



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



MEMOIRE

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

Filière : Génie minier

Option : Géotechnique

Etude de la stabilité des gradins de la mine à ciel ouvert de Boukhadra

Présenté et soutenu par

Ibtissem BAKHOUCHE

Devant le jury:

	Grade	Etablissement
Président : Serhane BRAHMI	(MCB)	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Encadreur : Faouzi MEBROUK	(MAA)	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Examineurs : Dounia AMRANI	(MAA)	Université Larbi Tebessi - Tébessa

Promotion 2022-2023



Année universitaire : 2022-2023

Tébessa le : 08.06.2023

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms de l'étudiant :

Bakhouche Ibtissem

Niveau : 2^{ème} année Master Option : Géotechnique

Thème : Etude de la stabilité des gradins de la mine à ciel ouvert de Boukhadra.

Nom et prénom de l'encadreur : Mebrouk Faouzi

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre 1 : Généralités sur les mouvements des terrains.	
Chapitre 2 : Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique.	
Chapitre 3 : Caractérisation et classification géomécaniques du massif.	
Chapitre 4 : Calcul de la stabilité et modélisation numérique.	



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



مقرر رقم: مؤرخ في: 2023/05/30

يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

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

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

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

- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادة 7 منه،

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

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

- وبموجب المقرر رقم المؤرخ في 2023/05/29 والمتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر،

- وبعد الاطلاع على مقرر تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرخ في

يقر بما يأتي:

المادة الأولى: يُرخصُ للطالب(ة) بخوش ابتسام، المولود(ة) بتاريخ 2000/12/10 ب تبسة، بمناقشة مذكرة الماستر

والموسومة بـ

Etude de la stabilité des gradins de la mine à ciel ouvert de Boukhadra

المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب المعني

بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمان نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.

المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملفّ البيداغوجي للطالب المعني وينشر في النشرة الرسمية لجامعة

العربي التبسي.

حُرر ب تبسة، في: 2023/05/30

عن المدير، وبتفويض منه

مدير معهد المناجم

د. عولمي زويير
مدير معهد المناجم



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



مقرر رقم : مؤرخ في : 2023/05/29

يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،
 - و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتم المرسوم التنفيذي رقم 09-08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،
 - و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،
 - و بموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفايات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و 11 منه،
 - و بموجب القرار رقم 1380 المؤرخ في 09 أوت 2016 و المتضمن مواءمة التكوينات في الماستر بعنوان جامعة تبسة في ميدان "علوم وتكنولوجيا".
 - و بموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل للملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 و المتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص جيوتقني
 - و بعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم المؤرخ في
- يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى: تُعيّن بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضّرة من طرف الطّالِب (ة):
بخوش ابتسام، المولود (ة) بتاريخ 2000/12/10 ب تبسة ،

والموسومة ب Etude de la stabilité des gradins de la mine à ciel ouvert de Boukhadra

والمسجّل (ة) بمعهد المناجم

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

رقم	الاسم واللقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصّفة
1	براهي سرحان	أستاذ محاضر - ب	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	مبروك فوزي	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفا
3	عمراني دنيا	أستاذة مساعدة - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	ممتحنة

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

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

حُرّر ب تبسة، في: 2023/05/29

عن المدير، وبتفويض منه

مدير معهد المناجم



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي: جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

الصفة : طالب ماستر 2

السيد : بخوش ابتسام

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 106392211 والصادرة بتاريخ 24.10.2017

قسم : المناجم والجيوتكنولوجيا

المسجل بمعهد المناجم

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

Etude de la stabilité des gradins de la mine à ciel ouvert de Boukhadra

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

التاريخ 2023.06.08

إمضاء المعني (ة)



Remerciement

*Tout d'abord, je remercie **DIEU** de m'avoir donné la force et le courage d'accomplir ce travail et la volonté d'achever mes études.*

*Je tiens remercier, mon encadreur Monsieur **Mabrouk Faouzi**,
Docteur à l'institut des mines de l'université Larbi Tebessi –Tébessa
Pour ses encouragements, ses conseils précieux, ses aides et sa
disponibilité.*

*J'adresse aussi Monsieur **Brahmi Serhane** d'avoir accepté de
présider ce jury et Madame **Amrani Dounia** pour avoir accepté
d'examiner mon travail.*

*Je voudrais citer et remercier tous les enseignants Qui ont assurés
l'excellente formation dans le département du **Génie minier**, option
«Géotechnique» à L'université de Tébessa. Je n'oublierai pas toutes
les personnes qui m'ont quotidiennement apporté leur aide, collègues
amis et membre de ma famille.*

Bakhouche Ibtissem

Dédicace

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu Le Tout Puissant et ma très chère mère de m'avoir permis d'arriver à ce stade de mon éducation et qui m'a donné l'énergie nécessaire pour terminer mes études.

Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont toujours présents dans mon Cœur.

A toute ma belle-famille

A ma très chère mère

Mon Père «Allah yarhmou ». Je ne peux pas L'appeler, mais je peux penser à lui. C'est la seule chose que je peux faire parce qu'il est mort, mais je demande à Dieu toujours d'avoir pitié de lui et D'entrer dans son paradis

A mes sœurs « Khouloud et Asma ».

A mes amies « Aoulaya, Hadil, Bouthaina ».

A tous mes collègues et mes amis sans exception. A ma promotion (2023).

A tous ceux que J'ai côtoyé au cours de mes études, profs et étudiants.

Bakhouche Ibtissem

Résumé

La stabilité des gradins dans l'exploitation minière est souvent un problème important qu'il faut résoudre surtout avec l'augmentation des profondeurs d'exploitation. La stabilité des talus jouent le rôle le plus important dans la productivité, l'économie et la longévité d'une mine.

Suite aux différentes phases de l'effondrement dans la carrière BK II de la mine de fer de Boukhadra depuis 2012 jusqu'à 2019, une analyse de la stabilité des gradins a été effectuée en utilisant plusieurs méthodes ; premièrement une approche basée sur les classifications géomécaniques ; deuxièmement, l'application de la méthode d'équilibre limite par les deux codes (GEOSTUDIOS/SLIDE) et de modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis en utilisons le code (Plaxis 2D) .

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence des différents paramètres technologiques sur la stabilité de la carrière et d'observer le mécanisme de rupture pour différents cas. Les résultats montrent que la valeur du coefficient de sécurité ne satisfait pas la stabilité pour une hauteur de gradin de 15 mètres et d'angle de talus de 80°.

Mots clés : Classification géomécaniques, Carrière, stabilité, équilibre limite.

المخلص

غالبًا ما يكون استقرار المدرجات في المناجم مشكلة مهمة يجب حلها، خاصة مع زيادة أعماق المنجم. يلعب استقرار المنحدرات الدور الأكثر أهمية في الإنتاجية والاقتصاد وطول عمر المنجم.

في أعقاب المراحل المختلفة لانتهاء محجر BK II لمنجم بوخضرة للحديد في الفترة من 2012 إلى 2019 ، تم إجراء تحليل لثبات المدرجات باستخدام عدة طرق ؛ أولاً أسلوب يعتمد على التصنيفات الجيوميكانيكية ؛ ثانيًا تطبيق طريقة التوازن الحدي باستخدام الرمزين (GEOSTUDIOS / SLIDE) والنمذجة الرقمية بناءً على طريقة العناصر المحدودة باستخدام الكود (Plaxis 2D).

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير العوامل المختلفة على استقرار المسار الوظيفي ومراقبة آلية الفشل في حالات مختلفة. أظهرت النتائج أن قيمة عامل الأمان لا تفي بالثبات لخطوة بارتفاع 15 مترًا وزاوية ميل 80 درجة.

الكلمات المفتاحية: التصنيف الجيوميكانيكي ، المحجر ، الاستقرار ، التوازن الحدي.

Abstract

The stability of quarry in mining is often an important problem that must be solved, especially with increasing mining depths. Slope stability plays the most important role in the productivity, economy and longevity of a mine.

Following the different phases of the collapse in the BK II quarry of the Boukhadra iron mine from 2012 to 2019, an analysis of the stability of the stands was carried out using several methods; first an approach based on geomechanical classifications; secondly the application of the limit equilibrium method by the two codes (GEOSTUDIOS/SLIDE) and numerical modeling based on the finite element method using the code (Plaxis 2D).

The main objective of this work is to study the influence of different technological parameters on quarry stability and to observe the quarry failure mechanism for different cases. The results show that the value of the safety factor does not satisfy the stability for a step height of 15 meters and a slope angle of 80° .

Keywords: Geomechanical classification, Quarry, Stability, Limit equilibrium.

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	III
الملخص	III
Abstract	IV
Liste des figures	V
Liste des photos	VIII
Liste des tableaux	IX
Liste des notations	X
Introduction générale	02
Chapitre I : Généralités sur les mouvements des terrains	
I.1. Introduction	05
I.2. Généralités sur les mouvements de terrain	05
I.2.1. Définition du mouvement de terrain	05
I.3.Types des mouvements des terrains	05
I.3.1. Les mouvements lents et continus	05
I.3.1.1. Les glissements	05
I.3.1.1.1. Glissements plans (translatifs)	06
I.3.1.1.2. Glissements rotationnels (circulaire)	07
I.3.1.2. Les affaissements	08
I.3.1.3. Le retrait-gonflement	09
I.3.1.4. Le fluage	09
I.3.1.5. Le fauchage	10
I.3.1.6. La solifluxion	10
I.3.2. Les mouvements rapides et discontinus	11
I.3.2.1. Les effondrements	11
I.3.2.2. Chutes de pierres et de blocs	11
I.3.2.3. Les éboulements	12
I.3.2.4. Les coulées boueuses	13
I.3.2.5. Les laves torrentielles	13
I.4. Glissement rocheux	14
I.4.1. Le glissement plan	14
I.4.2. Le glissement dièdre	14

Table des matières

I.4.3. Le glissement rotationnel	15
I.4.4. La rupture de surplomb	15
I.4.5. La rupture de colonne « par basculement ou par rupture en pied »	15
I.4.6. La rupture par flambage de bancs	16
I.5. Exemples de glissement de terrain en Algérie et dans le monde	16
I.5.1. En Algérie	16
I.5.2. Dans le monde	17
I.6. Structure géométrique des massifs rocheux	18
I.6.1. Les discontinuités	19
I.6.1.1. Description des discontinuités	19
I.6.1.2. Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux	19
I.6.1.3. Classification des discontinuités	20
I.6.1.4. Les caractéristiques géométriques des discontinuités	20
I.7. Les systèmes de classification des massifs rocheux	26
1.7.1. Types et buts des systèmes de classification	26
1.7.1.1. Le Rock Quality Designation index (RQD)	29
1.7.1.2. Rock Mass Rating (RMR)	30
1.7.1.3. Slope Mass Rating (SMR)	32
1.7.1.4. Q-system	34
1.7.1.5. Geological Strength Index (GSI)	34
I.8. Les facteurs qui influent sur la stabilité	35
I.9. Conclusion	37
Chapitre II : Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique	
II.1. Introduction	39
II.2. Historique de la mine	39
II.3. Cadre géographique	40
II.3.1. La situation géographique	40
II.4. Cadre géologique	41
II.4.1. Géologie régionale	41
II.4.2. Géologie du site	42
II.4.3. Stratigraphie	42
II.5. Tectonique	46
II.6. Morphologie du gisement	47

Table des matières

II.8. Méthodes d'exploitation au niveau de la mine de Boukhadra	48
II.9. Les différentes phases de l'effondrement BKII	52
II.10. Reconnaissance géotechnique	55
II.10.1. Les propriétés physiques des roches	55
II.10.2. Les propriétés mécaniques des roches	58
II.11. Conclusion	63
Chapitre III : Caractérisation et classification géomécanique du massif rocheux	
III.1. Introduction	
III.2. Le Rock Quality Designation index (RQD)	65
II.2.1. La classification du massif rocheux par le système RQD	65
III.3. Le Rock Mass Rating (RMR)	67
III.3.1. La classification du massif rocheux par le système de classification RMR	70
III.4. La projection stéréographique	72
III.5. Représentation stéréographique	73
III.5.1. Les directions et les pendages des talus	73
III.5.2. La projection des directions et des pendages de la discontinuité de différents gradins	74
III.6. Slope Mass Rating (SMR)	76
III.6.1. La classification du massif rocheux par le système de classification SMR	76
III.7. Q-system	79
III.7.1. La classification du massif rocheux par le Q-system	80
III.8. Geological Strength Index (GSI)	81
III.8.1. La classification du massif rocheux par le GSI	82
III.9. Conclusion	83
Chapitre IV : Calcul de la stabilité et modélisation numérique	
IV.1. Introduction	86
IV.2. Méthode de calcul de la stabilité des talus	86
IV.2.1. Définition du coefficient de sécurité	86
IV.2.2. Méthodes de calcul de la stabilité	86
IV.2.2.1. Méthodes basées sur l'équilibre limite	87
IV.2.2.1.1. Méthode des tranches	87
IV.3. Programme GEO-STUDIO [2014]	89
IV.3.1. La géométrie et les paramètres géotechniques des modèles	90

Table des matières

IV.3.2. Calcul par Geoslope	92
IV.3.3 Interprétation des résultats	95
IV.4. Programme PLAXIS [2 D V8.02]	95
IV.4.1. Les modèles incorporés dans le PLAXIS	96
IV.4.1.1. Le modèle élastique linéaire (EL)	96
IV.4.1.2. Le modèle de Mohr -Coulomb (MCM)	96
IV.4.1.3. Modèle de durcissement par écrouissage isotropique « Hardening-Soil model » (HSM)	97
IV.4.1.4. Modèle des sols doux ou « Soft-Soil-Creep model » (SSCM)	98
IV.4.2. Le modèle numérique du calcul de glissement par PLAXIS	99
IV.4.2.1. Définition des données	99
IV.4.2.2. La géométrie des modèles	99
IV.4.2.3. Les conditions aux limites	100
IV.4.2.4. Caractéristiques des matériaux	100
IV.4.2.5. Générations du Maillage	101
IV.4.2.6. Conditions initiales	102
IV.4.2.7. Procédure des calculs	103
IV.4.2.8. Les résultats de la modélisation	104
IV.4.3. Interprétation des résultats	108
IV.5. Programme Roc-Science « Slide »	109
IV.5.1. La géométrie des modèles	109
IV.5.2. Calcul par Roc-Science « Slide »	110
IV.5.2.1 Facture de sécurité et surface de rupture critique	110
IV.5.2.2. Interprétation des résultats	113
IV.5.2.3. Résultats globaux de calcul de stabilité	114
IV.6. Conclusion	114
Conclusion générale et recommandations	117
Références bibliographiques	121

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Bloc diagramme d'un glissement de terrain.	06
Figure I.2	Glissement plan.	06
Figure I.3	Glissement rotationnel.	07
Figure I.4	Schéma de principe d'un glissement rotationnel simple.	07
Figure I.5	Schéma de principe d'un glissement rotationnel complexe.	08
Figure I.6	Mécanisme de base des affaissements de surface.	08
Figure I.7	Phénomène de retrait de gonflement.	09
Figure I.8	Le phénomène de fluage.	09
Figure I.9	Effondrement du toit des cavités.	11
Figure I.10	Coulée de boue.	13
Figure I.11	Schéma d'une lave torrentielle.	13
Figure I.12	Glissement rotationnel (fractionné).	15
Figure I.13	Rupture de banc par flambage.	16
Figure I.14	Les trois principales structures de massifs rocheux.	19
Figure I.15	Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés.	19
Figure I.16	Persistance de différents ensembles de fractures.	21
Figure I.17	Orientation d'un plan de discontinuité.	22
Figure I.18	Graphique de projection sphérique et d'orientation de discontinuités.	22
Figure I.19	Illustration de pendage et de l'azimut d'une discontinuité.	19
Figure I.20	L'espacement des discontinuités.	19
Figure I.21	Mesure de la fréquence des discontinuités.	23
Figure I.22	Fissure ouverte et remplie.	25
Figure I.23	Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR (Bieniawski [1973]).	30
Figure I.24	Facteurs passifs et actifs pouvant entraîner une instabilité.	37
Figure II.1	Plan topographique de la mine de BOUKHADRA.	40
Figure II.2	Situation géographique de la région du BOUKHADRA.	41
Figure II.3	A Carte géologique simplifiée de la zone d'étude. B Coupe géologique NW–SE de la zone d'étude.	42
Figure II.4	Coupe stratigraphique des monts du Mellegue d'après [Dubourdieu (1956, 1959) ; David (1956) ; Madre (1969) ; Fleury (1969) ; Thibièroz and Madre (1976) ; Chikhi (1980) ; Othmanine (1987), Bouzenoune (1993), Vila et al.	45

