les figures suivantes :

- Dans les marnes jaunes

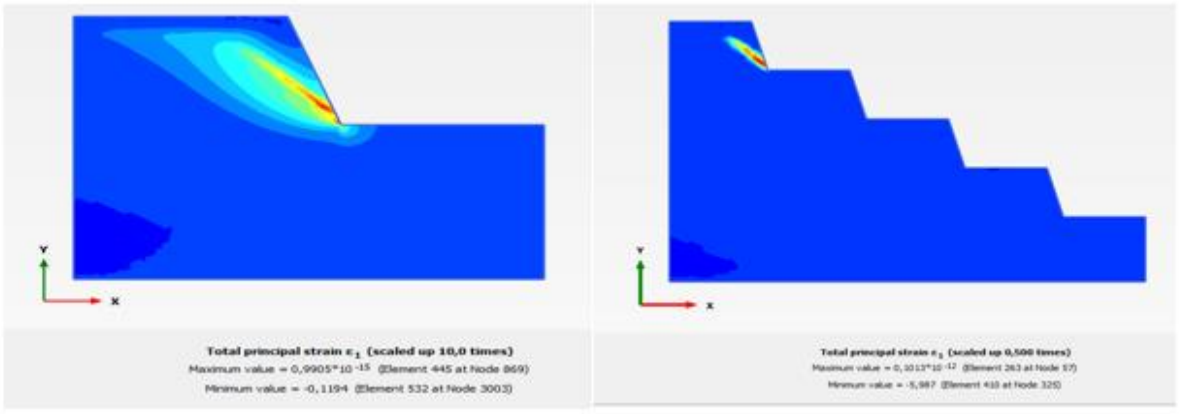


Figure IV.7 : Les déformations de cisaillement dans la marne

- Dans le Fer

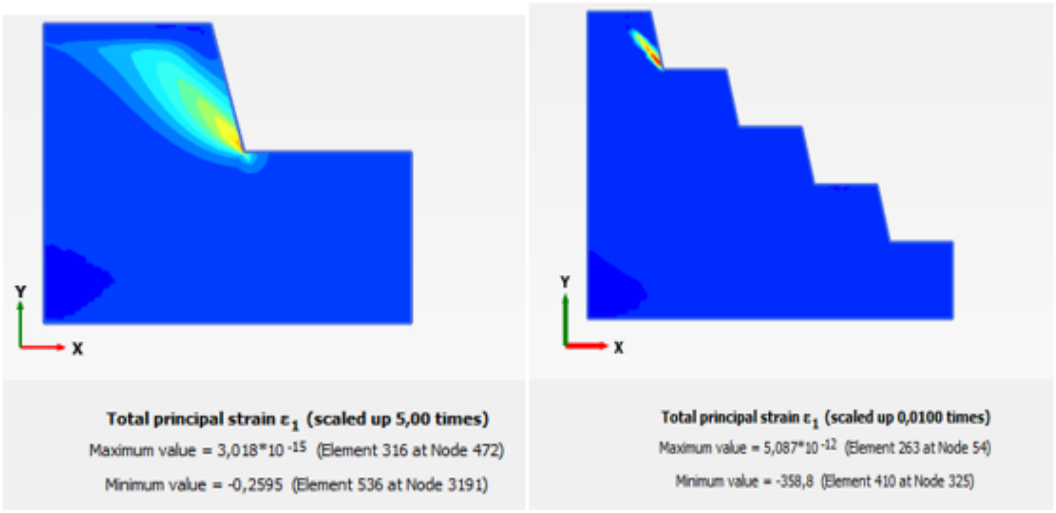


Figure IV.8 : Les déformations de cisaillement dans le Fer

- Dans les calcaires

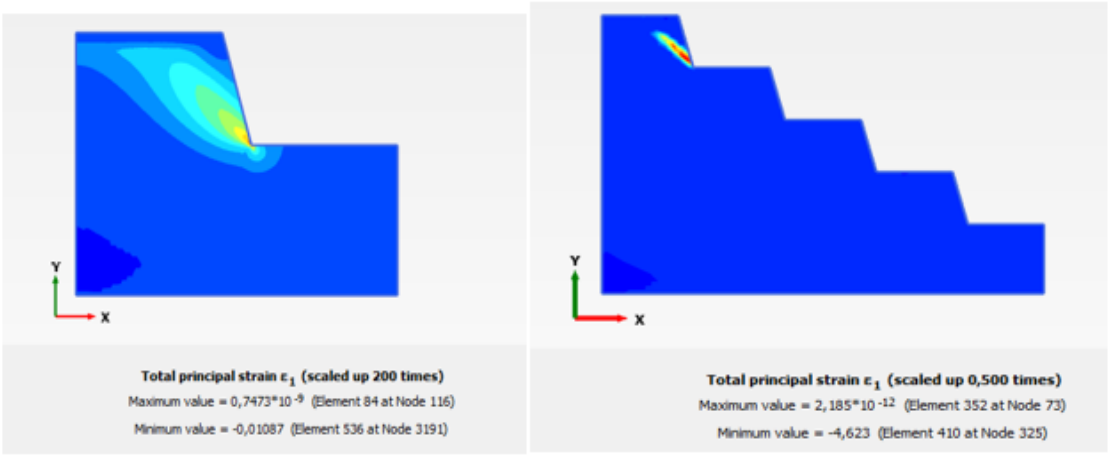


Figure IV.9 : Les déformations de cisaillements dans le Calcaire

- **La valeur de coefficient de sécurité FS :**

La valeur du coefficient de sécurité trouvé indique premièrement que la pente est instable a l'état sec pour une hauteur h = 15 m est un ongle de 75° ou les valeurs (varie de 0.4 à 0.6) qui sont inferieurs à 1 .2 .

- **Dans la marne jaune**
  Le coefficient de sécurité trouvé indique que le gradin est instable et sa valeur est de l'ordre de 0.4 inferieur à 1.2