Liste des figures

	(2001).]	
Figure II.5	Trois coupes transversales dans l'anticlinal de BOUKHADRA.	46
Figure II.6	Morphologie du gisement de BOUKHADRA.	47
Figure II.7	Schéma de plan de tir à ciel ouvert.	49
Figure II.8	Présentation du tracé de l'ouvrage. (La galerie principale du niveau 1105 m).	50
Figure II.9	Méthode d'exploitation souterraine par sous niveau abattue.	52
Figure II.10	Principe d'un essai de cisaillement.	62
Figure III.1	Projection de Wulff.	72
Figure III.2	Projection stéréographique section 14 / GRADIN 01.	74
Figure III.3	Projection stéréographique section 10 / GRADIN02.	74
Figure IV.1	1,2 Découpage en tranches d'un talus.	87
Figure IV.2	Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Fellenius.	88
Figure IV.3	Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Bishop simplifiée.	89
Figure IV.4	Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune.	91
Figure IV.5	Le modèle géométrique de la rampe du conglomérat	91
Figure IV.6	Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune+mélange.	91
Figure IV.7	La valeur du coefficient de sécurité pour la marne jaune à l'état sec.	92
Figure IV.8	La valeur du coefficient de sécurité pour la marne jaune à l'état saturé.	93
Figure IV.9	La valeur du coefficient de sécurité pour le conglomérat à l'état sec.	93
Figure IV.10	La valeur du coefficient de sécurité pour la marne jaune à l'état saturé.	93
Figure IV.11	La valeur du coefficient de sécurité pour la marne jaune + mélange à l'état sec.	94
Figure IV.12	La valeur du coefficient de sécurité pour la marne jaune + mélange à l'état saturé.	94
Figure IV.13	Organigramme du code Plaxis.	96
Figure IV.14	Courbe intrinsèque du modèle de Mohr- Coulomb.	97
Figure IV.15	Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune.	97
Figure IV.16	Le modèle géométrique de la rampe du conglomérat.	99
Figure IV.17	Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune+mélange.	102
Figure IV.18	Le maillage de la rampe de la marne jaune.	102
Figure IV.19	Le maillage de la rampe du conglomérat.	103
Figure IV.20	Le maillage de la rampe de la marne jaune+mélange.	103
Figure IV.21	Les conditions hydrauliques des différentes rampes.	103

Liste des figures

Figure IV.22	La distribution des Contraintes totales (Marne jaune).	104
Figure IV.23	La distribution des Contraintes totales (Marne jaune+mélange).	104
Figure IV.24	La distribution des Contraintes totales (Conglomérat).	105
Figure IV.25	Les procédures de calculs.	105
Figure IV.26	La déformation de maillage (Marne jaune).	106
Figure IV.27	La déformation de maillage (Marne jaune + mélange).	106
Figure IV.28	La déformation de maillage (Conglomérat).	106
Figure IV.29	La déformation de cisaillement (Marne jaune).	107
Figure IV.30	La déformation de cisaillement(Conglomérat).	107
Figure IV.31	La déformation de cisaillement (Marne jaune + mélange).	108
Figure IV.32	La valeur du coefficient de sécurité (Marne jaune).	108
Figure IV.33	La valeur du coefficient de sécurité (Conglomérat).	109
Figure IV.34	La valeur du coefficient de sécurité (Marne jaune +Mélange).1	109
Figure IV.35	Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune.	110
Figure IV.36	Le modèle géométrique de la rampe du conglomérat.	110
Figure IV.37	Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune+ mélange.	110
Figure IV.38	Coefficient de sécurité pour la rampe de la marne jaune à l'état sec.	111
Figure IV.39	Coefficient de sécurité pour la rampe de la marne jaune à l'état saturé.	111
Figure IV.40	Coefficient de sécurité pour la rampe de la marne jaune+mélange à l'état sec.	111
Figure IV.41	Coefficient de sécurité pour la rampe de la marne jaune à l'état saturé.	112
Figure IV.42	Coefficient de sécurité pour la rampe du conglomérat à l'état sec.	112
Figure IV.43	Coefficient de sécurité pour la rampe du conglomérat à l'état saturé.	112

Liste des photos

Photo	Titre	Page
Photo I.1	Le phénomène de fauchage.	10
Photo I.2	Le phénomène de solifluxion.	10
Photo I.3	Chutes de pierres et de blocs.	08
Photo I.4	L'éboulement rocheux.	12
Photo I.5	Glissement plan.	14
Photo I.6	Glissement dièdre.	14
Photo I.7	Rupture de surplomb.	15
Photo I.8	Basculement d'une colonne par rupture du pied à lançon de Provence.	16
Photo I.9	Glissement de Quartier El ZARGA (la mine de fer d'Ouenza).	17
Photo I.10	Cas du glissement plans de la mine de Kef Essennoun.	17
Photo I.11	Exemple d'un glissement de terrain « Heart Mountain ».	18
Photo II.1	Un effondrement dans le niveau 1285.	53
Photo II.2	Effondrement au niveau de la carrière BKII.	54
Photo II.3	Effondrement au niveau de la carrière BKII	54

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	La description suggérée par l'ISRM.	21
Tableau I.2	La description de la persistance suggérée par l'ISRM.	21
Tableau I.3	Description de l'espacement des discontinuités.	24
Tableau I.4	La description d'ouverture.	26
Tableau I.5	Systèmes de classification du massif rocheux.	28
Tableau I.6	Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux (tiré de Deere, 1968).	29
Tableau I.7	Qualité du massif rocheux selon Bieniawski.	31
Tableau I.8	Notes des paramètres SMR (Romana, 1993).	33
Tableau I.9	Description des classes SMR (Romana, 1993).	33
Tableau I.10	Qualité du massif rocheux selon Barton.	34
Tableau I.11	Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI.	35
Tableau II.1	Les profondeurs moyennes et l'angle de pendage du gîte exploité en souterrain.	50
Tableau II.2	Les dimensions de la galerie principale du niveau 1105 m.	51
Tableau II.3	Failles et fissures existantes dans la galerie principale du niveau 1105.	51
Tableau II.4	La masse volumique apparente des massifs rocheux de BOUKHADRA.	56
Tableau II.5	La Teneur en eau des massifs rocheux de BOUKHADRA.	57
Tableau II.6	Le degré de saturation des massifs rocheux de BOUKHADRA.	57
Tableau II.7	Les paramètres physiques des massifs rocheux de BOUKHADRA.	58
Tableau II.8	Classification des roches en fonction de la résistance à la compression.	59
Tableau II.9	La résistance à la compression des massifs rocheux de BOUKHADRA d'après le marteau de Schmidt	59
Tableau II.10	Classification des massifs rocheux du BOUKHADRA en fonction de la résistance à la compression.	59
Tableau II.11	Classification des roches en fonction de la résistance à la traction.	60
Tableau II.12	La résistance à la traction des massifs rocheux de BOUKHADRA en fonction de la résistance à la compression.	61
Tableau II.13	Classification des massifs rocheux du BOUKHADRA en fonction de la résistance à la traction.	61

Liste des tableaux

Tableau II.14	Les paramètres mécaniques de différentes formations dans Boukhadra.	62
Tableau III.1	Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux (tiré de Deere, 1968).	65
Tableau III.2	Les résultats de RQD des différentes sections de GRADIN 01 .	66
Tableau III.3	Les résultats de RQD des différentes sections de GRADIN 02 .	66
Tableau III.4	Qualité de la masse rocheuse d'après le système de classification RQD.	67
Tableau III.5	Paramètres de classification des roches et notes de pondération.	69
Tableau III.6	Qualité du massif rocheux selon Bieniawski.	70
Tableau III.7	Exemple de classification de section 01/ GRADIN 01.	70
Tableau III.8	Les résultats de RMR des différentes sections de GRADIN 01 .	71
Tableau III.9	Les résultats de RMR des différentes sections de GRADIN 02 .	71
Tableau III.10	Qualité de la masse rocheuse de la mine de fer de BOUKHADRA d'après le système de classification RMR.	71
Tableau III.11	Les directions et les pendages des talus des différentes sections du GRADIN01.	73
Tableau III.12	Les directions et les pendages des talus des différentes sections du GRADIN02.	73
Tableau III.13	Les résultats de la projection des différentes sections de GRADIN 01.	75
Tableau III.14	Les résultats de la projection des différentes sections de GRADIN 02.	75
Tableau III.15	Exemple de classification dans la section 14/ GRADIN 01.	77
Tableau III.16	Les résultats de SMR des différentes sections de GRADIN 01.	77
Tableau III.17	Les résultats de SMR des différentes sections dans le GRADIN 02.	78
Tableau III.18	Les différentes classes de la stabilité par la valeur du SMR	78
Tableau III.19	Qualité du massif rocheux selon Barton.	79
Tableau III.20	Les résultats de Q-system des différentes sections de GRADIN 01 .	80
Tableau III.21	Les résultats de Q-system des différentes sections de GRADIN 02 .	80
Tableau III.22	Qualité de la masse rocheuse d'après le système de classification Q-system.	81
Tableau III.23	Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI.	82
Tableau III.24	Les résultats de GSI des différentes sections de GRADIN 01 .	82
Tableau III.25	Les résultats de GSI des différentes sections de GRADIN 02 .	82
Tableau III.26	Qualité de la masse rocheuse d'après le système de classification Q-system.	83

Liste des tableaux

Tableau IV.1	Équilibre des talus en fonction des valeurs expérimentales du coefficient de sécurité.	86
Tableau IV.2	Les valeurs géométriques des modèles réalisées.	90
Tableau IV.3	Les différents paramètres géotechniques introduits dans SLOPE/W pour la modélisation.	92
Tableau IV.4	Les résultats de coefficient de sécurité.	94
Tableau IV.5	Les différentes caractéristiques de la Marne jaune, minerai de fer et conglomérat.	100
Tableau IV.6	Les résultats du coefficient de sécurité.	108
Tableau IV.7	Les résultats de coefficient de sécurité.	113
Tableau IV.8	Les résultats globaux.	114

Liste des notations

Liste des notations :

E : Module de Young.	[KN /m2]
C : La cohésion.	[KN /m2]
v :Coefficient de poisson.	
Φ : L'angle de frottement interne.	[°]
Ψ : angle de dilatance.	[°]
W : La teneur en eau.	[%]
Sr : Le degré de saturation.	[%]
MS : La masse du matériau sec.	[g]
Vs : Le volume des grains après broyage.	[Cm ³]
Vt : Le volume de l'échantillon.	[Cm ³]
ρ_s : La masse volumique du solide.	[g/cm ³]
ρ_h : La masse volumique naturelle.	[g/cm ³]
ρ_d : La masse volumique sèche ou réelle.	[g/cm ³]
ρ_{sat} : La masse volumique saturée	[g/cm ³]
τ :Contraintes de cisaillement.	
σ_n : Contrainte normale.	
Rc : La résistance à la compression.	[Kgf /cm ²]
Rt : La résistance à la traction.	[Kgf /cm ²]
Fmax : La charge maximale appliquée.	
Jv : La densité volumique des joints.	
Jn : Nombre de famille de discontinuités	
Jr : Paramètre de rugosité des joints.	
Ja : Paramètre d'altération des joints.	
Jw : Paramètre hydraulique.	
BK : Boukhadra.	
E : Est.	
S : Sud.	
O : Ouest.	
N : Nord.	

*Introduction
générale.*



Introduction générale

La stabilité des pentes des mines à ciel ouvert pendant leur exploitation est une équation à plusieurs variables (les conditions géologiques, les paramètres mécaniques et les caractéristiques des réseaux de discontinuités), ce problème impose le contrôle continu des contraintes géométriques, technologiques et paramètres de sécurité, le phénomène de glissements de terrain dans les opérations minières à ciel ouvert est assez fréquent.

Avant de commencer une analyse de stabilité, il est important de collecter les informations pertinentes pour cette analyse, en quantité et précision suffisantes pour utiliser correctement la technique choisie. En fonction du type de structure, les propriétés qui contrôlent le plus la stabilité de l'excavation varient. Dans le cas d'un à ciel ouvert, ces propriétés sont l'orientation, le pendage, l'espacement et la continuité des discontinuités présentes dans le massif rocheux,

L'objectif de ce travail est d'étudier la stabilité des gradins de la carrière BK II de la mine de fer de Boukhadra suite aux phases de l'effondrement qui a eu lieu depuis 2012, pour arriver aux objectifs visés nous utilisons plusieurs méthodes telles que les classifications géomécaniques, l'équilibre limite et la méthode des éléments finis,

Ce travail est divisé en quatre chapitres avec une introduction générale et une conclusion avec des recommandations.

Le premier chapitre présente des généralités sur les mouvements de terrain ; leurs types et les facteurs qui influent sur la stabilité, avec quelques exemples à travers le monde et en Algérie

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude géologique, présentation hydrogéologique et une reconnaissance géotechnique détaillée au laboratoire et l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus

Dans le troisième chapitre, nous présentons les méthodes classification géomécaniques appliquées et une évaluation de la qualité des formations géologiques afin d'estimer leurs états de stabilité,

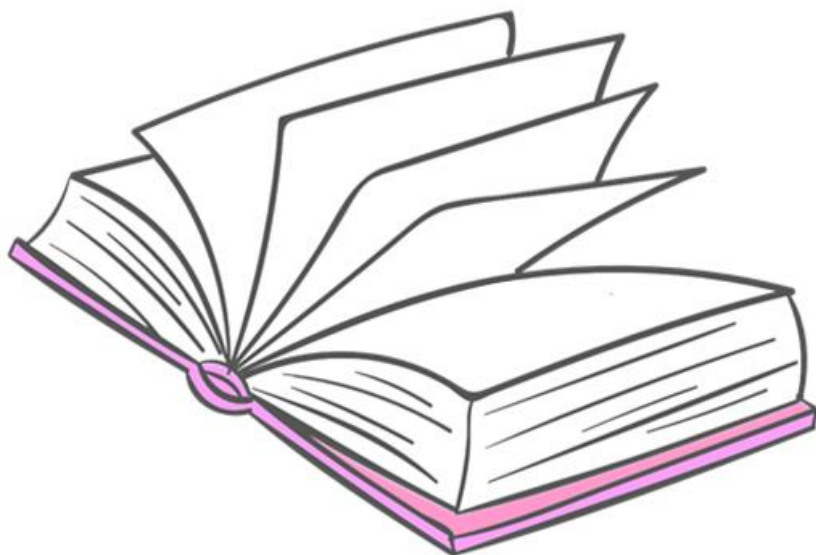
Introduction générale

Dans le quatrième chapitre, on introduira une approche qui nous permettant de donner un modèle en utilisant la méthode des éléments finis par le code PALXIS V.8.2 et l'application des méthodes analytiques a l'aide des programmes GEOSLOPE, et SLIDE 5 afin de comparer et valider les résultats.

Enfin, une conclusion générale est présentée avec des recommandations

Chapitre I:

*Généralités sur
les mouvements
des terrains*



I.1. Introduction

Les mouvements de terrain sont l'un des phénomènes géotechniques les plus répandus dans le monde, qu'ils sont apparus lors de la conjonction naturelle ou artificielle de facteurs « topographiques, géologiques, hydrologiques et climatiques ».

Dans ce chapitre ; premièrement, on s'intéressera à la description de tous les mouvements de terrain par la définition et la description de leurs types selon la vitesse de déplacement. Deuxièmement, on décrit les massifs rocheux et leurs caractéristiques et leurs systèmes de classification. Et finalement, on termine par les facteurs qui influent sur la stabilité.

I.2. Généralités sur les mouvements de terrain

I.2.1. Définition du mouvement de terrain

Les mouvements de terrain sont des déplacements (avec ou sans rupture) vers l'aval de masses rocheuses compactes ou désagrégées et/ou de terrain meuble (sols y compris) et d'eau, sous l'effet d'influence naturelle (agent d'érosion, pesanteur, séisme...etc.) ou anthropique (exploitation, déboisement, terrassement,...etc.) [1] [31]

I.3. Types des mouvements des terrains

On distingue deux ensembles des mouvements des terrains, selon la vitesse de déplacement :

- ✓ **Les mouvements lents** : les affaissements, les tassements, les glissements, le retrait-gonflement, la solifluxion, le fluage, le fauchage.
- ✓ **Les mouvements rapides** : les effondrements, les chutes de pierres et de blocs, les éboulements, les coulées boueuses et les laves torrentielles. [1]

I.3.1. Les mouvements lents et continus

I.3.1.1. Les glissements

Un glissement de terrain est un déplacement lent (quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) et est un détachement d'un versant instable ou de colline qui glisse dans le sens de la pente, fragilisé par les activités humaines ou par des phénomènes naturels qu'ils soient climatiques, géologiques ou encore géomorphologiques.

Un glissement de terrain se produit lorsque les contraintes de cisaillement, dues aux forces motrices telles que le poids, excèdent la résistance du sol le long de la surface de rupture. [2], [3]

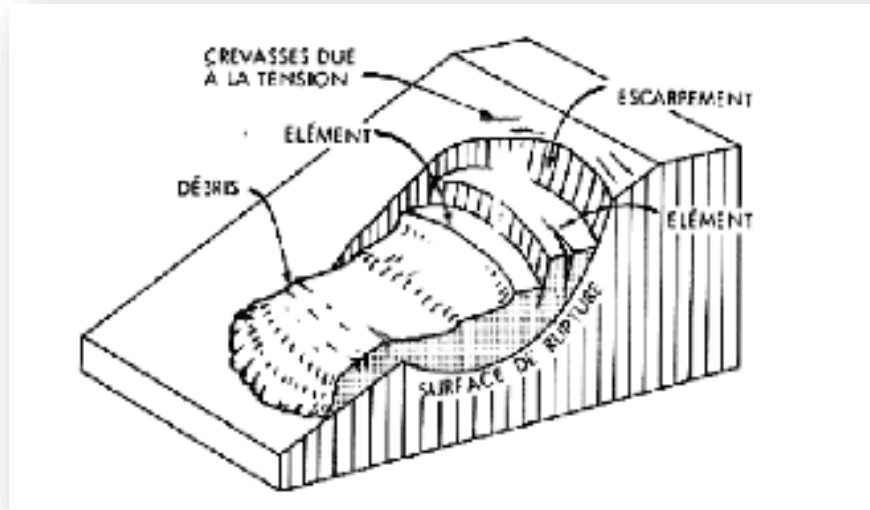


Figure I.1 : Bloc diagramme d'un glissement de terrain. [4]

On distingue deux grandes catégories de glissements :

- ✓ Les glissements plans.
- ✓ Les glissements rotationnels simples ou complexes. [5]

I.3.1.1.1. Glissements plans (translatifs)

En milieux rocheux et en terrain meuble, ils se produisent au niveau d'une zone de discontinuité entre deux matériaux de nature différente par exemple limite entre une altérité et son substrat.

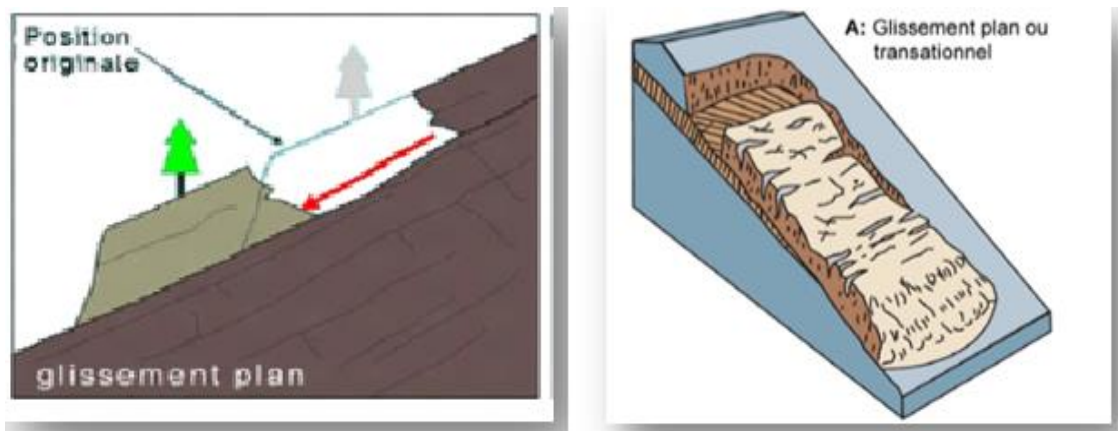


Figure I.2 : Glissement plan. [4] [2]

I.3.1.1.2. Glissements rotationnels (circulaire) :

Il se produit dans un terrain meuble et homogène (argileux ou silteux) un basculement de la masse glissée le long d'une surface courbe plus ou moins circulaire. Ces mouvements peuvent être simples ou complexes.

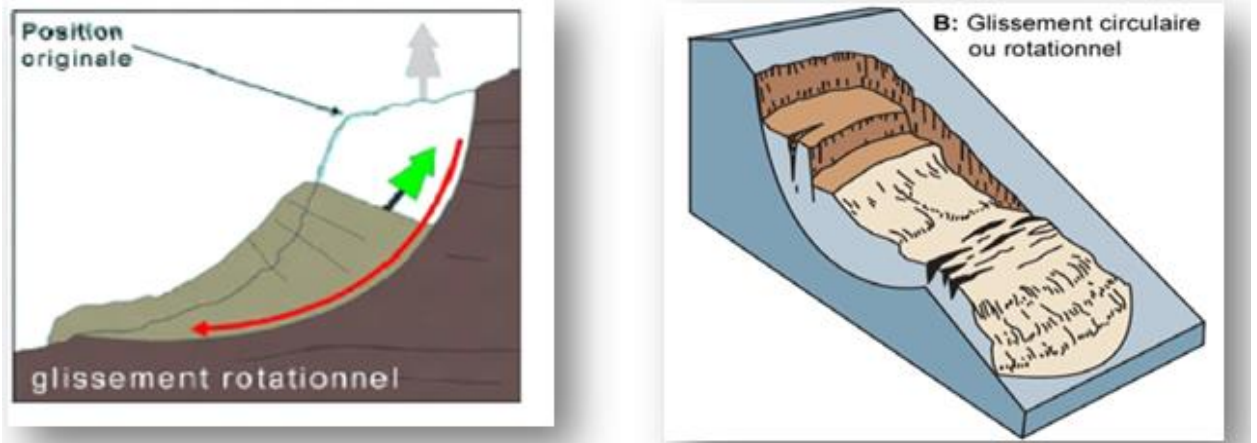


Figure I.3 : Glissement rotationnel. [4] [2]

a) Glissement rotationnel simple :

La surface de rupture à une forme simple et peut-être assimilée à un cylindre dans la plupart des cas. [6]

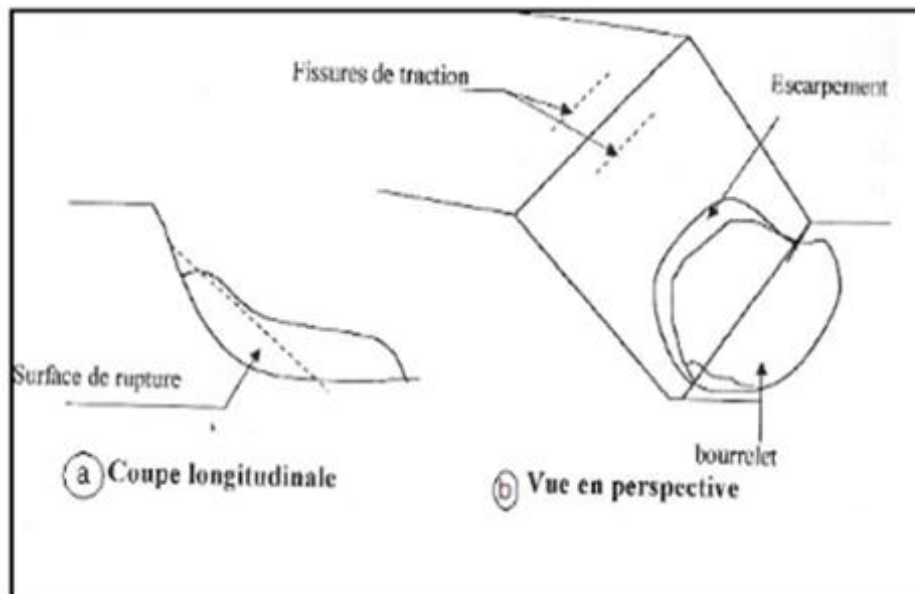


Figure I.4 : Schéma de principe d'un glissement rotationnel simple. [6]

b) Glissement rotationnel complexe (emboîté) :

Dus à la suppression de la butée provoquée par le glissement précédent, ce qui entraîne ainsi des glissements successifs remontant vers l'amont.

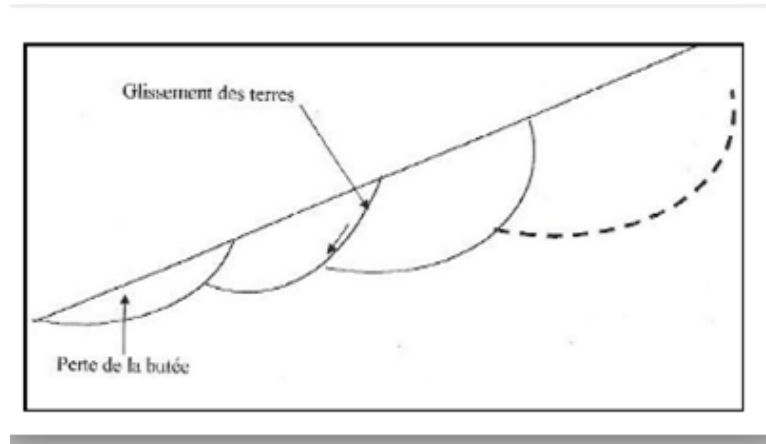


Figure I.5 : Schéma de principe d'un glissement rotationnel complexe. [6]

I.3.1.2. Les affaissements

Sont des déplacements du sol ou du sous-sol lent et continu, sont des déformations souples sans rupture et progressives de la surface du sol. Elles se traduisent par une dépression topographique en forme de cuvette généralement à fond plat et bords fléchis.

Les affaissements surviennent au niveau de cavités souterraines qu'elles soient d'origines anthropiques (**carrières, mines**) ou naturelles (**phénomènes de karstification et de suffusion**). Ces cavités restent souvent invisibles en surface, sont de tailles variables (du mètre à la dizaine de mètres) et peuvent être interconnectées ou isolées. [1]

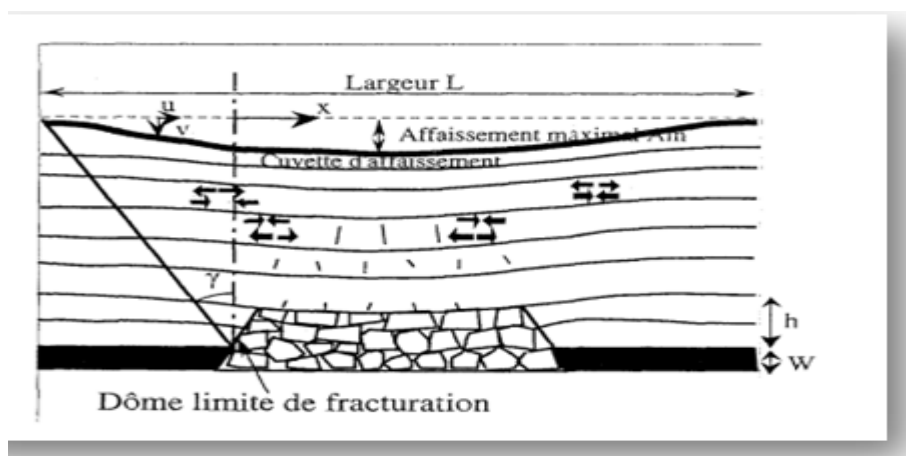


Figure I.6 : Mécanisme de base des affaissements de surface. [7]

I.3.1.3. Le retrait-gonflement

Le retrait-gonflement des argiles fait partie des mouvements de terrain lents. Ces variations sont dues à la quantité d'eau présente dans les terrains argileux produisant des gonflements, en présence d'eau (période humide), des tassements/retraits, en absence d'eau (période sèche). [1]

Le retrait-gonflement des sols argileux trouve son origine dans des phénomènes **naturels** et peut être favorisé par **l'activité de l'homme**. [1]

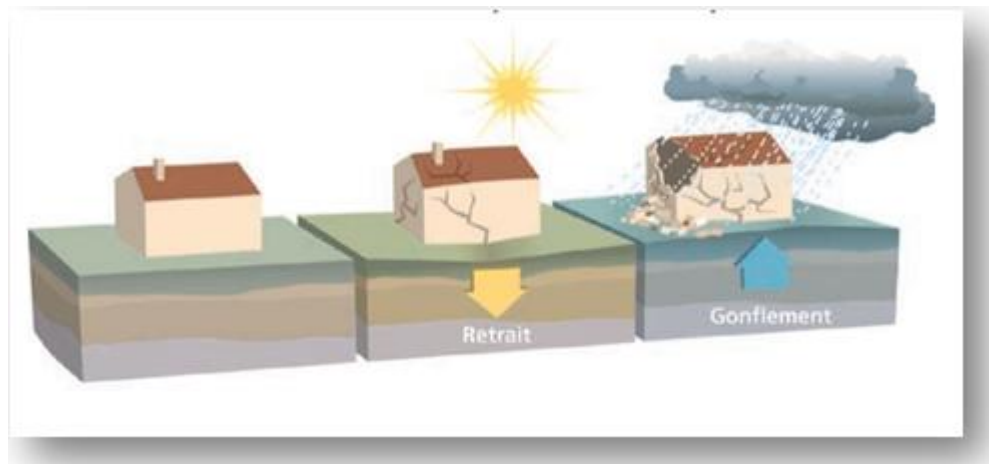


Figure I.7 : Phénomène de retrait de gonflement. [1]

I.3.1.4. Le fluage

Ce phénomène correspond à un mouvement lent (environ de 10 cm/an), sans modification de l'intensité des efforts appliqués. Il se produit généralement au sein des formations de grandes épaisseurs (marnes, argiles plastiques....etc.) Lesquelles supportent une surcharge (naturelle ou anthropique). L'état ultime peut être soit la stabilisation, soit la rupture. [8]

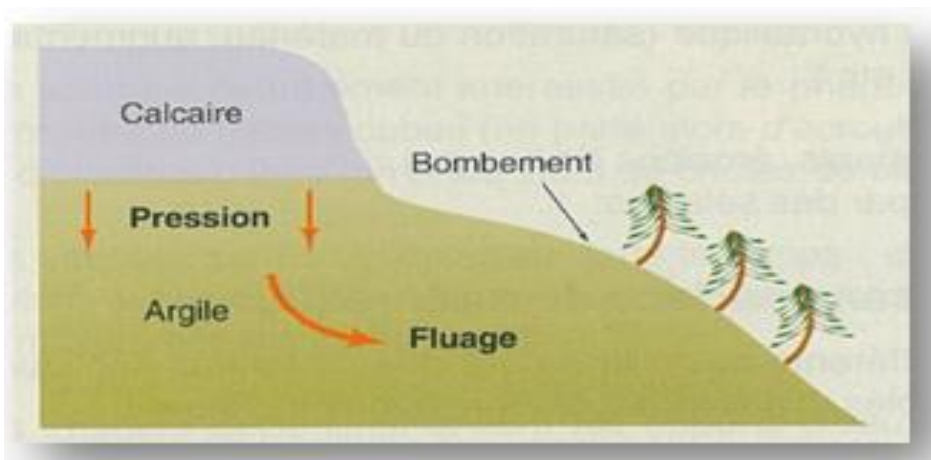


Figure I.8 : Le phénomène de fluage. [6]

I.3.1.5. Le fauchage

Le fauchage est un phénomène de basculement vers l'aval des têtes de couches rocheuses en place sous l'effet de la gravité. Ce sont surtout les formations litées, schisteuses et montrant une structure en colonnes séparées par des discontinuités avec un pendage important (inclinées ou subverticales) qui sont affectées. [32]



Photo I.1: Le phénomène de fauchage. [32]

I.3.1.6. La solifluxion

C'est un phénomène d'écoulement des sols en surface sur des pentes très faibles ; il est dû à l'alternance gel/dégel, au passage des animaux ou à l'action de racines. [1]



Photo I.2 : Le phénomène de solifluxion. [9]

I.3.2. Les mouvements rapides et discontinus

I.3.2.1. Les effondrements

Les effondrements résultent de la rupture des appuis ou du toit d'une cavité souterraine, rupture qui se propage jusqu'en surface de manière plus ou moins brutale, et qui détermine l'ouverture d'une excavation grossièrement cylindrique. Les dimensions de cette excavation dépendent des conditions géologiques, de la taille et de la profondeur de la cavité, ainsi que du mode de rupture.

Ce phénomène peut être ponctuel ou généralisé et dans ce cas concerner des superficies de plusieurs hectares. S'il est ponctuel, il se traduit par la création de fontis plus ou moins importants, dont le diamètre est généralement inférieur à cinquante mètres. [1]

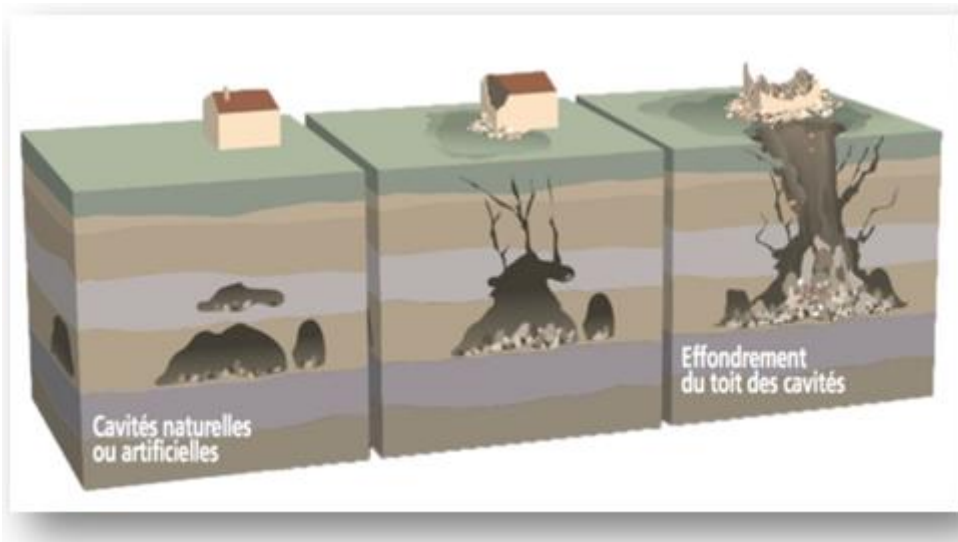


Figure I.9 : Effondrement du toit des cavités. [1]

I.3.2.2. Chutes de pierres et de blocs

Les chutes de masses rocheuses sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que calcaires, grès, roches cristallines,... Ces chutes se produisent par basculement, rupture de pied, glissement banc sur banc, à partir de falaises, escarpements rocheux, formations meubles à blocs (moraines par exemple), blocs provisoirement immobilisés dans une pente.

Les processus de chute sont divisés en trois catégories :

- ✓ **chute de pierre** pour des diamètres $\varnothing < 50\text{cm}$;
- ✓ **chute de blocs** pour des diamètres $\varnothing > 50\text{cm}$ et $< 100\text{ m}^3$;
- ✓ **éboulement** pour des volumes allant de 100 à 1 million de m^3 . [11]



Photo I.3 : Chutes de pierres et de blocs. [12]

I.3.2.3. Les éboulements

Le terme d'éboulement rocheux désigne un mouvement d'une masse rocheuse, dans lequel les blocs ne se déplacent pas seulement en glissant, mais peuvent aussi tomber en chute libre, rebondir ou rouler. Il en résulte que les vitesses atteintes sont trop rapides pour permettre une évacuation de la population menacée (quelques mètres à quelques dizaines de mètres par seconde).