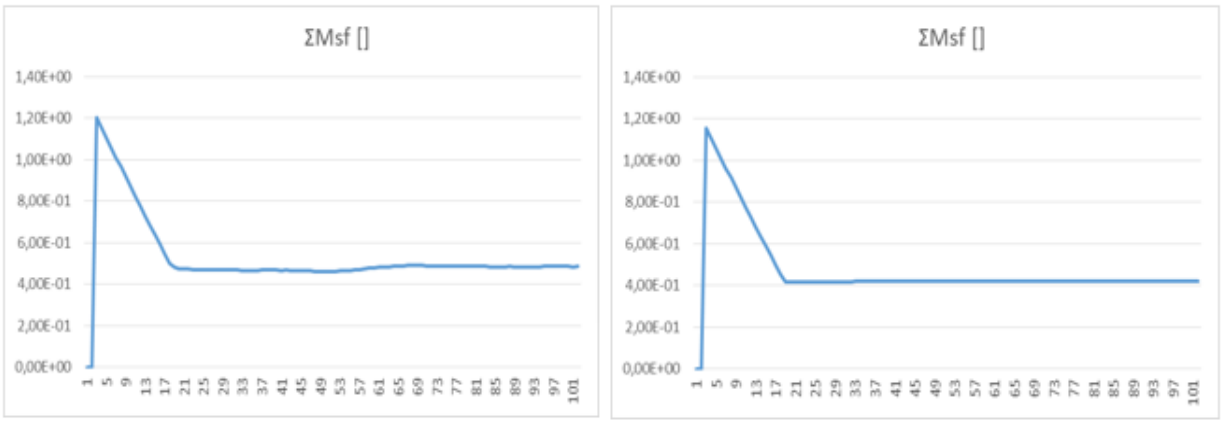


Figure IV.10 : le coefficient de sécurité dans la marne

- **Dans le Fer**

Le coefficient de sécurité trouvé indique que le gradin est instable et sa valeur est de l'ordre de 0.4 inferieur à 1.2

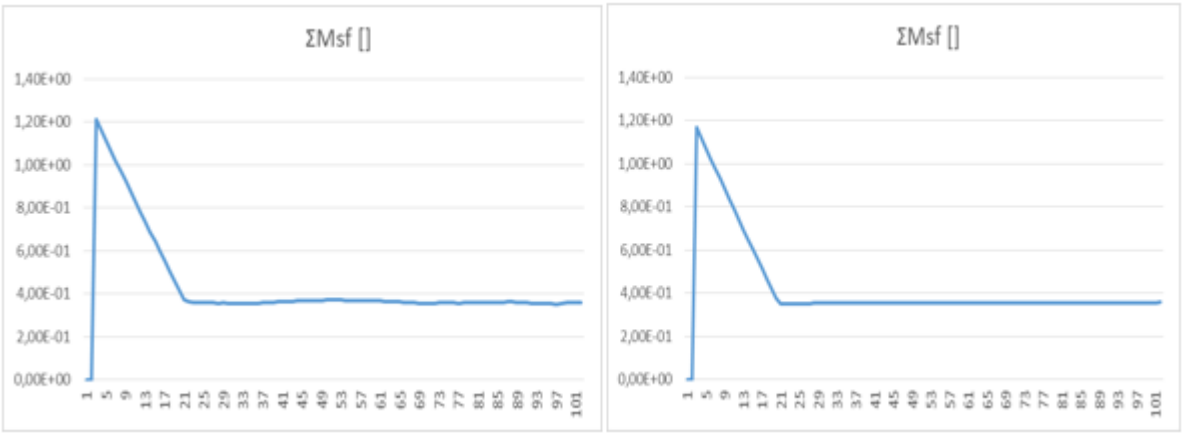


Figure IV.11 : le coefficient de sécurité dans le Fer

- **Dans le calcaire**

Le coefficient de sécurité trouvé indique que le gradin est instable et sa valeur est de l'ordre de 0.4 inferieur à 1.2

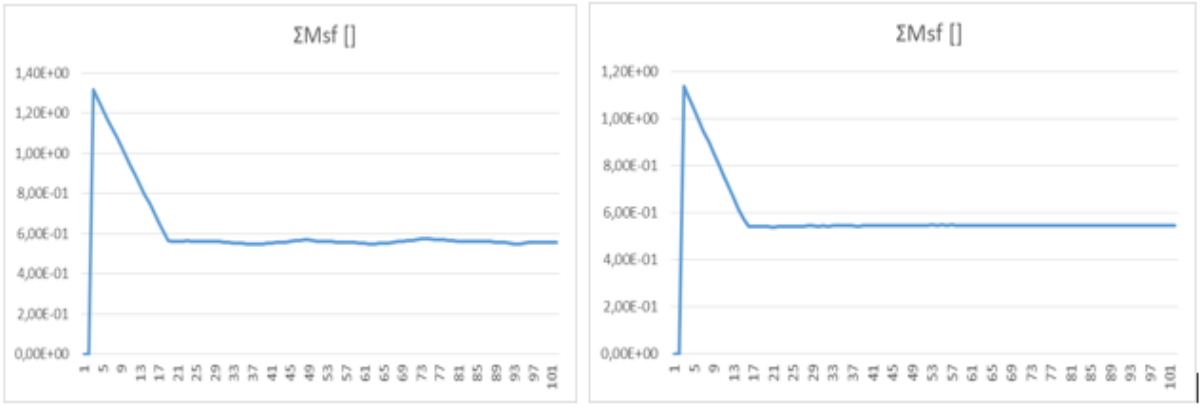


Figure IV.12 : le coefficient de sécurité dans le calcaire

- **Les déformations de cisaillement (Roche jointée) :**

Nous introduisant les orientations des plans des fractures (trois direction) trouvées par les projections stéréographiques avec leurs caractéristiques pour simuler le comportement réel de la roche ou les déformations des couches (Roche joint) sont représentent dans les figures suivantes :