Les éboulements se produisent généralement dans des falaises ou des versants très raides. Ils font souvent suite à un mouvement plus lent, dont ils constituent le dernier stade d'évolution (glissement lent d'une masse rocheuse ou basculement progressif d'un pan de falaise, par exemple). [14]



Photo I.4 : L'éboulement rocheux. [14]

I.3.2.4. Les coulées boueuses

Elles se produisent à partir du matériel meuble, momentanément saturé en eau, prenant alors une consistance plus ou moins visqueuse, parfois proche de la fluidité. On distingue plusieurs types de coulées telle que : coulées boueuses (incluant coulée de blocs, de terre, de boue, lave torrentielle, avalanche de débris et se produisant surtout en montagne), coulées de solifluxion (déplacement lent des sols en milieu périglaciaire, résultant de l'instabilité de la partie dégelée du sol, en surface, au cours de l'été). [17]

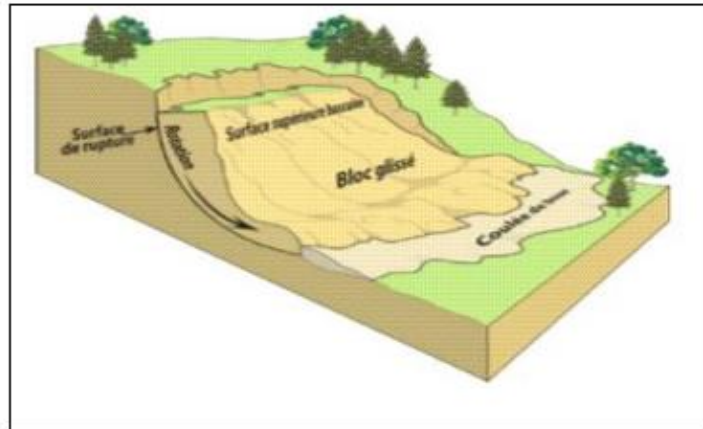


Figure I.10: Coulée de boue. [17]

I.3.2.5. Les laves torrentielles

Les laves torrentielles sont des écoulements mêlant intimement l'eau et les matériaux de toutes tailles ; elles atteignent ou dépassent des densités voisines de 2 qui les rendent capables de transporter des blocs en quasi-flottation. Elles se déclenchent sur des pentes très fortes (30 à 40 % ou même à partir de 20 %) soumises à des mouvements de terrain et/ou effondrements de hautes berges. [15]

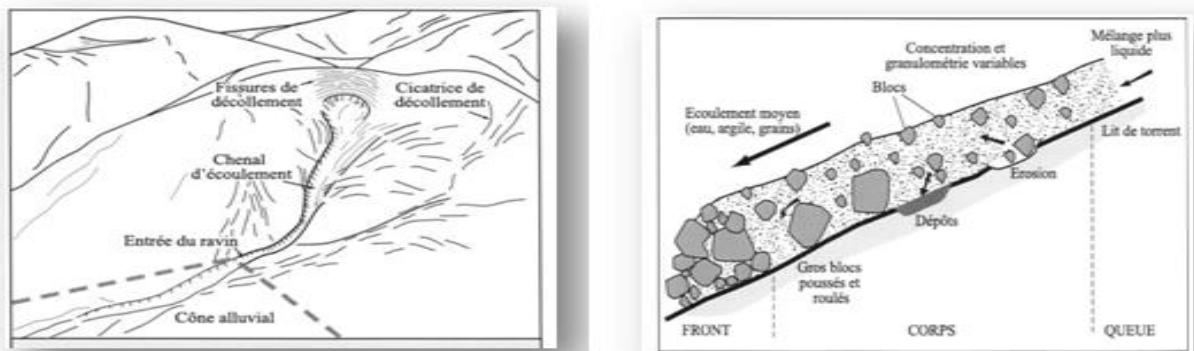


Figure I.11 : Schéma d'une lave torrentielle. [16]

I.4. Glissement rocheux

I.4.1. Le glissement plan

Sur une ou plusieurs surfaces de plans, que l'on rencontre fréquemment dans les massifs sédimentaires. [18]



Photo I.5: Glissement plan. [18]

I.4.2. Le glissement dièdre

Le long de la ligne d'intersection de deux plans, qui est un mécanisme fréquent dans tous les types de roches. [18]



Photo I.6 : Glissement dièdre. [18]

I.4.3. Le glissement rotationnel

Généralement rencontré dans des pentes de sol meuble. Toutefois, une pente rocheuse peut connaître ce type d'instabilité lorsque la roche est extrêmement fracturée. [18]

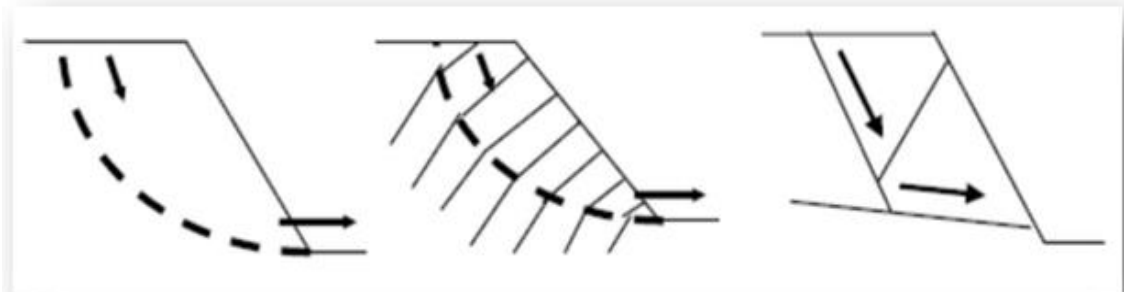


Figure I.12: Glissement rotationnel (fractionné). [18]

I.4.4. La rupture de surplomb

Par flexion, cisaillement ou traction, liée à des masses rocheuses surplombantes dans le vide. Ce sont des phénomènes très fréquents sur les falaises calcaires. [18]



Photo I.7 : Rupture de surplomb. [18]

I.4.5. La rupture de colonne « par basculement ou par rupture en pied »

Qui se produit lorsque des discontinuités subverticales découpent le massif et isolent des colonnes de roche. [18]



Photo I.8: Basculement d'une colonne par rupture du pied à lançon de Provence. [18]

I.4.6. La rupture par flambage de bancs

Lorsqu'une plaque rocheuse inclinée se déforme ou se fracture sous son propre poids. [18]

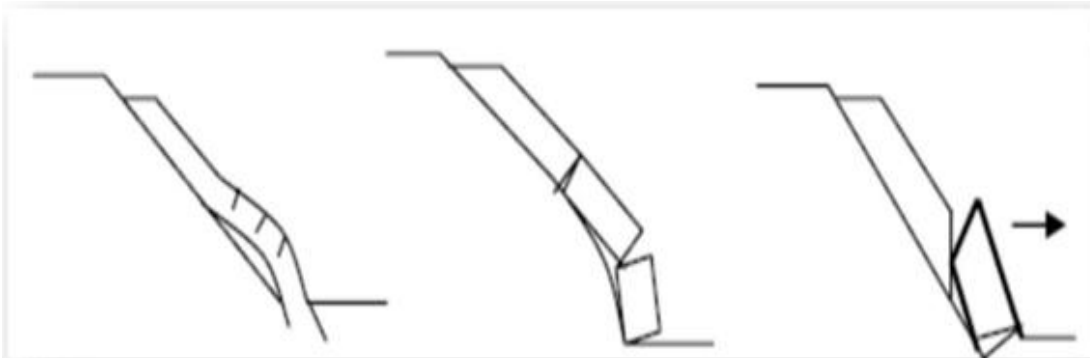


Figure I.13 : Rupture de banc par flambage. [18]

I.5. Exemples de glissement de terrain en Algérie et dans le monde

I.5.1 En Algérie

- **L'exemple du glissement de la mine de fer d'Ouenza (QUARTIER EL ZARGA 2012) :**

Les glissements dans cette zone s'étendent du niveau 824 m au niveau 765 m. La surface atteinte par les glissements se situe au Nord de l'axe de l'exploitation de ZERGA et les glissements se prolongent de NO vers SE. La surface globale de glissement est estimée à environ 30 000 m².



Photo I.9: Glissement de Quartier El ZARGA (la mine de fer d'Ouenza).

➤ **L'exemple du Glissement de la mine de Kef Essennoun :**

Le 07 septembre 2007 à 05 heures du matin, le glissement de Kef Essennoun s'est produit. La partie Nord-Est de la fosse est effondrée en provoquant un glissement de terrain, volume estimé à 7.7 M m^3 , sur une zone de 11 hectares et une épaisseur moyenne de 35 m de phosphate et 35 m de terrains sus-jacents. [20]



Photo I.10 : Cas du glissement plans de la mine de Kef Essennoun. [20]

I.5.2. Dans le monde

Heart Mountain, Wyoming, le plus grand glissement de terrain connu à la surface de la Terre datent de 50 à 48 millions d'années. Une étendue de roche de 1 300 kilomètres carrés a glissé sur des dizaines de kilomètres. Cette feuille devait probablement être épaisse de 4 à 5 kilomètres. Malgré une pente inférieure à 2 degrés,

l'avant du glissement de terrain a parcouru au moins 40 km et la masse de la glissière a fini par couvrir plus de 3 400 km². [3]



Photo I.11: Exemple d'un glissement de terrain « **Heart Mountain** ». [3]

I.6. Structure géométrique des massifs rocheux

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

Le comportement mécanique des massifs rocheux est un facteur essentiel dans le dimensionnement des ouvrages qui y sont exécutés. Afin de comprendre, expliquer et modéliser ce comportement, il est nécessaire de connaître la structure géométrique ou plus précisément le modèle de distribution géométrique des fractures, ainsi que les propriétés mécaniques de chacune des composantes que sont la matrice rocheuse et les discontinuités. [19]

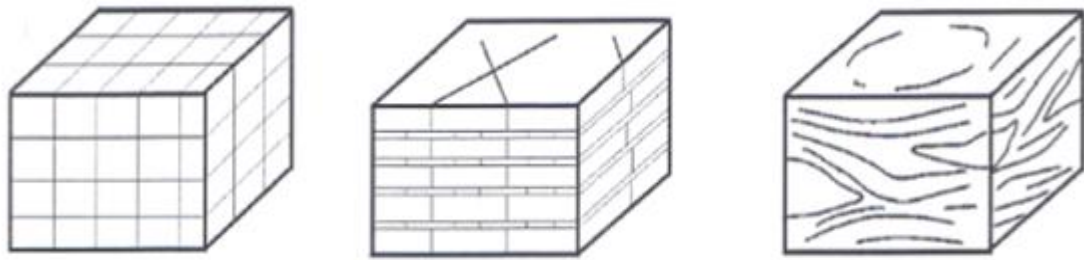


Figure I.14: Les trois principales structures de massifs rocheux. [20]

I.6.1. Les discontinuités

I.6.1.1. Description des discontinuités

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

Elle nécessite une analyse statistique, pour pouvoir différencier toutes les familles de discontinuités qui affectent le massif. Chaque famille est alors analysée à part pour déterminer la distribution des différents paramètres géométriques. [21]

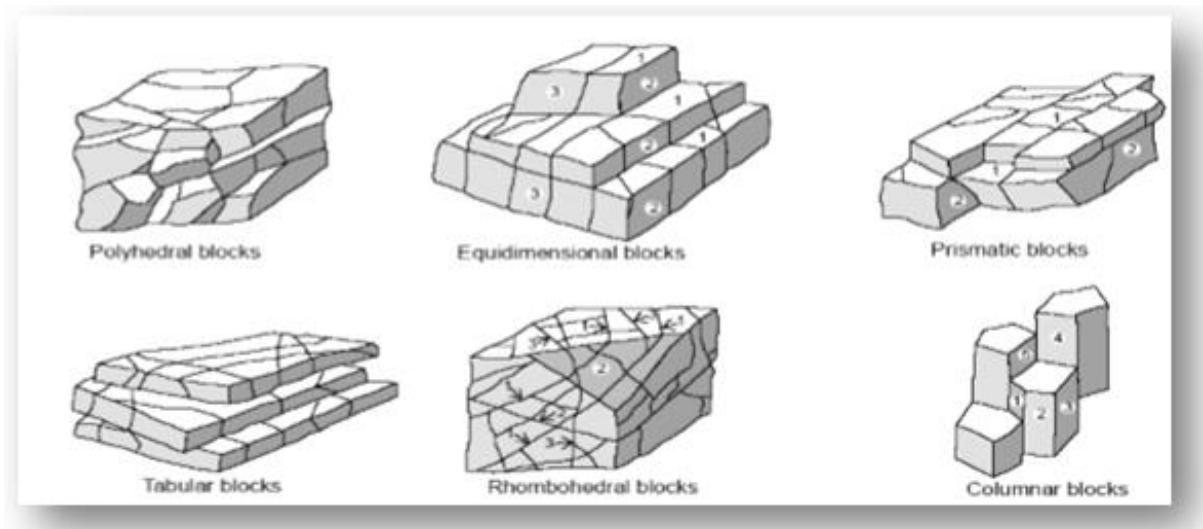


Figure I.15 : Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés. [19]

I.6.1.2. Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux

- ✓ De couper la roche en plaques, blocs et coins (libres de tomber et de bouger) ;

- ✓ D'agir comme plan de faiblesse pour le glissement ;
- ✓ De faciliter l'écoulement d'eau et créer des réseaux d'écoulement ;
- ✓ D'entraîner de grandes déformations ;
- ✓ De changer la distribution et l'orientation des contraintes. [21]

I.6.1.3. Classification des discontinuités

- **les plans de stratification** : Entre strates dans les massifs sédimentaires, leur extension peut être très grande.

- **les contacts lithologiques** : Entre deux matériaux différents.

- **les plans de schistosité** : Débit des roches en feuillets parallèles. Origine liée aux contraintes tectoniques. Extension est plus ou moins grande.

- **les diaclases** : Discontinuités séparent deux compartiments sans mouvement relatif. Elles peuvent s'organiser en familles directionnelles.

- **les failles** : Mouvement relatif entre les deux compartiments : faille normale, inverse et de décrochement fonction du champ de contrainte. Leur extension est très variable (métrique à pluri - kilométrique).

- **les couloirs de fracturation** : Assemblage de petites discontinuités de faible extension et d'orientations variées formant une structure continue. [22]

I.6.1.4. Les caractéristiques géométriques des discontinuités

a. Nombre de familles des discontinuités :

Les discontinuités sont disposées généralement par familles, par exemple des discontinuités parallèles.

Le nombre de familles de discontinuités peut aller jusqu'à 5. 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 blocs de formes variées et de coins. [23]

Tableau I.1 : La description suggérée par l'ISRM. [23]

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 ou plus.
IX	Roche broyée comme du sol.

Les propriétés mécaniques du massif rocheux sont influencées par les familles de discontinuités. Plus le nombre de familles de discontinuités est grand, plus les possibilités de glissements potentiels sur les discontinuités sont grandes. [23]

b. La persistance :

La persistance est l'extension spatiale ou la longueur d'une discontinuité, elle peut être directement mesurée en observant les longueurs des traces des discontinuités sur les affleurements. [23]

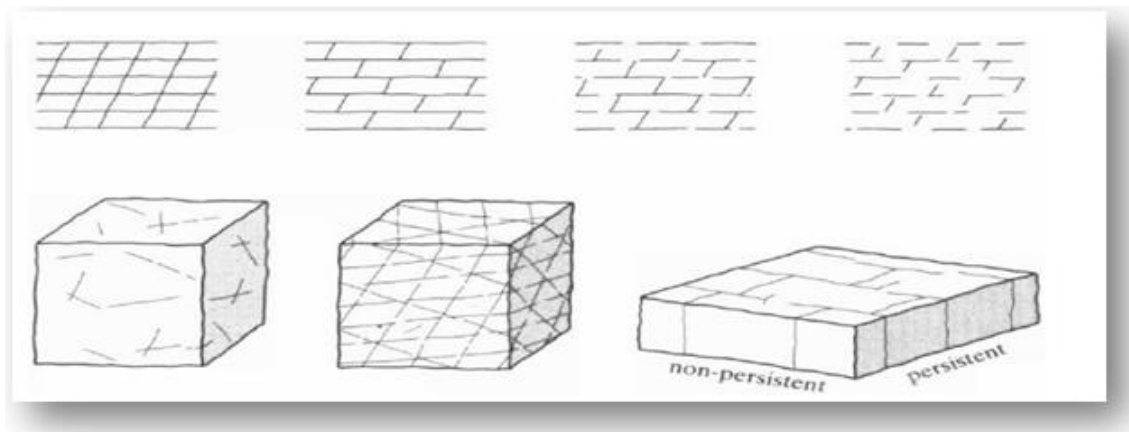


Figure I.16: Persistence de différents ensembles de fractures. [23]

Tableau I.2 : La description de la persistance suggérée par l'ISRM. [23]

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

c. L'orientation :

Est définie par la direction d'une horizontale du plan mesuré de 0 à 180° par rapport au Nord, angle de la projection horizontale du vecteur (p) avec le Nord en tournant vers l'Est. Il vaut $(\alpha + 90)$. [24]