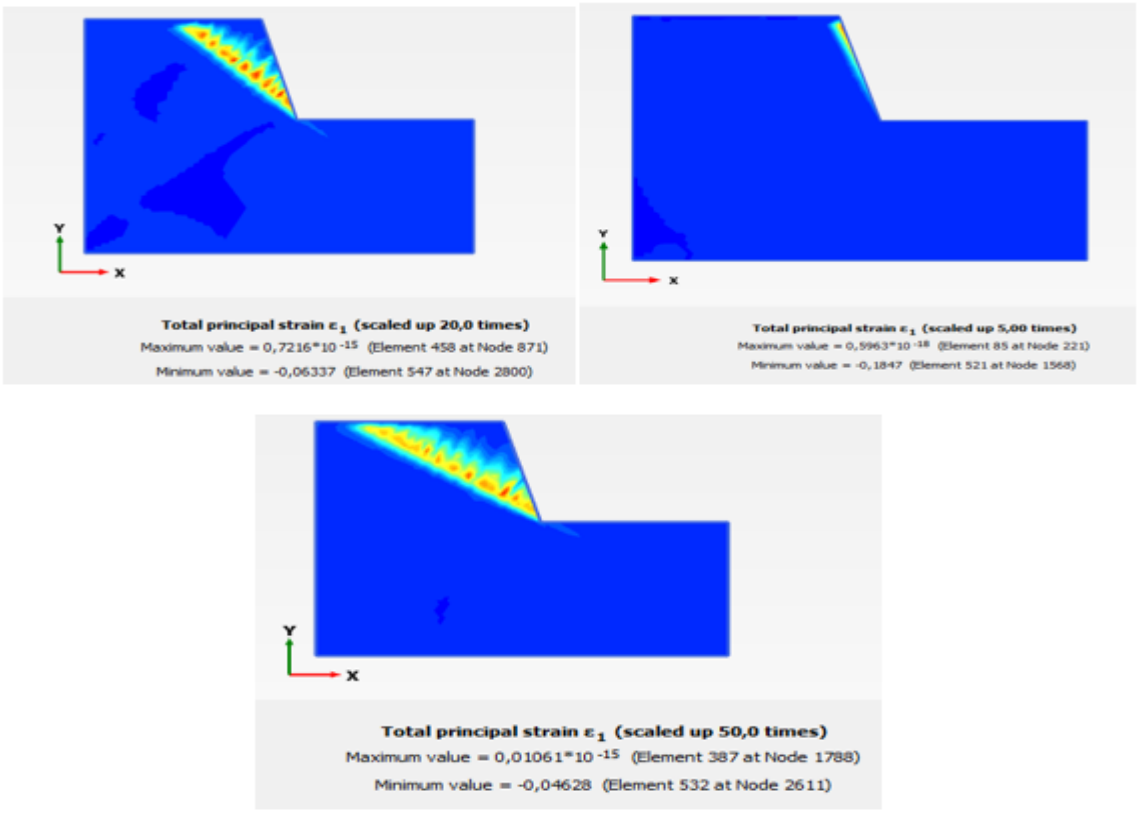


Figure IV.13 : Les déformations de cisaillement dans la marne pour des orientations de fractures

(110°) (135°) (145°)

- Dans les 4 gradins

  On observe la présence des fractures dans la direction favorisant le glissement d'où le cisaillement est possible

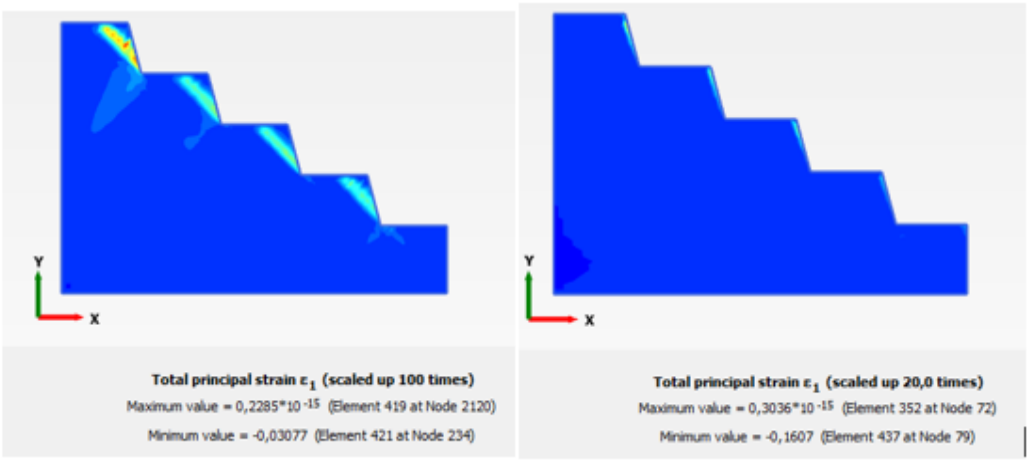


Figure IV.14 : Les déformations de cisaillements dans la marne pour des orientations de fractures (110°) et (135°)

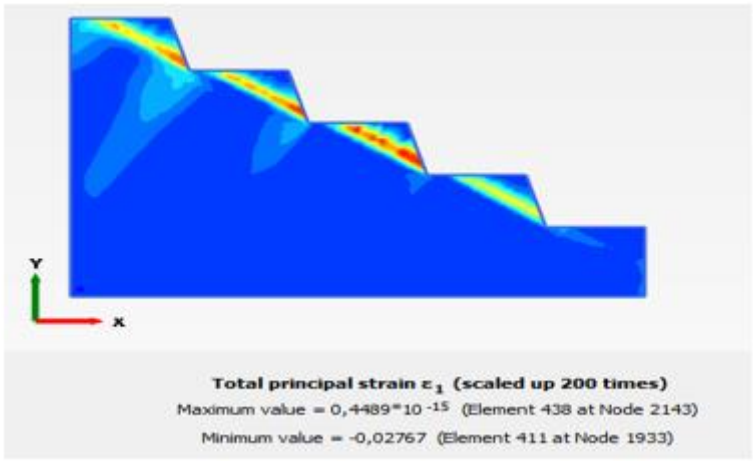


Figure IV.15 : Les déformations de marne pour des orientations de fractures (145°)