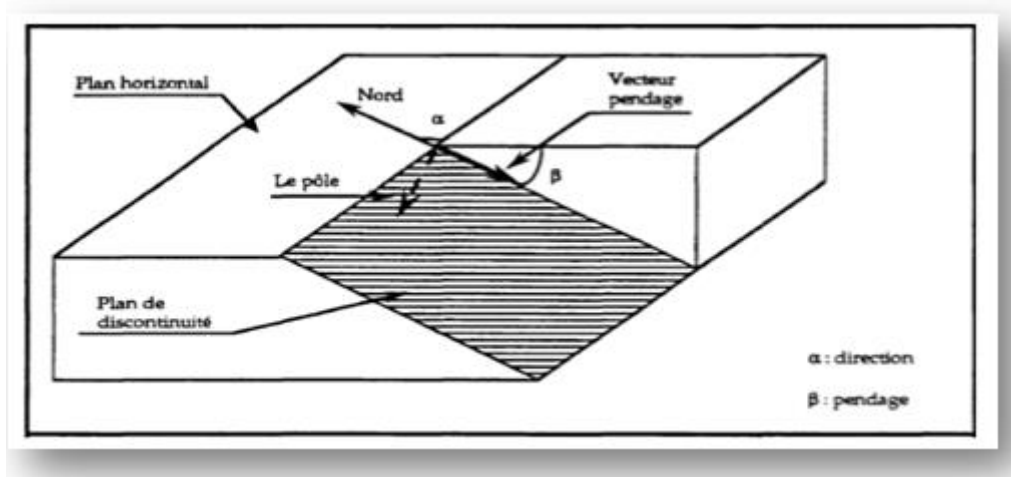


Figure I.17: Orientation d'un plan de discontinuité. [25]

L'orientation d'une discontinuité peut être représentée graphiquement en utilisant la méthode de projection hémisphérique. La méthode de projection consiste à représenter un plan en 3D par une représentation en 2D. En utilisant la projection, les données d'orientation des discontinuités peuvent être évaluées en 2D. [23]

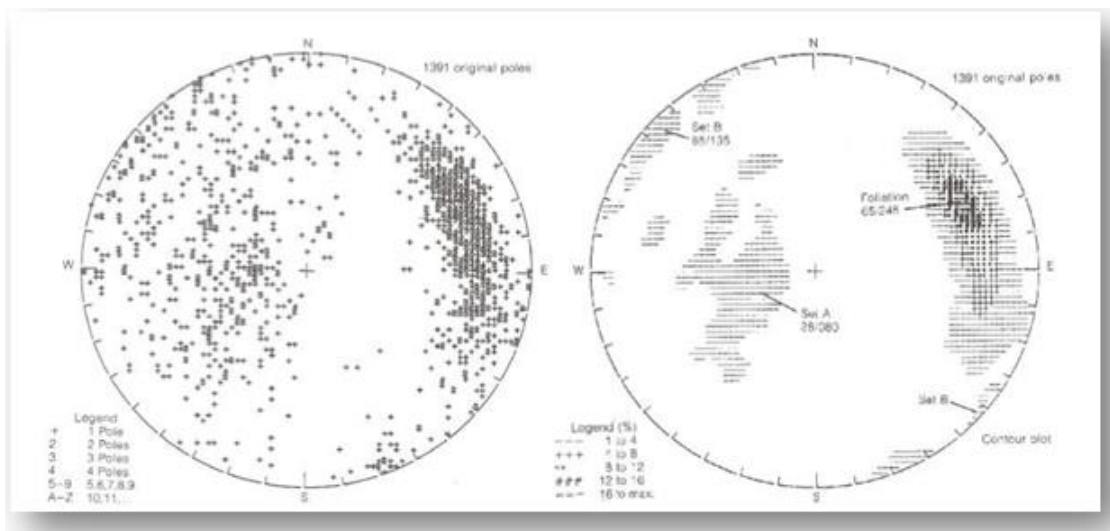


Figure I.18: Graphique de projection sphérique et d'orientation de discontinuités. [23]

d. Le Pendage :

C'est l'inclinaison du plan par rapport à la verticale, mesurée de 0 à 90°, il est caractérisé aussi par un sens de plongement, c'est l'angle que fait le vecteur (p) avec le plan horizontal (β). [24]

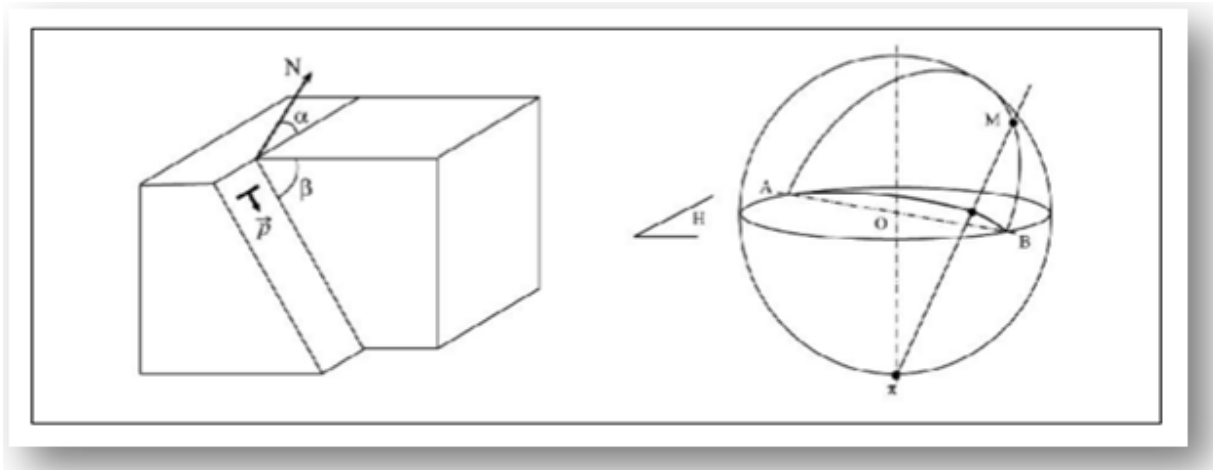


Figure I.19 : Illustration de pendage et de l'azimut d'une discontinuité. [24]

e. L'espacement :

C'est la distance mesurée perpendiculairement entre deux plans appartenant à une même famille de discontinuité. L'espacement moyen nous renseigne sur le débitage en blocs et sur la déformabilité et la perméabilité du massif. [24]

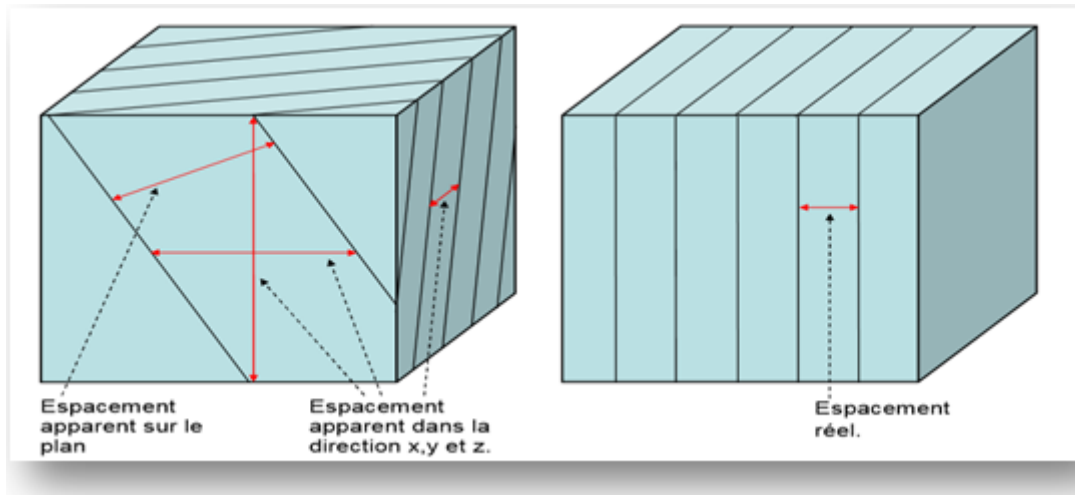


Figure I.20 : L'espacement des discontinuités. [23]

Tableau I.3 : Description de l'espacement des discontinuités. [23]

Description	Espacement des Discontinuités
Espacement extrêmement étroit	< 0,02
Espacement très étroit	0,02 - 0,06
Espacement étroit	0,06 - 0,2
Espacement modéré	0,2 - 0,6
Espacement large	0,6 - 2
Espacement très large	2 - 6
Espacement extrêmement large	> 6

f. La fréquence des discontinuités (λ) :

Déterminée par comptage sur le terrain, par exemple en mesurant l'espacement des discontinuités le long d'une ou de plusieurs lignes tracées perpendiculairement à leur direction ou selon des lignes traversant au mieux (statistiquement) les différentes familles de joints. [21]



Figure I.21 : Mesure de la fréquence des discontinuités. [21]

g. La rugosité et l'ondulation :

Une discontinuité est une interface de deux surfaces en contact. Les surfaces peuvent être lisses ou rugueuses. La rugosité de la surface de la discontinuité est une mesure des irrégularités (à petite échelle) et des ondulations (à grande échelle) de la surface de la discontinuité ; qui influe sur la résistance au cisaillement de la discontinuité principalement et en conséquence la stabilité des blocs. [20]

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. [20]

h. Degré de fracturation:

Lorsque des forages carottés sont disponibles, cette qualité est désignée par RQD (Rock Quality Designation) (Deere, 1988). Cet indice est égal au rapport de la somme des longueurs des éléments de carottes du forage dont la longueur est au moins égale à 10 cm à la longueur totale de la passe carottée. [21]

i. Ouverture et matériaux de remplissage :

Il est très rare que les deux surfaces d'une discontinuité soient en contact, généralement il existe un espace entre elles appelé ouverture qu'elle soit remplie d'air, d'eau (joint ouvert) ou avec des matériaux de remplissage. [23]

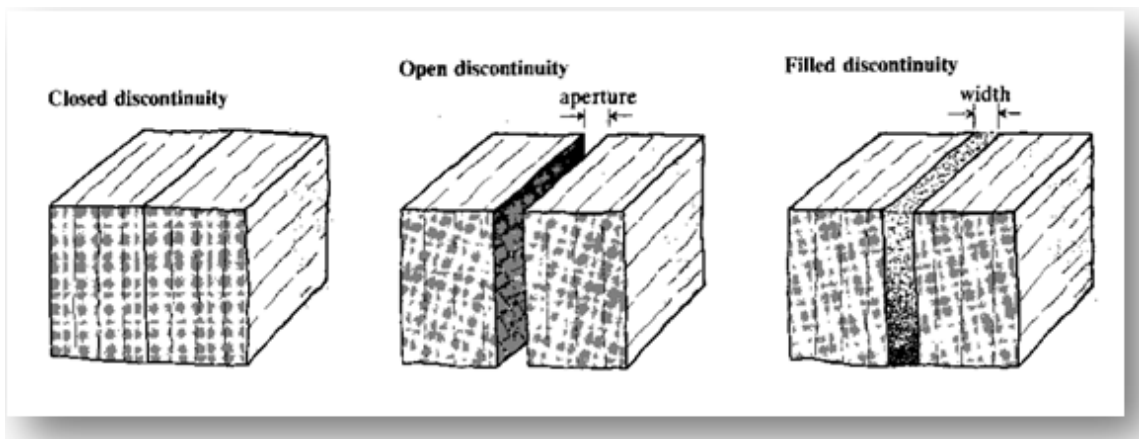


Figure I.22: Fissure ouverte et remplie. [23]

Tableau I.4 : La description d'ouverture. [21]

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.7. Les systèmes de classification des massifs rocheux

1.7.1. Types et buts des systèmes de classification

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

Les systèmes de classification prennent en considération plusieurs facteurs affectant la stabilité des massifs rocheux. Ces facteurs sont reliés notamment à la résistance de la matrice rocheuse, la présence de l'eau et la description des discontinuités (nombre de familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage...). On s'intéresse, dans ce qui suit, aux systèmes de classifications géomécaniques. [26]

Les buts principaux de ces classifications se résument comme suit :

- ✓ Estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d'un massif fracturé, en particulier sa résistance et sa déformabilité.
- ✓ Estimer le temps durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement (stand up time). C'est un indice essentiel dans la détermination de la portée d'excavation.
- ✓ Donner des recommandations de soutènement des ouvrages.
- ✓ Définir l'état de stabilité de talus naturelle ou de terrassement.

La popularité des classifications quantitatives dérive de plusieurs facteurs :

- ✓ Elles représentent un langage commun entre les géologues, les ingénieurs, les concepteurs et les entrepreneurs.
- ✓ Moyennant ces classifications, l'observation, l'expérience et le jugement des ingénieurs sont mieux corrélés.
- ✓ Les ingénieurs préfèrent les nombres aux descriptions. [26]

Les systèmes le plus utilisés sont sans doute le "Rock Quality Designation" (RQD), "Rock Mass Rating" (RMR) et "Rock Mass Quality" (système Q), ainsi que le GSI, plusieurs autres ont été proposés et utilisés. [26]

Tableau I.5: Systèmes de classification du massif rocheux. [27]

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 tunneling method (NATM)	Rabcewicz, 1964/1965, 1975	Autriche	Tunnels
Rock Quality Designation (RQD)	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, 1983 Newman et Bieniawski, 1985	Norvège	Mines Mines de charbon Mines en roche dures 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

1.7.1.1. Le Rock Quality Designation indexe (RQD)

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

Le RQD est défini comme le pourcentage de morceaux intacts de longueur supérieure à 10 cm, sur la longueur totale du forage. [28]

$$\text{RQD}(\%) = \frac{\sum \text{longueurs de morceaux de plus de 10cm}}{\text{longueur totale du forage}} \times 100 \quad (\text{I.1})$$

La relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif peut être établie selon la proposition de (Deere, 1968) et elle est présentée au tableau I.6 ci-dessous. [28]

Tableau I.6 : Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux (tiré de Deere, 1968). [28]

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

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

$$\text{RQD} = 115 - 3,3J_v \quad (\text{I.2})$$

Pour : $J_v < 4,5$; Le RQD = 100.

Où : J_v est la densité volumique des joints.

Priest et Hudson (1976) ont établi une relation entre l'espacement des joints [joints/mètre] déterminé à partir de mesure de surface du massif rocheux exposé et de l'indice RQD :

$$\text{RQD} = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \quad (\text{I.3})$$

Lorsqu'aucun forage géologique n'est disponible, cette corrélation s'avère très utile. [28]

1.7.1.2. Rock Mass Rating (RMR)

Bieniawski a publié en 1976 les détails d'une classification des masses rocheuses intitulées **Geomechanics Classification or the Rock Mass Rating (RMR) system**. Depuis la version originale, certaines modifications ont été apportées. Désormais, plusieurs variantes de la classification de Bieniawski sont disponibles. Les versions 1976 et 1989 sont les plus couramment utilisées.

En reprenant la version 1976 du système de classification, la somme de ces coefficients détermine la valeur du RMR, qui peut varier entre 0 et 100.

L'utilisation du RMR se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants:

- ✚ 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. [28]

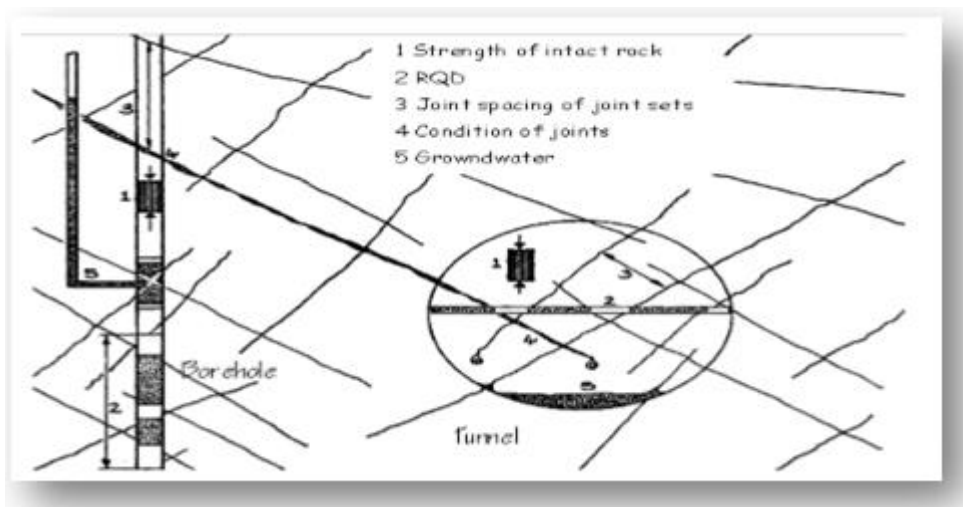


Figure I.23 : Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR (Bieniawski [1973]). [28]

La formule générale du RMR76 de base est la sommation des paramètres évalués, le plus souvent pour une condition sèche du terrain : [28]

$$\mathbf{RMR}_{\text{de base}} = \mathbf{A_1} + \mathbf{A_2} + \mathbf{A_3} + \mathbf{A_4} + \mathbf{A_5} \quad (\mathbf{I.4})$$

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 s'écrit alors :

$$\mathbf{RMR}_{89} = \mathbf{A_1} + \mathbf{A_2} + \mathbf{A_3} + \mathbf{A_4} + \mathbf{A_5} + \mathbf{B} \quad (\mathbf{I.5})$$

Cette classification ne prend pas en considération l'état de contrainte in-situ ni l'angle de frottement du matériau de remplissage ; les roches gonflantes n'y sont pas non plus traitées. L'application de cette classification est limitée aux cas de massifs dont la matrice a une bonne résistance et dont le comportement est régi par les discontinuités. La version 1976 du système de classification (RMR₇₆) l'utilisation du RMR se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants et leurs pondérations. [20]

- ✚ 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. [20]

$$\mathbf{RMR}_{76} = \mathbf{A_1} + \mathbf{A_2} + \mathbf{A_3} + \mathbf{A_4} + \mathbf{A_5} + \mathbf{A_6} \quad (\mathbf{I.6})$$

Tableau I.7 : Qualité du massif rocheux selon Bieniawski. [29]

N° de classe	RMR	Description
I	81-100	Excellente qualité
II	61-80	Bonne qualité
III	41-60	Moyenne qualité
IV	21- 40	Faible qualité
V	< 20	Très faible qualité

1.7.1.3. Slope Mass Rating (SMR)

Les travaux de Romana, (1985), ont essentiellement eu pour but d'éclaircir l'évaluation de la note R6 du Système RMR dans le cas de l'étude de la stabilité des talus rocheux.