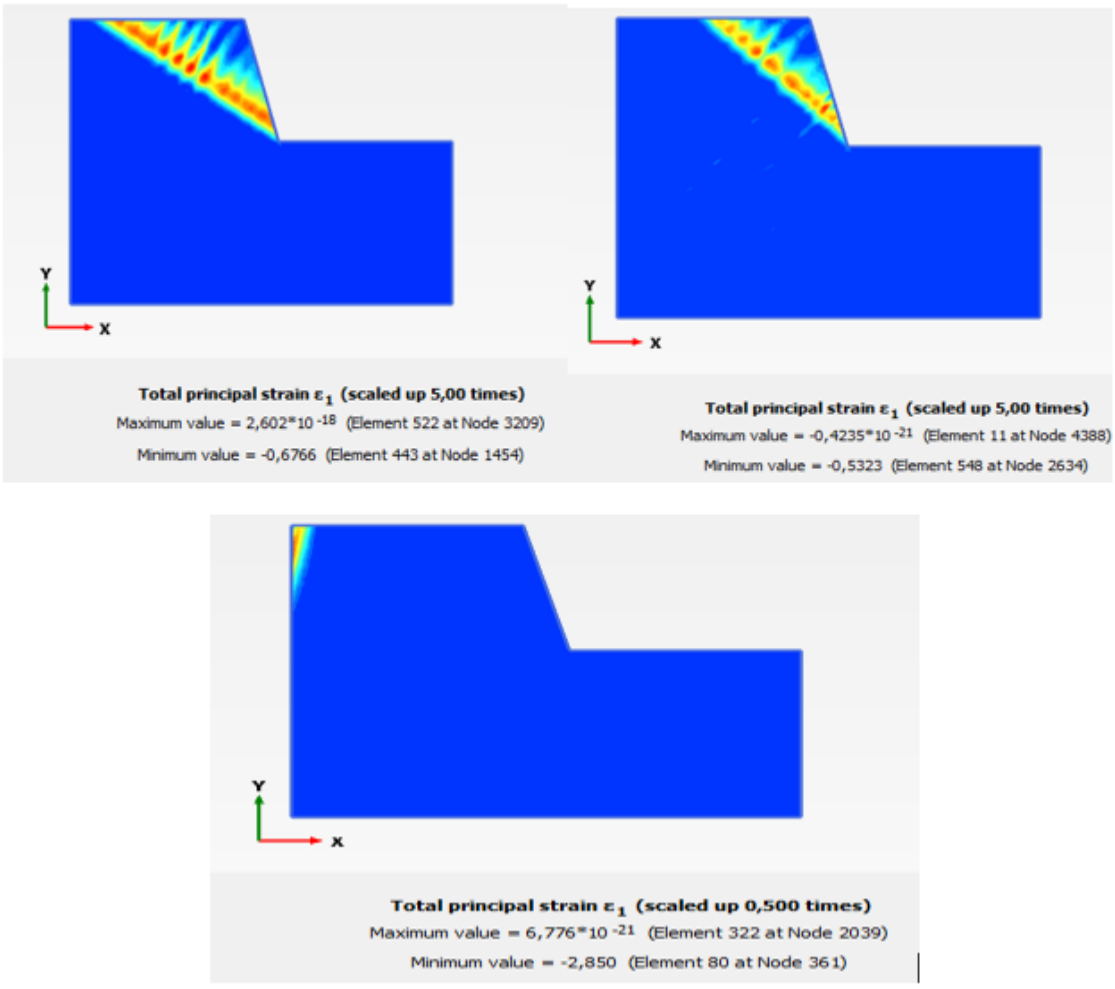
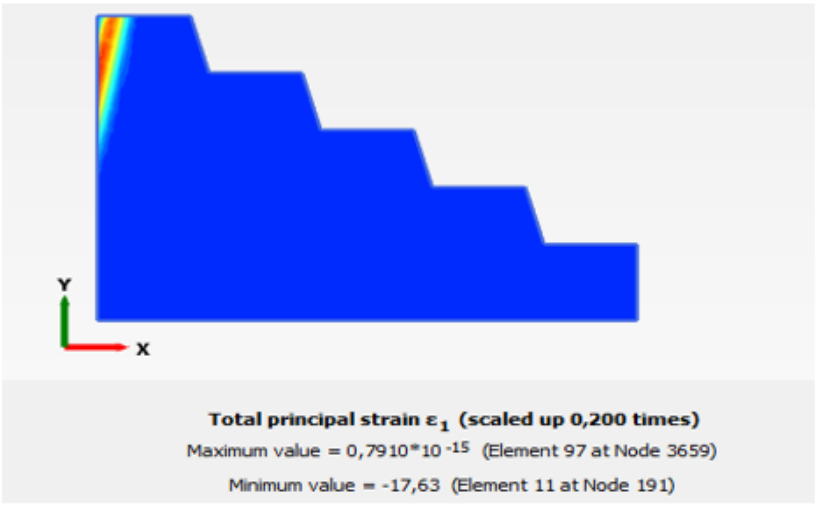
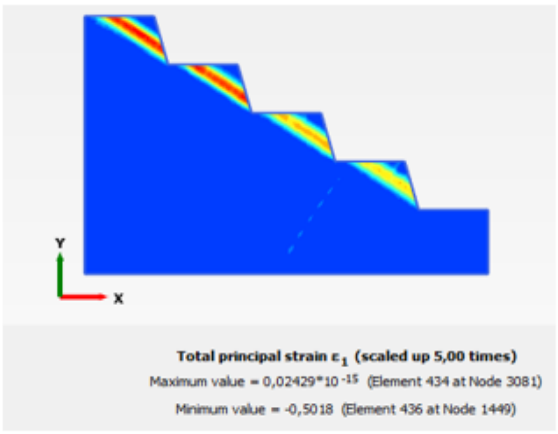


Figure IV.16 : Les déformations de cisaillement dans le Fer pour des orientations de fractures (136°) (145°) (169°)





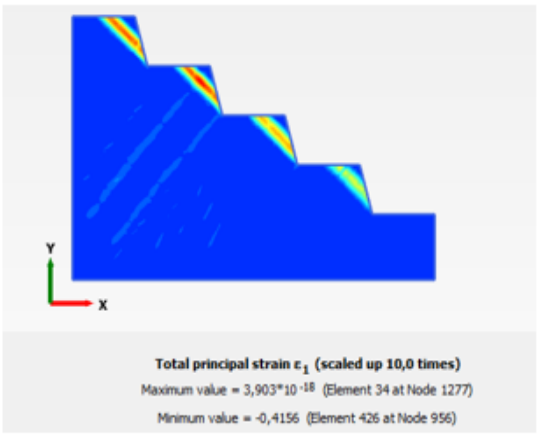


Figure IV.17 : Les déformations de cisaillement dans le Fer pour des orientations de fractures

(136°) (145°) (169°)

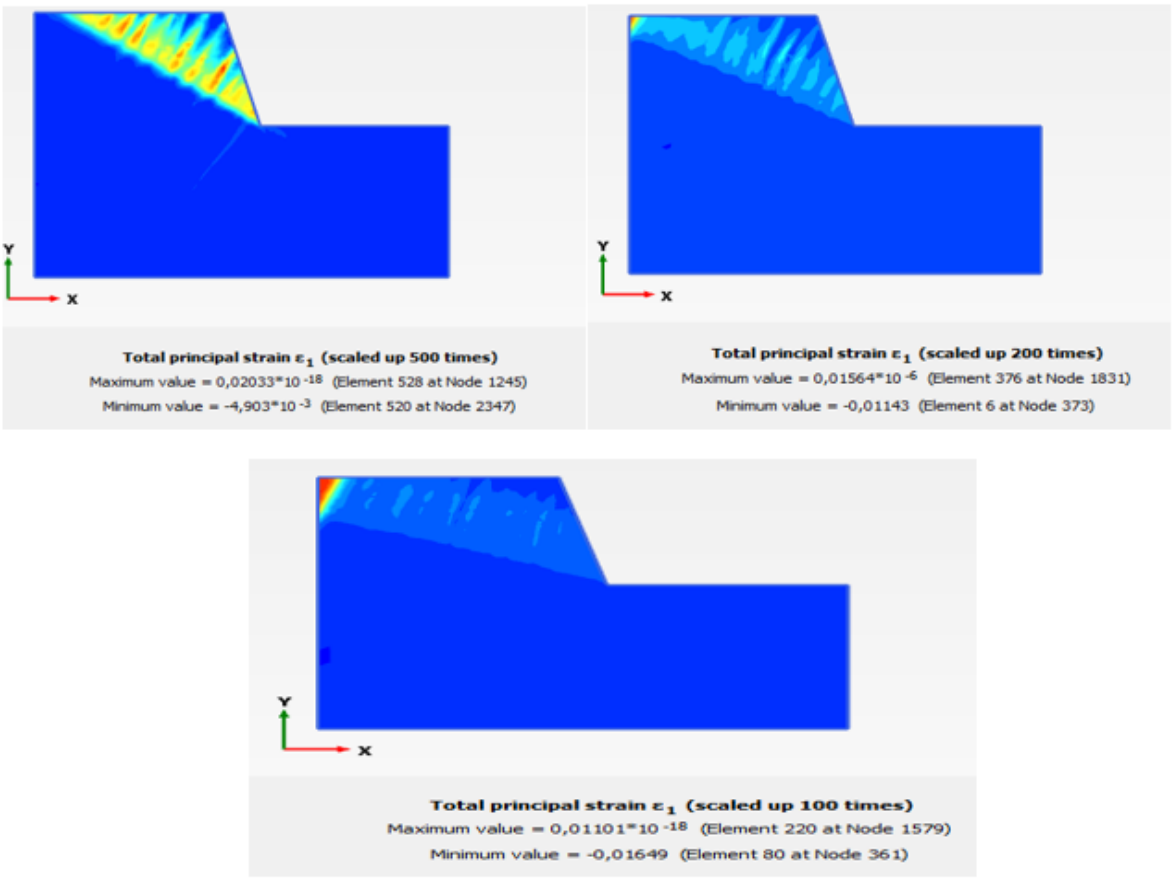


Figure IV.18 : Les déformations de cisaillement dans le Calcaire pour des fractures (145°) (153°) (160°)

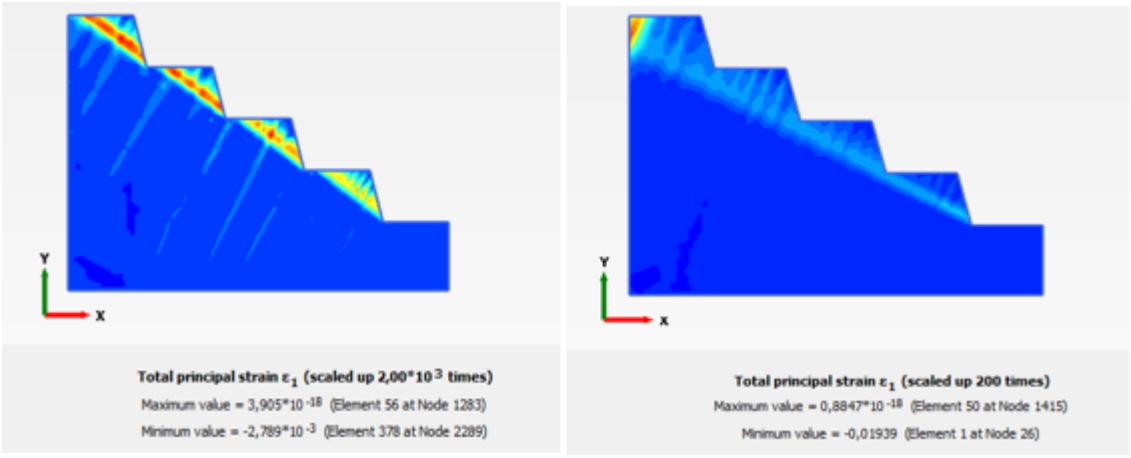


Figure IV.19 : Les déformations de cisaillement dans le Calcaire pour des orientations de fractures (145°) (153°)

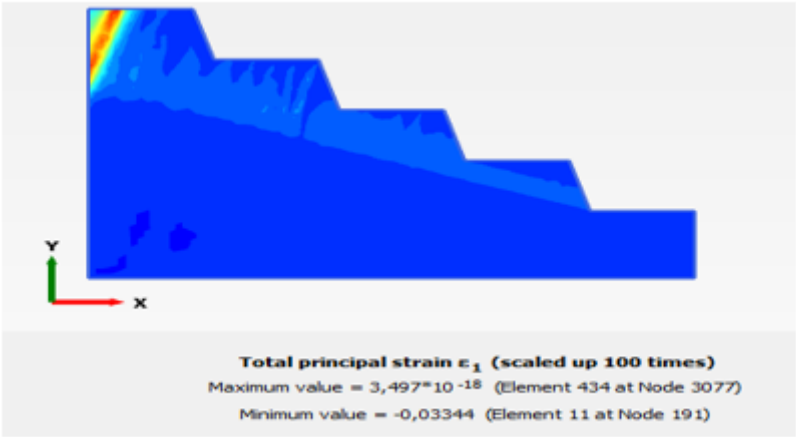


Figure IV.20 : Les déformations de cisaillements dans le Calcaire pour une fracture (160°)

- **La valeur de coefficient de sécurité FS :**

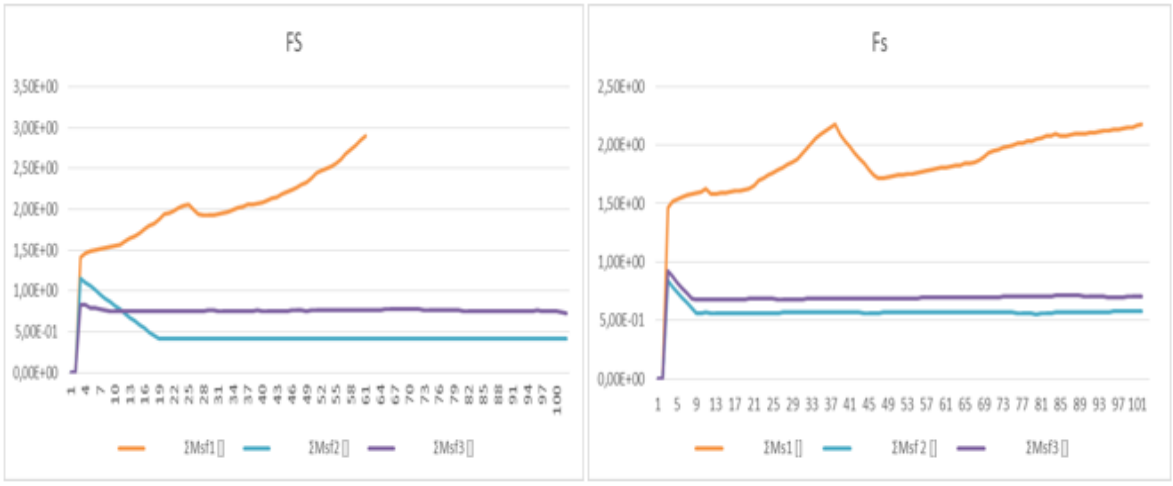


Figure IV.21 : les valeurs de FS – a (Marne un seul gradin) -b (Marne 4 gradins)

Avec :