Romana a défini un système de classification pour les talus et les falaises qu'il a nommé le SMR (Slope Mass Rating) en s'appuyant sur le principe de la classification de Bieniawski en ajoutant un facteur d'ajustement factoriel en fonction de l'orientation relative des discontinuités et de la pente et à un autre facteur de correction en fonction de la méthode d'excavation. Il a ainsi défini le SMR par la formulation suivante :

$$\text{SMR} = \text{RMR}_{\text{Base}} + (\text{F}_1 \times \text{F}_2 \times \text{F}_3) + \text{F}_4 \quad (\text{I.7})$$

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. [20]

- ✓ **F1:** est un facteur dépendant du parallélisme entre les discontinuités et la pente, qui prend des valeurs comprises entre 0.15 et 1 et peut être définie par la formule suivante :

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

A: est la différence entre la direction du pendage des talus et celle des discontinuités.

- ✓ **F2:** est lié au pendage. Il prend des valeurs comprises entre 0.15 et 1. Il est défini par la formule suivante :

$$\text{F2} = \tan \beta_j \quad (\text{I.9})$$

Où **B** est le pendage des discontinuités.

- ✓ **F3 :** est l'ajustement de Bieniawski pour les joints ;
- ✓ **F4 :** détermine le type du talus (naturel, artificiel, etc.), qui varie entre -8 et +15 selon le type de talus. [28]

Tableau I.8 : Notes des paramètres SMR (Romana, 1993). [28]

Type of failure			Very favorable	Favorable	Normal	Unfavorable	Very unfavorable
P	A	$ \alpha_j - \alpha_s $	$>30^\circ$	$30-20^\circ$	$20-10^\circ$	$10-5^\circ$	$<5^\circ$
T		$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
W		$ \alpha_j - \alpha_s $					
P/T/W	F1		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/W	B	$ \beta_j $	$<20^\circ$	$20-30^\circ$	$30-35^\circ$	$35-45^\circ$	$>45^\circ$
P/W			F2		0.15	0.40	0.70
T			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
P	C	$\beta_j - \beta_s$	>10	$10-0^\circ$	0°	$0-(-10^\circ)$	$<(-10^\circ)$
W		$\beta_j - \beta_s$					
T		$\beta_j + \beta_s$	$<110^\circ$	$110-120^\circ$	$>120^\circ$	-	-
P/T/W	F3		0	-6	-25	-50	-60
Excavation method (F4)							
Natural slope			+15	Blasting or mechanical		0	
Presplitting			+10	Deficient blasting		-8	
Smooth blasting			+8				
P : Planar failure ; T : Toppling failure ; W : Wedge failure							

Tableau I.9 : Description des classes SMR (Romana, 1993). [28]

Description des classes SMR					
Classe N°	V	IV	III	II	I
Description	Très mauvais	Mauvais	Moyen	Bonne	Très bonne
Stabilité	Complètement instable	Instable	Partiellement stable	Stable	Complètement stable
Rupture	Grand plan	Plan ou grand dièdre	Quelques joints ou beaucoup de dièdre	Quelques blocs	Aucune
Support	Re excavation	Important	Systematic	Occational	Aucune

1.7.1.4. Q-system

La classification de Barton a été présentée en 1974. Elle repose sur le même principe que la classification de Bieniawski, c'est-à-dire qu'elle attribue une note de qualité au massif rocheux, en combinant plusieurs paramètres. Cette classification fait intervenir les paramètres suivants:

- ✚ le RQD,
- ✚ J_n = indice des familles de joints ;
- ✚ J_r = indice de rugosité des joints ;
- ✚ J_a = indice d'altération des joints ;
- ✚ J_w = conditions hydrauliques ;
- ✚ SRF = conditions de contraintes. [29]

Q est calculé comme suit :

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w/SRF). \quad (I.10)$$

Tableau I.10 : Qualité du massif rocheux selon Barton. [29]

Intervalles de valeurs du coefficient Q	Qualité du massif
400 – 1000	Exceptionnellement bonne
100 – 400	Extrêmement bonne
40 – 100	Très bonne
10 – 40	Bonne
4 – 10	Moyenne
1 – 4	Mauvaise
0.1 – 1	Très mauvaise
0.01-0.1	Extrêmement mauvaise
0.001-0.01	Exceptionnellement mauvaise

1.7.1.5. Geological Strength Index (GSI)

Introduit par Hoek (1995) et Hoek, Kaiser et Bawden (1995), le GSI est un nombre sans dimension, déterminé empiriquement, qui 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. [30]

Tableau I.11 : Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI. [30]

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

I.8. les facteurs qui influent sur la stabilité

L'instabilité des pentes est liée à plusieurs de facteurs ;

a) Prédispositions :

✓ La géologie :

- La lithologie : (composition, texture, granulométrie, caractères). Par exemple dans le cadre d'un glissement, les argiles sont particulièrement sensibles à l'eau.
- La structure : (le pendage, la présence de joints, de stratification, de plis, de schistosité qui constituent des zones de faiblesse dans un massif)
- l'histoire du versant : un versant qui a déjà connu des mouvements gravitaires aura une certaine prédisposition à être instable à nouveau.

✓ La pente :

Il n'y a pas de règle formelle, mais on a constaté que les pentes les plus sujettes aux glissements ont une inclinaison qui va de 20 à 30°.

✓ L'orientation :

On a également pu constater qu'il y a beaucoup plus de glissement sur les versants exposés au Nord.

✓ La végétation :

La végétation a un rôle non négligeable, car elle intervient d'une part au niveau des échanges d'eau (évapotranspiration) et d'autre part au niveau de la cohésion et de la fixation du sol (racines). En outre, la végétation diminue l'érosion du sol. Néanmoins, lorsque le couvert végétal est très dense, le poids est plus important, ce qui augmente les forces motrices.

✓ Le contexte hydrogéologique et hydrographique :

Cela concerne, d'une part, la perméabilité du massif, les circulations d'eau souterraine, le drainage (hydrogéologie) et, d'autre part, le réseau hydrographique : ruissellement, proximité d'une source, d'un torrent, et leur potentiel érosif.

✓ Le contexte climatique :

Soit la pluviométrie annuelle totale, la répartition des précipitations annuelles, la possible accumulation de neige, la température moyenne ainsi que l'évolution climatique. [32]

b) Facteurs préparatoires et déclenchants (causes directes) :**✓ Le climat : causes hydriques ;**

- L'infiltration d'eau dans un terrain (pluies, fonte des neiges, crues de cours d'eau à proximité...) a des conséquences sur la cohésion du matériel qui offre, de fait, moins de résistance au cisaillement et peut se liquéfier.
- Le poids du sol augmente avec l'humidité, ce qui augmente les forces déstabilisantes.

✓ Le climat : causes thermiques ;

- Alternance de phases de gel/dégel.
- Détérioration du pergélisol, « ciment » des montagnes, avec le réchauffement global.

✓ Causes mécaniques : vibrations ;

- Sismicité/vibrations dues à un séisme ou à des activités humaines (explosion, passage d'un train). Il y a une augmentation momentanée du poids du terrain qui peut suffire pour que le seuil de stabilité soit franchi et que le terrain se mette en mouvement.
- Phénomène de thixotropie : soumis à des vibrations, certains matériaux comme les argiles, par exemple, peuvent passer de l'état solide à l'état liquide.

✓ Causes mécaniques : modification de la géométrie ;

- Modification de la répartition des masses par érosion en pied de versant (= zone frein) par une rivière par exemple ou par surcharge en haut d'une pente (= zone moteur) par exemple lors de la construction d'un bâtiment. [32]

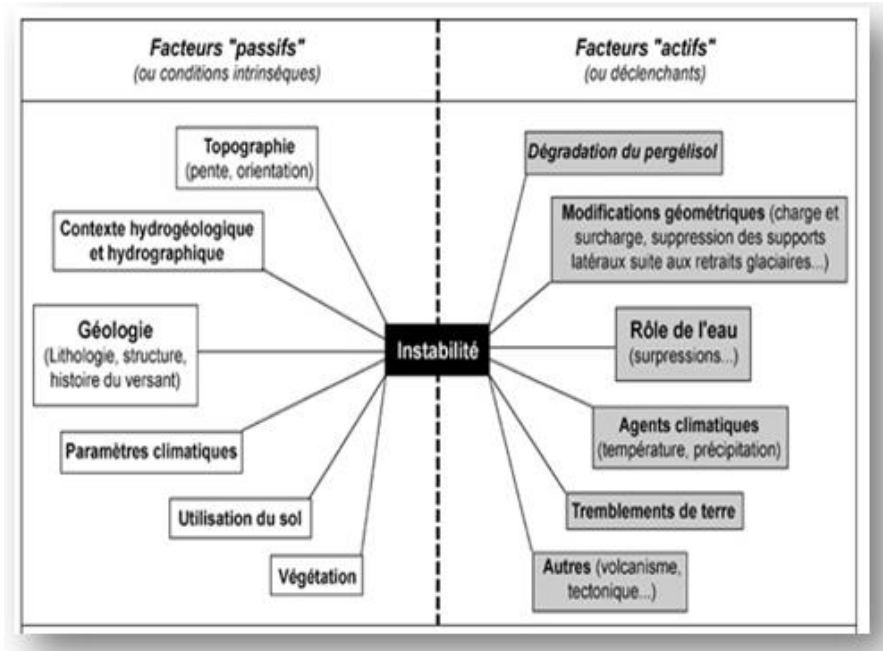


Figure I.24 : Facteurs passifs et actifs pouvant entraîner une instabilité. [32]

I.9. Conclusion

Les mouvements de terrain sont des phénomènes naturels d'origines très divers (naturels, ou causé par l'être humain).

Dans ce chapitre, tout d'abord nous avons présenté les différents types des mouvements des terrains selon la vitesse de déplacement et la morphologie de leur surface de rupture avec une approche approfondie sur les glissements rocheux. Ensuite, nous avons défini les massifs rocheux en générale et les discontinuités en particulier, leurs caractéristiques et leurs systèmes de classification (RQD, RMR, SMR, SQI) et enfin on termine par les différents facteurs qui influent sur la stabilité.

Chapitre II:

Étude géologique, hydrogéologique et géotechnique



II.1. Introduction

Dans le but d'étudier la stabilité des gradins d'une mine à ciel ouvert, il est nécessaire d'étudier les conditions géologiques et hydrogéologiques de la mine et déterminer leurs propriétés physiques et mécaniques, parce qu'elles sont des outils très importants pour le géotechnicien pour qu'il obtienne une image complète que possible des caractéristiques du massif rocheux traversé et toutes autres structures qui peuvent influencer la stabilité de la zone en question.

II.2. Historique de la mine

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

- ✚ De 1903 à 1926, la concession de MOKTA EL HADID avait entrepris des travaux de recherches systématiques par des galeries entre les niveaux 845-1225.
- ✚ De 1926 à 1966, date de nationalisation des mines, c'était la société de l'Ouenza qui exploitait le gîte de Boukhadra. Cette dernière avait effectué de la recherche systématique par des travaux miniers et par des sondages sur le gisement de Boukhadra.
- ✚ Durant la période de 1967 à 1984, la SONAREM était chargée de l'exploitation et des recherches sur les gîtes ferrifères de l'Ouenza et Boukhadra. Après la restructuration des entreprises (1983 - 1984), c'était FERPHOS qui gérait, exploitait et développait ces recherches sur l'ensemble des gîtes ferrifères existantes sur le territoire national.
- ✚ Depuis la date du 18/10/2001, et dans le cadre de partenariat avec l'étranger, le holding L.N.M.N.V. a signé l'accord de partenariat avec HADID OUENZA - BOUKHADRA filiale FERPHOS avec 70% pour la première.
- ✚ Le 01/01/2005 la nomination a été modifiée par Mittal steel Tébessa.
- ✚ Le 18/08/2007 la nomination a été modifiée par Arcelor Mittal Tébessa.
- ✚ Le 30/11/2014 la récupération de mine de BOUKHADRA par l'état, elles étaient détenues à 70% par Arcelor Mittal et à 30% par FERPHOS. [33]

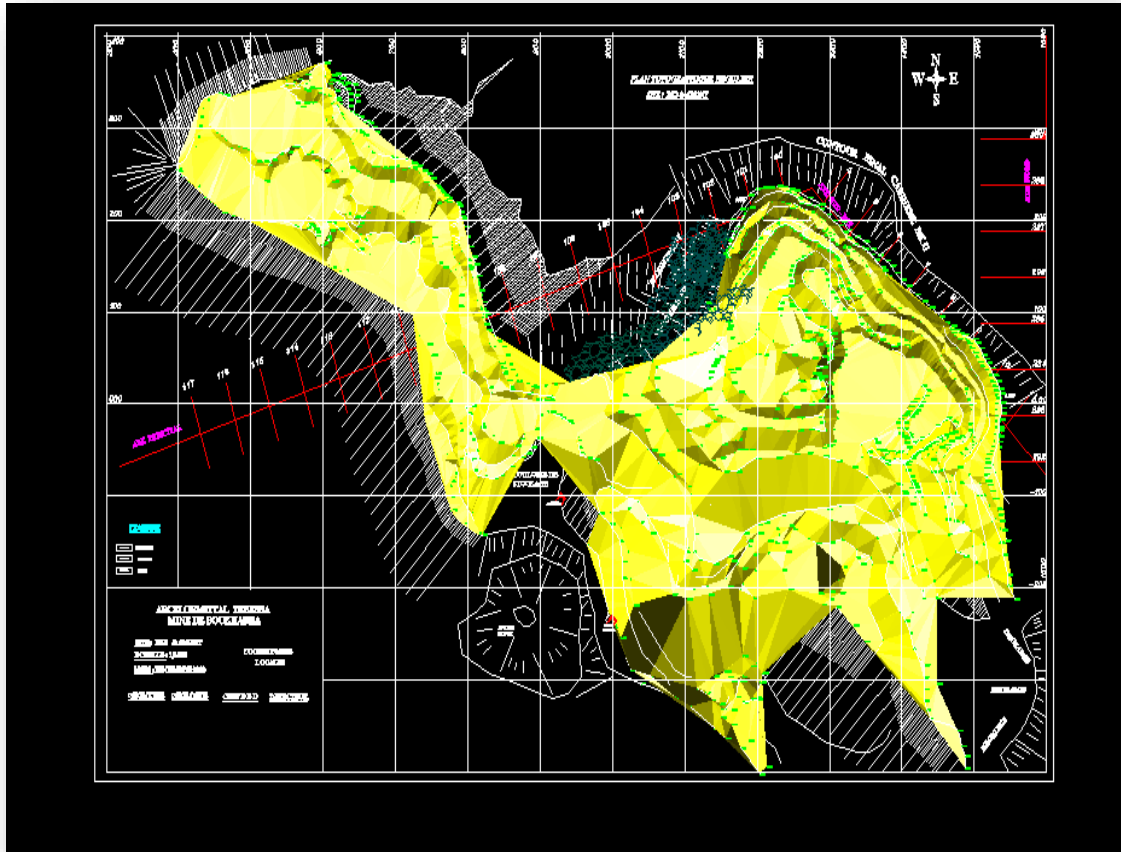


Figure II.1 : Plan topographique de la mine de BOUKHADRA. [33]

II.3. Cadre géographique

II.3.1. La situation géographique

Le Djebel de Boukhadra se situe sur l'Atlas saharien, à l'Est Algérien. L'unité de Boukhadra se trouve à une altitude de 850 m, le point culminant du Djebel est de 1463 mètres. La ville de Boukhadra fait partie de la Wilaya de Tébessa. Elle se situe à 45 Km au Nord – Est de cette wilaya, à 200 Km au Sud de la ville côtière d'Annaba, et à 18 Km de la frontière Tunisienne. Elle est reliée à Annaba par une voie ferrée qui assure le transport du minerai de fer au complexe d'El-Hadjar. [33]

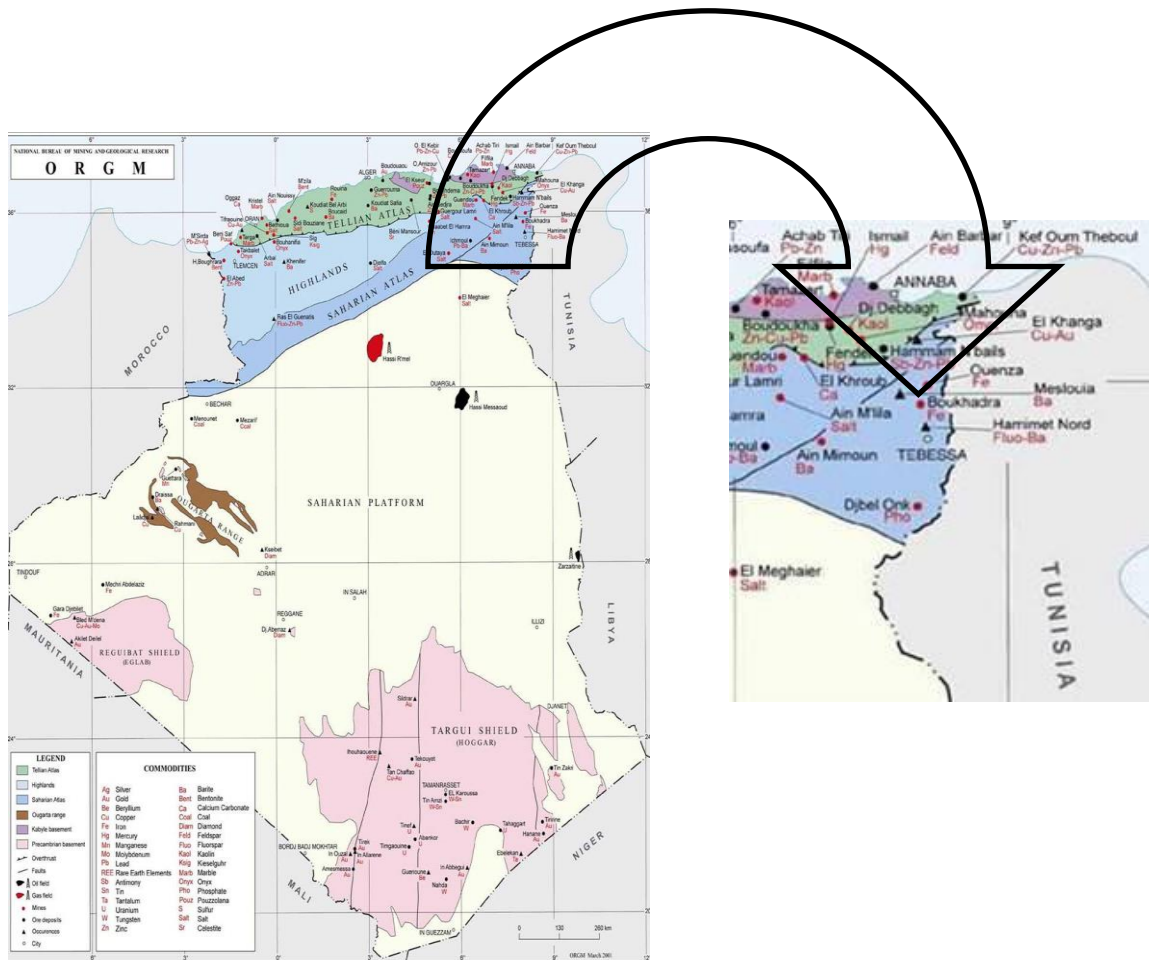


Figure II.2 : Situation géographique de la région du BOUKHADRA. [33]

II.4. Cadre géologique

II.4.1. Géologie régionale

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

Plusieurs études ont été réalisées dans la région des confins Algéro-tunisiens, considèrent les formations triasiques comme des diapirs polyphasés liés aux phases compressives depuis l'Aptien jusqu'au Quaternaire (Dubourdiou, 1956 ; Thibièroz et Madre, 1976 ; Rouvier et al, 1985 ; Othmanine, 1987 ; Perthuisot et al, 1988 ; Aoudjehane et al, 1992 ; Bouzenoune, 1993 ; Bouzenoune et al, 1995 ; Kowalski et Hamimed, 2000).