- Fs1 : pour 110°
- Fs2 : pour 135°
- Fs3 : pour 145°

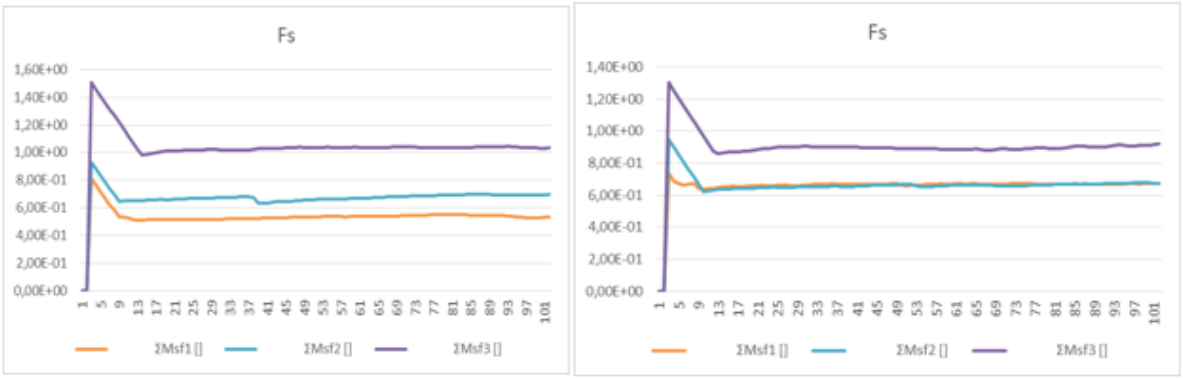


Figure IV.22 : la valeur de FS – a) un seul gradin) – b) 4 gradins

Avec :

- Fs1 : pour 136°
- Fs2 : pour 145°
- Fs3 : pour 169°

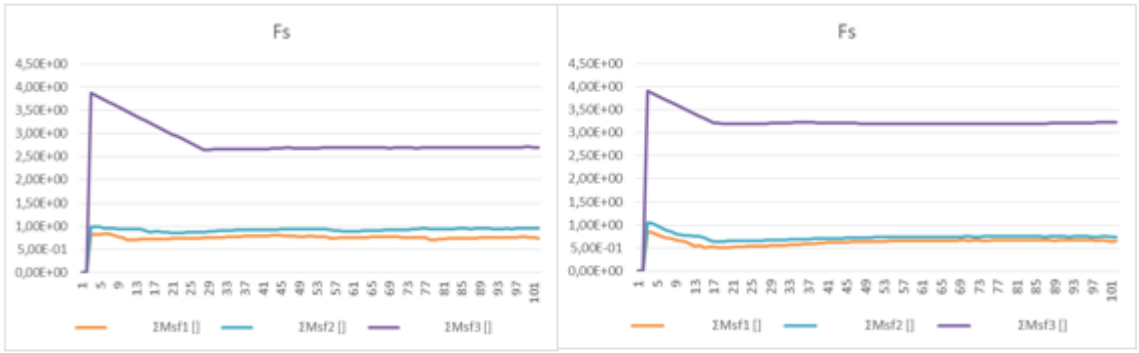


Figure IV.23 : la valeur de FS dans le Calcaire- a) un seul gradin) –b 4 gradins

Avec :

- Fs1 : pour 145°
- Fs2 : pour 153°
- Fs3 : pour 160°

IV.6 interprétation des résultats obtenus par le calcul numérique :

Les valeurs minimales du facteur de sécurité obtenues sont toutes inférieures à 1,2, seuil généralement retenu dans le domaine minier pour garantir la stabilité. Cette situation met en évidence une instabilité (de 0.4 à 0.8) marquée dans les gradins, cette instabilité est dus principalement a la présence des fractures de différentes direction et les caractéristiques géométriques sans oublier les caractéristiques géotechniques des marnes présentes dans des gradins tant à l'échelle locale (un seul gradin) qu'à l'échelle globale (quatre gradins).

IV.7 Amélioration par modification géométrique :

Pour évaluer l'influence de la géométrie sur la stabilité, nous allons effectuer des modifications locales au niveau de la géométrie des gradins, en réduisant leur hauteur et leur inclinaison. Nous analyserons ensuite la variation du facteur de sécurité (FS) .La géométrie des modèles utilisés est présentée dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Les géométries des modèles proposés :

N° des gradins	La hauteur	La largeur	L'angle d'inclinaison
1 seul gradin	**30**	**45,77**	**60**
4 Gradins	**60**	**123,1**	**60**

- **Les déformations de cisaillement après l'amélioration :**

  On a procédé à des modifications géométriques ou on a réalisées plusieurs configurations de 15 ,12 et 10 m et des ongles de 70 ; 65 et 60° d'où nous présentant les meilleurs résultats qui sont présentées dans les figures suivantes :

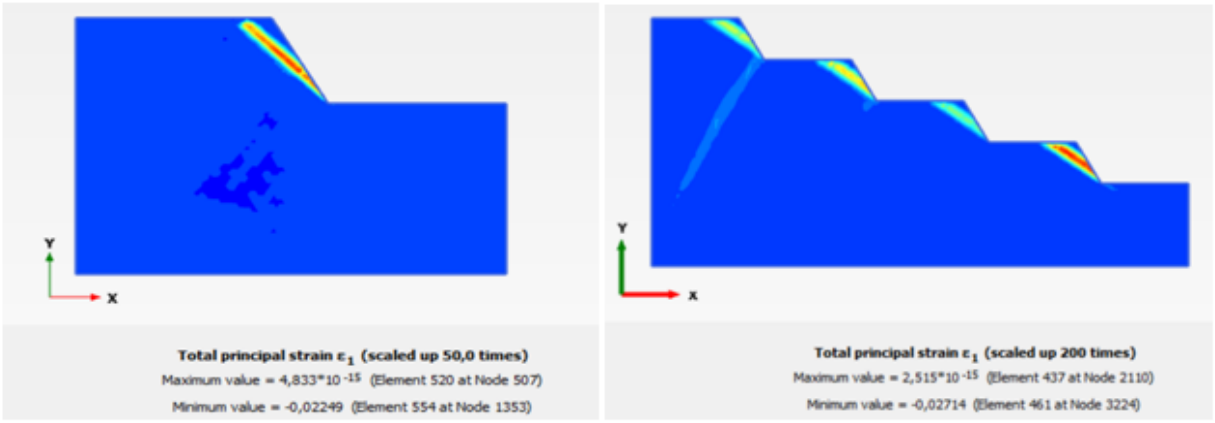


Figure IV.24 : Les déformations de cisaillement dans la Marne après l'amélioration- a) gradin) –b) 4 gradins