Certains auteurs rattachent une relation entre la mise en place des diapirs à des phases tectoniques distensives permettant la mise en place des formations triasiques en

surface par une éventuelle halocinèse à caractère diapirique classique (Laatar, 1980 ; Orgeval et al, 1986 ; Smati, 1986 ; Chikhaoui, 1988 ; Hatira, 1988 ; Perthuisot et al, 1988). Quant à Vila (1994, 1995, 1996, 2001 ; Vila et Charrière, 1993 ; Vila et al, 1994 ; Vila et al, 1996), ils considèrent les formations triasiques comme d'importantes lentilles empruntées des fractures ouvertes qui vont être resédimentées et interstratifiées au sein des séries crétacées, à la manière de « glaciers de sel » sous-marins. [33]

II.4.2. Géologie du site

Le massif de Boukhadra présente une structure anticlinale orientée NE-SW, recoupée par le fossé de Tébessa-Morsott d'orientation NW-SE, l'ossature de l'anticlinal est constituée par les terrains du Crétacé moyen (Aptien- Vraconien) qui dessinent dans la partie NE une fermeture périclinale. Les terrains les plus anciens reconnus à l'affleurement sont représentés par les évaporites du Trias, ils sont le plus souvent en contact tectonique avec les formations du Crétacé. [33]

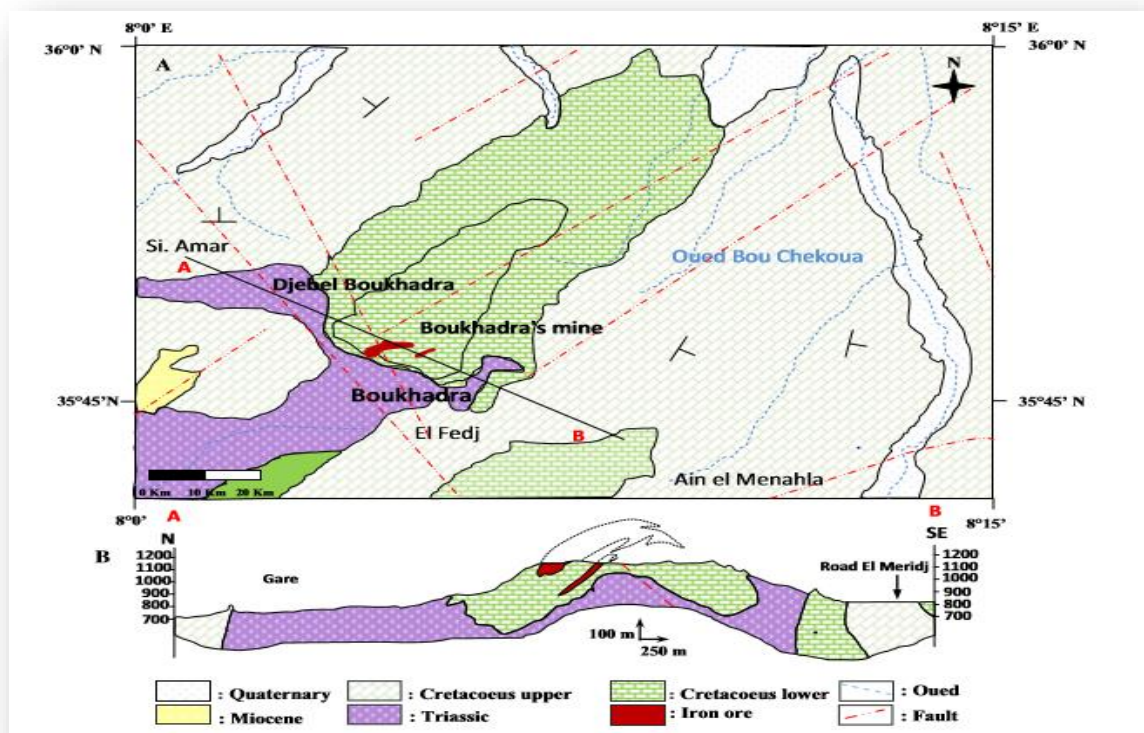


Figure II.3 : A Carte géologique simplifiée de la zone d'étude. B Coupe géologique NW-SE de la zone d'étude. [37]

II.4.3. Stratigraphie

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

A. Le Trias :

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

B. Le Crétacé:

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

- **L'Aptien :** La région de Boukhadra est caractérisée par un ensemble de diapirs qui ont joué au moins dès l'Aptien (Thibiéroz et Madre, 1976). Cette activité diapirique a gouverné l'évolution tectono-sédimentaire des différents massifs de la région qui s'est traduite par l'installation et le développement d'une sédimentation essentiellement carbonatée localisée sur l'apex des diapirs. Ces formations calcaires constituent l'un des plus importants réceptacles des minéralisations.
- **L'Albien :** Les dépôts albiens sont lithologiquement variés et peuvent être divisés en trois horizons inférieurs ; moyen et supérieur (Dubourdiou, 1956).
 - Les dépôts de l'Albien inférieur sont composés de marnes jaunes et gris-jaunes avec des inters-lits de calcaires gréseux et argileux, caractérisés par une importante accumulation d'Ammonites. La puissance de cet horizon est d'environ 150m.
 - **Les dépôts de l'Albien moyen:** sont représentés par des marnes gris-noires avec des intercalations de calcaires et calcaires argileux. La puissance de la série est d'environ 130m.
 - **Les dépôts de l'Albien supérieur:** sont représentés par des marnes grises ou grises noires avec des inters-lits de calcaires argileux noirs, la puissance de la série est d'environ 200 m. D'après la carte géologique de Boukhadra au 1/50000 de Dubourdiou (1956), le Trias est le plus souvent en contact avec l'Aptien carbonaté.
- **Vraconien :** Les sédiments vraconiens occupent de vastes surfaces aux environs du Boukhadra, soit au N ou au NW du massif (région de l'Oued el Harcha, Fedj es

Sekoum...), soit plus à l'E, dans la plaine étendue située au S du Def. Il est constitué de marnes argileuses gris noir à leur extrême base, plus claires et légèrement verdâtres

- **Le Cénomaniens** : Il affleure largement aux environs du Boukhadra où il est parfois très riche en organismes. Il affleure aussi à l'Est du Boukhadra et en bordure de l'Haoud es Srhir. Les dépôts cénomaniens comportent des alternances de calcaires gris bleu ou gris noir, très argileux en général, et de marnes grises, plus ou moins chargées, toujours peu épaisses, ont une patine claire, blanchâtre ou ocre.
- **Le Turonien** : Il affleure à l'Haoud es Srhir au voisinage de Morssot. Atteignant 9 km de longueur du NE au SW et large de 2 km en moyenne. Il comporte une accumulation assez épaisse de calcaires gris plus ou moins argileux et de marnes grises en général très riches en carbonates de chaux.
- **Coniacien** : Contiens les marnes argileuses avec intercalation d'argile marneuse et par endroits de calcaire marneux.

C. Le Tertiaire :

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

D. Le Quaternaire :

Les dépôts récents du Quaternaire sont formés par un matériel caillouteux, blocs de calcaires, grès, débris de minerai et de conglomérats. Ils sont répandus aux flancs de la montagne et dans les parties basses du relief. [33]

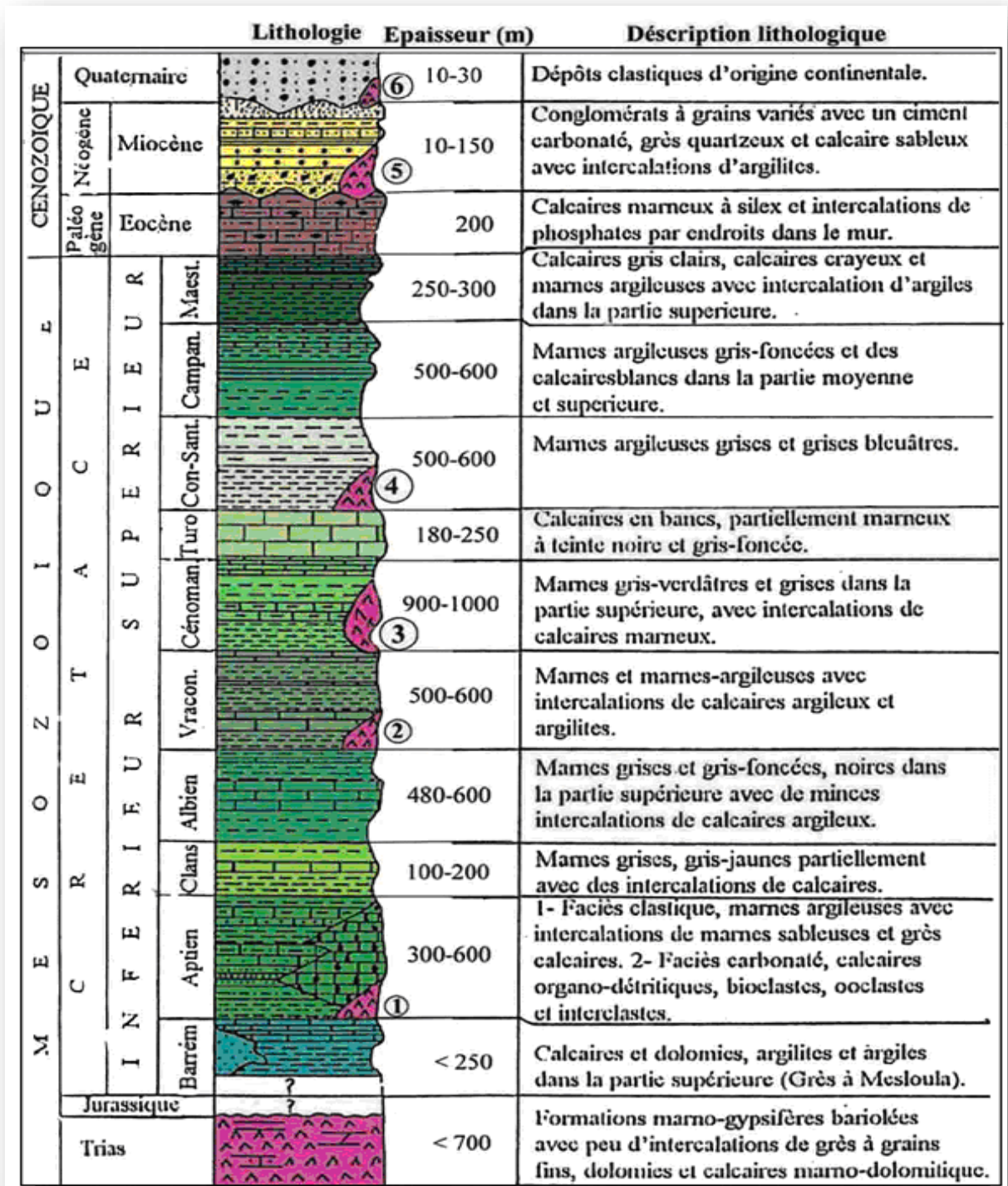


Figure II.4 : Coupe stratigraphique des monts du Mellegue d'après [Dubourdieu (1956, 1959) ; David (1956) ; Madre (1969) ; Fleury (1969) ; Thibièroz and Madre (1976) ; Chikhi (1980) ; Othmanine (1987), Bouzenoune (1993), Vila et al. (2001).]

II.5. Tectonique

La région de Boukhadra est marquée par deux phases tectoniques ; la phase de plissement et la phase de tectonique cassante. Dans la structure anticlinale de Boukhadra, on observe deux grandes dislocations tectoniques :

- ✓ La 1^{ère} se prolonge presque parallèlement à l'axe de l'anticlinal à partir du pic vers la terminaison périclinale.
- ✓ La 2^{ème} zone de dislocation tectonique de direction WNW-ESE coupe la structure dans sa partie centrale en deux parts, l'amplitude de cette dislocation peut arriver jusqu'à 1000 mètres.
- ✓ D'autres failles, sans importance majeure sont à signaler.

Le **Diapirisme** Triasique avait une contribution principale dans la formation de la structure du Djebel Boukhadra. [33]

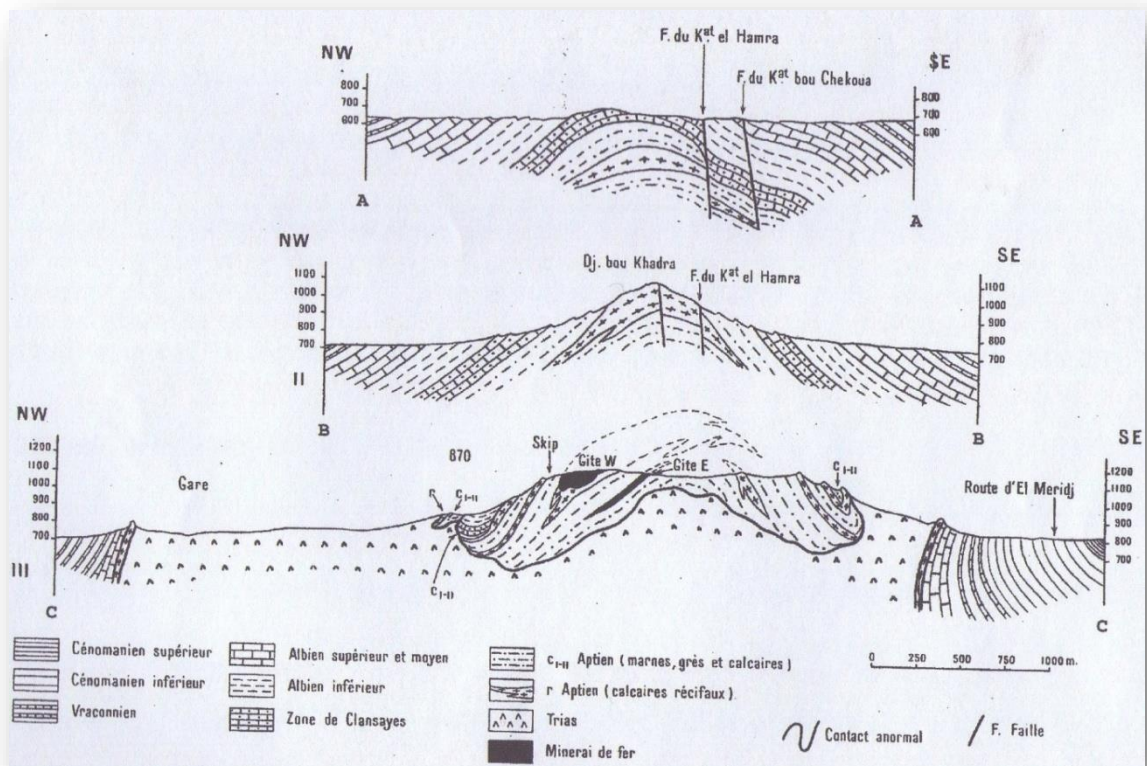


Figure II.5: Trois coupes transversales dans l'anticlinal de BOUKHADRA. [33]