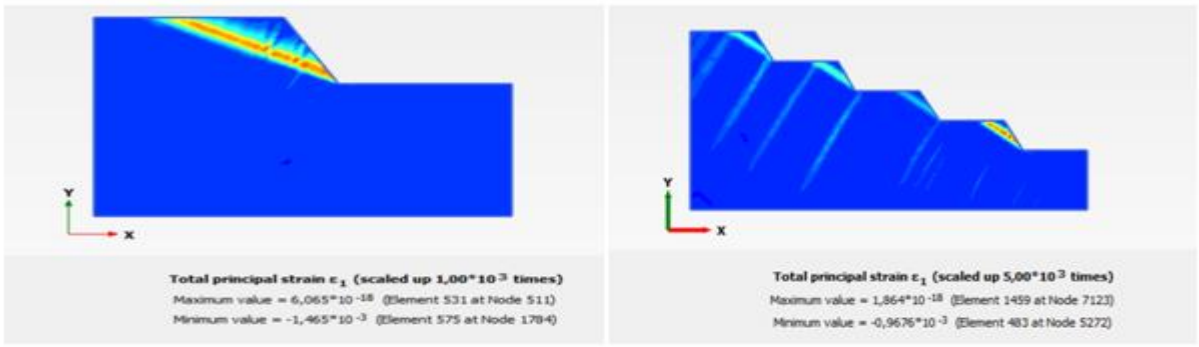


Figure IV.25 : Les déformations de cisaillement dans le Fer après l'amélioration – a) gradin – b) 4 gradins)

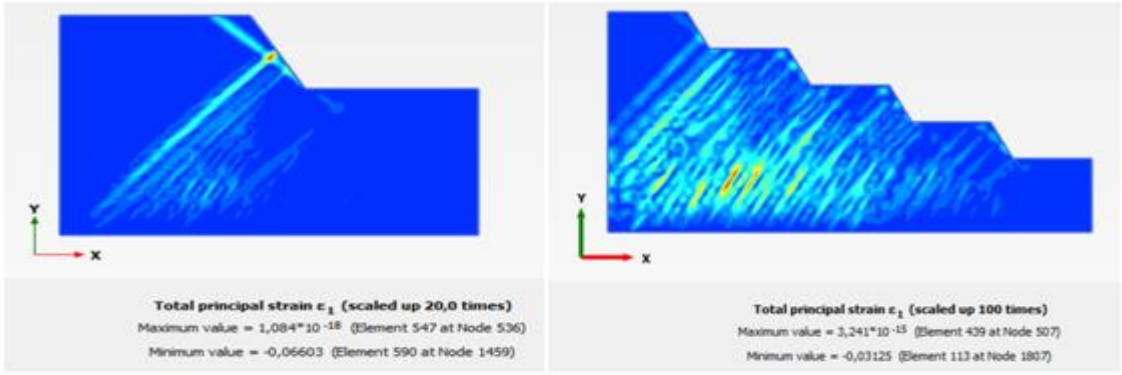


Figure IV.26 : Les déformations de cisaillement dans le Calcaire après l'amélioration – a) gradin) –b) 4 gradins

- **La valeur de coefficient de sécurité FS :**

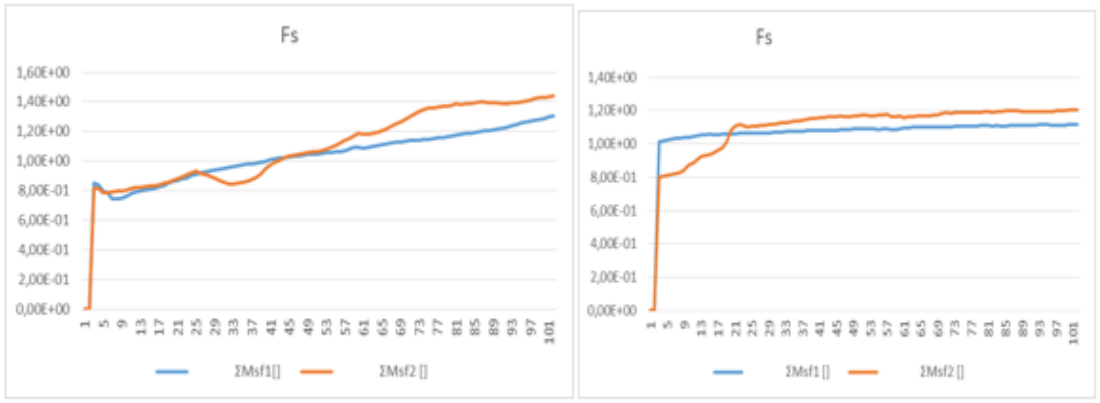


Figure IV.27 : les valeurs de FS pour – a) la Marne- b) Fer

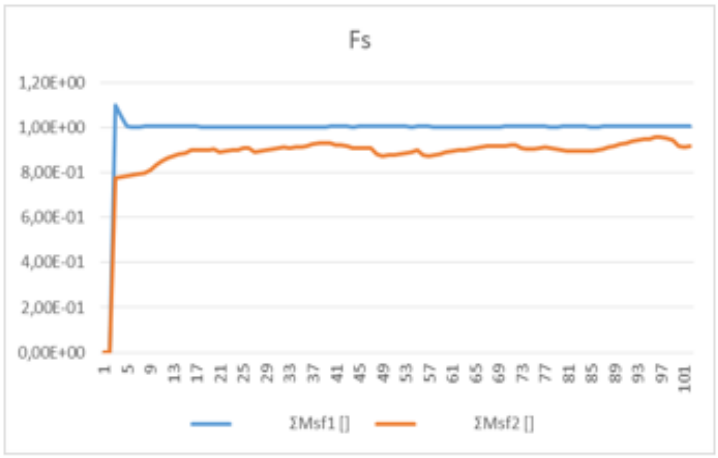


Figure IV.28 : la valeur de FS (Calcaire)

Avec

FS1 : pour un seul gradin

FS2 : pour 4 gradins

IV.7.1 interprétation des résultats obtenus :

Le re-profilage proposé c'est à dire (une hauteur H=10 m et β=60° sans oublier le palier de repos avec une plat forme de travail de 20 m de largeur), nous a permet de trouver des résultats très satisfaisantes et le coefficient de sécurité trouver pour le profil proposée nous permet de dire que les gradins de viennent plus stable qui varie de 1.18 jusqu'à 1.4 sans oublier des valeurs très élevées pour le calcaire de l'ordre de 2 jusqu'à 4.

IV.8 Conclusion :

Le logiciel utilisé produise des résultats comparables, confirmant ainsi que l'état des gradins dans la mine d'El Ouenza est critique et présente un danger réel pour la sécurité du personnel et des engins.

À partir des résultats issus de la modélisation numérique, on observe que les coefficients de sécurité des modèles de base sont largement inférieurs à la marge de sécurité recommandée (inférieurs à 1,2), ce qui traduit une instabilité importante.

En revanche, dans le modèle proposé, les coefficients de sécurité trouvées sont plus élevés de 1.2 jusqu'à 1.4 pour les marnes et le Fer et qui sont proches de 1,2 ce qui montre que la modification géométrique des gradins améliore considérablement leurs stabilité. D'où nous pouvons conclure que la modification proposée influe considérablement sur la masse des roches en amont du gradin qui minimise leurs poids et par conséquent les forces moteurs devienne très minime d'où la possibilité de détachement ou de glissement devienne négligeable.

Conclusion générale

Conclusion générale et recommandations :

Dans le cadre de l'ingénierie géotechnique minière, la stabilité des talus constitue une problématique centrale dans les exploitations à ciel ouvert, en raison de ses répercussions directes sur la sécurité des travailleurs, la continuité des opérations et la préservation des infrastructures. Ce phénomène est dû à un déséquilibre entre les forces qui tendent à mobiliser les matériaux et celles qui leur résistent à l'intérieur du massif rocheux ou meuble, entraînant des risques de glissements susceptibles de compromettre l'intégrité du site.

Dans cette optique, nous avons choisi le quartier ZERGA de la mine à ciel ouvert d'El Ouenza comme cas d'étude. Pour bien cerner la problématique, nous avons commencé par synthétiser les différents modes d'instabilité des talus ainsi que les systèmes de classification géomécanique permettant d'évaluer la qualité géotechnique du massif, en tenant compte des facteurs influençant la stabilité tels que la résistance des roches, la présence d'eau et la nature des discontinuités.

L'analyse des données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques du massif d'El Ouenza montre qu'il est composé de formations datant du Trias, Jurassique, Crétacé, Éocène, Miocène et Quaternaire. Le réseau hydrographique y est assez dense et bien développé, bien qu'il soit pauvre en eau. Les résultats des essais géotechniques révèlent que les roches présentent des résistances mécaniques variables : faibles à moyennes pour les marnes, et plus élevées pour les calcaires et les formations ferrugineuses.

L'étude détaillée réalisée sur les gradins du quartier ZERGA a mis en évidence plusieurs points :

- Les méthodes géomécaniques appliquées (RQD, RMR et GSI) ont permis de classer les faciès en trois catégories : calcaire et fer de qualité moyenne à bonne, marne de qualité médiocre à très médiocre.
- La classification SMR, appuyée par une projection stéréographique, a montré la présence d'une famille dominante de discontinuités ainsi que deux familles diffuses affectant les quatre gradins du quartier ZERGA.
- Les résultats issus de la modélisation numérique (logiciel PLAXIS) indiquent que les coefficients de sécurité actuels des gradins sont largement inférieurs à la valeur seuil de sécurité (inférieurs à 1,2), ce qui signifie que les gradins sont instables.
- Cependant, dans le modèle proposé avec des modifications géométriques appropriées, les coefficients de sécurité atteignent des valeurs proches de 1,2 ce qui souligne l'impact significatif de la géométrie des gradins sur leur stabilité.

En conclusion, et au vu des résultats obtenus, nous formulons les recommandations suivantes:

- ✓ Renforcer les études géologiques structurales (failles et discontinuités) dans la carrière pour mieux comprendre leur impact sur la stabilité des gradins.

- ✓ Poursuivre les investigations géotechniques par des essais in situ (sondages carottés et mesures géophysiques) afin de mieux identifier les formations géologiques et faciliter l'analyse de la stabilité.

- ✓ Mettre en place un système de surveillance et de maintenance des gradins pour assurer une évaluation continue de leur stabilité, tout en approfondissant les études géologiques et historiques des glissements ayant affecté la mine.

- ✓ Adapter la géométrie des gradins en limitant leur hauteur à 10 mètres et en fixant un angle d'inclinaison inférieur à 60°, afin de garantir une meilleure stabilité.

- ✓ Réduire la quantité d'explosifs lors des tirs dans les gradins constitués principalement de marnes, afin de limiter les risques de déstabilisation.

Ainsi, l'ensemble de ces mesures vise à améliorer la sécurité et la stabilité du massif exploité à El Ouenza et à assurer une exploitation plus sûre et plus durable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] CHEKIR Mohammed et MANI Nidal., "Caractérisation et classification géomécaniques du massif rocheux d'Aokas Bejaia". Master Exploitation Minière, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2016.

[2] BENBOULAKHRAS Mohammed Islam " ., Prise en compte des discontinuités dans l'évaluation de la de la stabilité des gradins d'une carrière à ciel ouvert : cas de la mine de fer de l'Est de l'Ouenza. Mémoire de Master en Génie Minier 2019/2020.

[3] KIMOUR Mohamed., "développement d'une méthodologie d'estimation des discontinuités du massif rocheux en vue de son utilisation en conception minière". Thèse doctorat en science, Université Badji Mokhtar – Annaba, 2016.

[4] Hamza AZZOUZ RACHED Influence des discontinuités des massifs rocheux et l'effet du tir sur la stabilité des talus. Cas de la carrière de Chouf Ammar, M'sila. Thèse doctorat Université Badji Mokhtar – Annaba, 2016.

[5] SEMMACHE Mohamed Fouad., "Etude de stabilité des talus des gradins et des bords de la mine à ciel ouvert de l'Ouenza :cas du quartier Zerga". Mémoire de Magister en Génie Minier, Ecole Nationale Polytechnique, 2016.

[6] Khelil Oussama et Hammadi Sefiane., "Etude géologique et genèse des minéralisations du massif de Ouenza (Nord-Est Algérien), UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA 2022/2023

[7] Lazizi Malek.,"La Mine de l'Ouenza Histoire et Avenir".Arcelor Mittal Tébessa Mine de l'Ouenza, 2012.

[8] BENHANACHI Anis., "actualisation des données et traitement geotechnique du glissement du quartier ZERGA mine de fer OUENZA" Mémoire de fin d'etude 2003

[9] Kharfallah Abdessamed et Kherrat Abdallah., "Classification géomécanique des massifs rocheux et application au cas du tunnel d'Ait Yahia Moussa" 2019-2020

[10] HOUAME Karime - CHALOUG Aymen., "Géologie et Métallogénie de complexe carbonaté Aptien de massif de l'Ouenza. (Willaya de Tebessa) . Université Larbi Tébessi-Tebessa

[11] NF P 18-417 (1989). Béton : Mesure de la dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un Sclérometre , AFNOR.

[12] NF P 94-053(1991). Sols: reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire, AFNOR.

[13] NF P 94-050(1995). Sols: reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux, AFNOR.

[14] M. Pinheiro, S. Sanches, T. Miranda, A. Neves, J. Tinoco., "SQI - Indice d'évaluation des talus rocheux". Université de Minho, Guimarães, Portugal, 2015.

[15] PLAXIS_2D_2024.2_2D_3_Material_Models.pdf

[16] PLAXIS_2D_2024.2_2D_4_Scientific.pdf

[17] PLAXIS_2D_2024.3_2D_0_General_Information.pdf

[18] PLAXIS_2D_2024.3_2D_1Tutorial.pdf

[19] Download Rocscience Dips 7.016 - CivilNode

[20] Google Earth. (2025). [Image satellite de la région du Caire].