II.6. Morphologie du gisement

Le gisement renfermant le minerai de Fer est de forme ventriculaire de type hydrothermal sédimentaire d'une longueur de 900 à 2200 m et d'une puissance variante de 10 à 50 m ; la minéralisation est de type fer hématite de formule chimique (F_2O_3) ; sa teneur moyenne est supérieure à 50% ; globalement le gisement de Boukhadra est composé de quatre (04) corps minéralisés principaux et les petites veines de moindre importance:

- ✚ Corps principal;
- ✚ Corps Nord ;
- ✚ Corps Médian ;
- ✚ Corps Sud. [33]

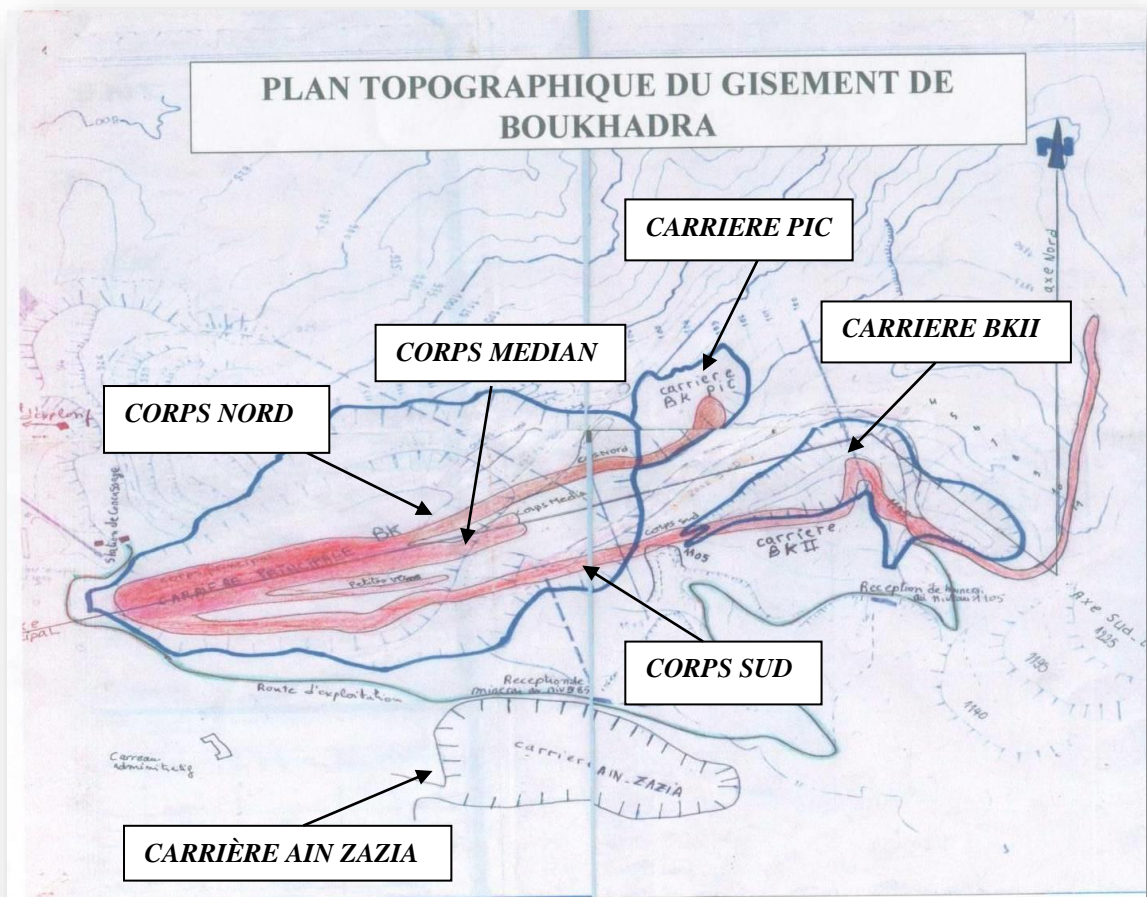


Figure II.6: Morphologie du gisement de BOUKHADRA. [33]

II.7. Hydrogéologie

D'après les études hydrogéologiques, il existe une nappe aquifère d'eau qui est caractérisée par un niveau hydrostatique égal à 818m.

Le réseau hydrographique dans la région de la mine de Boukhadra est faible, à l'exception des multiples petits chéneaux d'écoulement pluviaux sans importance majeure qui parsème de Djebel Boukhadra. [33]

II.8. Méthodes d'exploitation au niveau de la mine de Boukhadra

Au niveau de la mine de Boukhadra sont utilisées deux méthodes d'exploitation :

✚ Exploitation à ciel ouvert.

✚ Exploitation souterraine.

A. Exploitation à ciel ouvert :

Appliquée sur trois sites :

- Carrière Pic : épuisée.
- Carrière Principale : les travaux d'exploitation sont arrêtés et ils ont procédé à des travaux de développement.
- Carrière BKII : elle est en développement.

L'ouverture est faite au moyen de tranchées communes multiples, la hauteur du gradin est de **8 à 15** m et dans la carrière Ain Zezia est de **10** m. L'exploitation passe par les consécutives phases qui suivent : [33]

- ✓ **La foration** : s'effectue aux moyens de sondeuses, de chariots, et de marteaux perforateurs, les diamètres de chariots, et de marteaux perforateurs, les diamètres des trous de foration sont respectivement de 160 mm, 80 mm et de 26 mm ;
- ✓ **L'abattage** : s'effectue à l'explosif par tir électrique ;

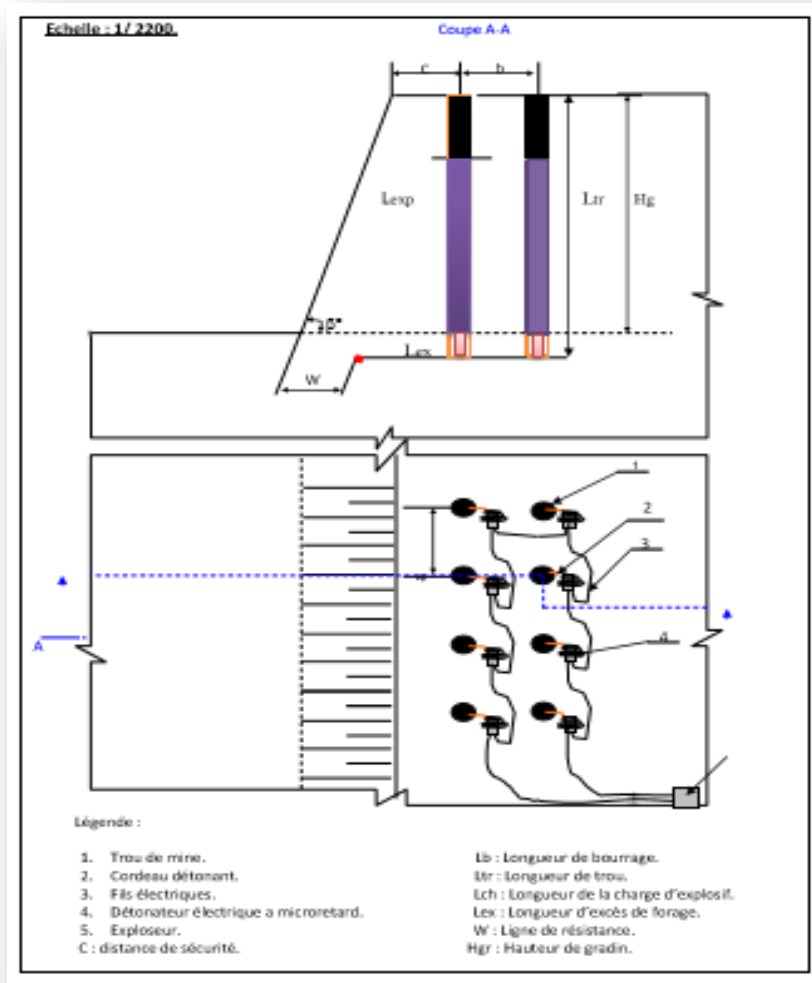


Figure II.7 : Schéma de plan de tir à ciel ouvert. [33]

✓ **Le chargement** : le chargement est opéré à l'aide de pelles mécaniques et de chargeuses sur pneus de capacité respective de : 3.22, 5.55 et 6.3m³.

B. Souterraine :

- La méthode appliquée est la méthode du sou niveau abattu dont l'ouverture est faite par des galeries au jour.
- L'exploitation souterraine est effectuée suivant trois axes :
 - Axe Nord ;
 - Axe Principal ;
 - Axe Sud Est.

Tableau II.1 : Les profondeurs moyennes et l'angle de pendage du gîte exploité en souterrain. [33]

	Profondeur (m)	Angle de pendage (°)
Axe Nord2	391	60
Axe Sud Est	320	54
Axe Principal	215	54

On a cinq phases d'exploitation qui contiennent plusieurs types d'ouvrages souterrains verticaux (cheminées), inclinés (montages, descenderies), horizontaux (galeries), dont on s'est intéressé à la galerie principale de la 3^{ème} phase d'exploitation. [33]

A. Situation de la galerie principale

Cette galerie est située à l'axe Nord, au niveau 1105 m et elle constitue le niveau de base de la 3^{ème} phase et le niveau de tête de la 4^{ème} phase.

B. Importance de la galerie principale

La galerie principale du niveau 1105 comme son nom l'indique est utilisée pour le roulage (le transport du minerai exploité), l'aéragé, la circulation des ouvriers et du matériel nécessaire pour les différents travaux de mine et elle constitue aussi le seul accès à la 3^{ème} phase au niveau des trois axes.

C. Description de la galerie principale

La galerie principale 1105 est creusée au stérile, c'est une galerie au jour horizontal et elle a la forme d'une voûte.

La galerie du niveau 1105 m, traverse un terrain présentant une stratification subvertical avec différentes épaisseurs des couches, présentées par **la figure II.8**.



Figure II.8: Présentation du tracé de l'ouvrage. (La galerie principale du niveau 1105 m). [33]

Tableau II.2 : Les dimensions de la galerie principale du niveau 1105 m. [33]

Hauteur moyenne (m)	3.5
Largeur moyenne (m)	4
Section (m²)	12-13
Longueur (m)	225

Tableau. II.3 : Failles et fissures existantes dans la galerie principale du niveau 1105. [33]

Discontinuités	Direction (grade)	Pendage (°)	Ouverture (cm)	Remplissage	Distance de l'entrée (m)
-Faille	310 nord	-	-	-	39
-Faille	280 nord	-	-	-	40.5
-Faille	Nord sud	-	-	-	69
-Faille	180 nord	-	-	Calcite	74.5
-Des petits fissures	Différentes directions	-	-	Calcite	-
-Faille	350 nord	10°ouest	4	-	77
-Des petits fissures	Différentes directions	-	-	Calcite	-
-Faille	330 nord	45°	40	-	91
-Des petits fissures	Différentes directions	-	-	Calcite	-
-Faille	330 nord	-	-	Calcite	99
-Faille	330 nord	-	-	Calcite	107
-Faille	330 nord	-	-	Calcite	115
-Faille	330 nord	-	-	Calcite	123
-Faille	330 nord	45°	40	-	126
-Faille	Nord sud	70°	-	Calcite	156

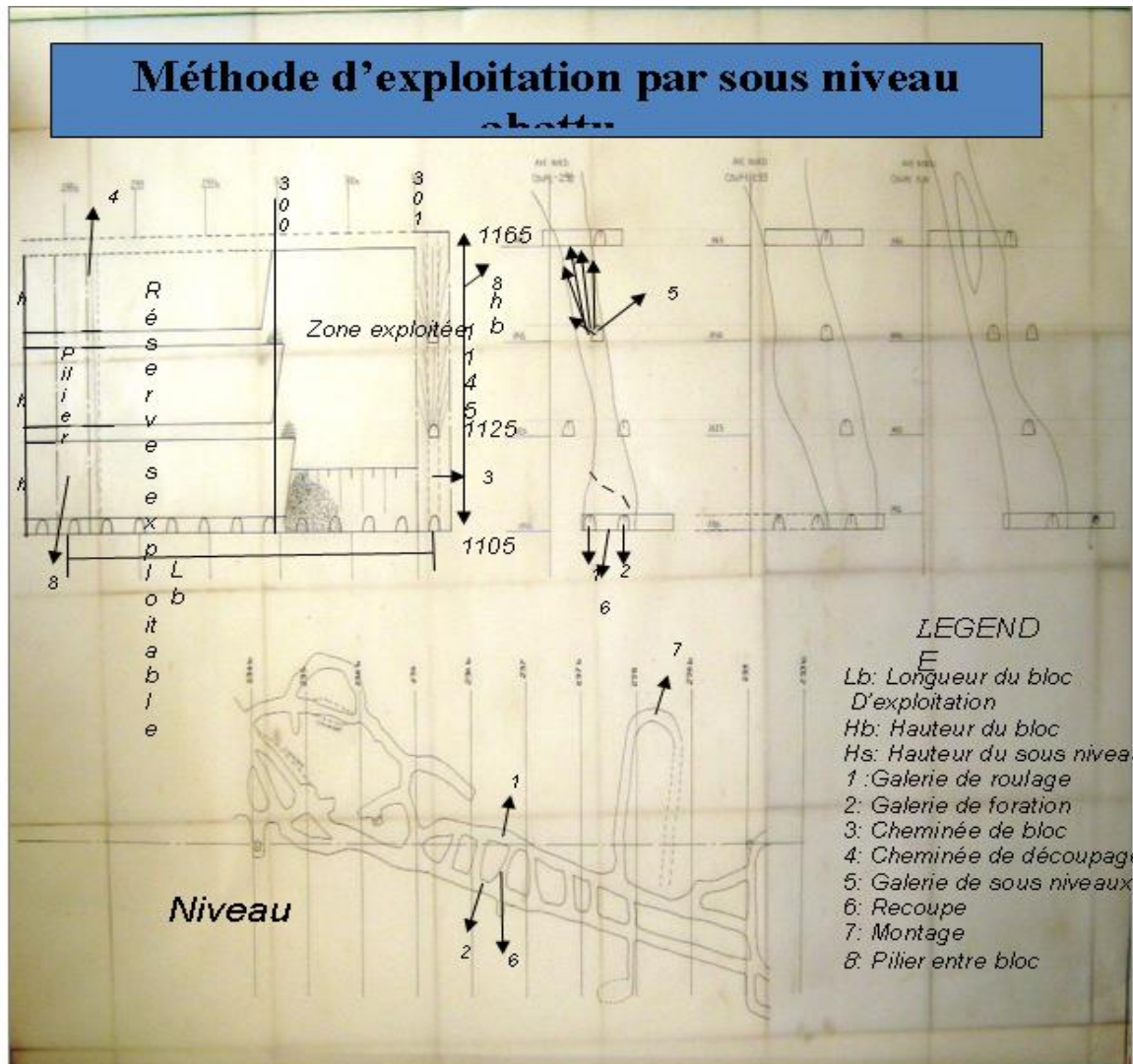


Figure II.9 : Méthode d'exploitation souterraine par sous niveau abattue. [33]

II.9. Les différentes phases de l'effondrement BKII

✚ Phase 01 :

L'effondrement s'est produit en 2012 dans l'axe Nord de gisement, c'est un effondrement de roche vers le fond d'un vide souterrain entre les coupes 294-295-296-297-298 au niveau de la carrière BKII, axe Nord. L'exploitation se fait au niveau 1285 par une méthode d'abatage en rabattant (en parallèle) qui a créé un vide important jusqu'à la surface (une couche mince) qui ne peut pas supporter les contraintes en plus les conditions hydrogéologiques et la présence d'une couche de marne jaune qui favorise l'effondrement brutal de masse de roche dans le vide créé auparavant. [34]



Photo II.1 : Un effondrement dans le niveau 1285. [34]

✚ Phase 02 :

L'effondrement s'est produit en 24 septembre 2019 dans l'axe Sud de gisement au niveau de la carrière BKII entre les coupes 08-09-10, l'exploitation à ciel ouvert se fait au niveau (1105-1135) (carrière BKII), et la partie inférieure jusqu'au niveau 1105 par le souterrain par une méthode d'abatage en rabattant qui a créé un vide souterrain, et parmi les raisons qui ont conduit à l'effondrement le jumelage de gradin (H=15 jusqu'à H=35 m) et la combinaison entre l'exploitation souterraine et à ciel ouvert au niveau 1135. [34]



Photo II.2 : Effondrement au niveau de la carrière BKII. [34]

+ Phase 03 :

En 05-10-2019 a eu lieu un effondrement au niveau de la carrière BKII axe Sud et entre les coupes 07-08-09-10 et a la conséquence de plusieurs paramètres de différent ordre tel que ; (le terrain calcaire marneux) est provoqué par la circulation des eaux pluviales par le procédé de filtration et intercalations des couches de minerai et de marne dans un toit humide et la charge glissante des gradins de BKII, la forme de gradin, la largeur de plate forme n'est pas respecté.[34]



Photo II.3 : Effondrement au niveau de la carrière BKII. [34]

II.10. Reconnaissance géotechnique

Les propriétés physico-mécaniques et technologiques des roches ont une grande influence sur la stabilité des terrains.

- ✚ Parmi les propriétés physiques, les plus importantes sont : la masse volumique, la porosité, la densité, l'humidité et la dureté... etc.
- ✚ Les propriétés mécaniques sont : la résistance à la compression, la résistance à la traction et la résistance au cisaillement, d'autres propriétés mécaniques aussi importantes sont : l'angle de frottement interne et la cohésion.

II.10.1. Les propriétés physiques des roches

a. La porosité :

La porosité n est le rapport du volume des vides V_v de la roche au volume total V_t . La détermination de la porosité se donne par la formule suivante :

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

b. L'indice de vide :

L'indice des vides (e), il est défini comme le rapport du volume des vides contenus dans un échantillon donné ramené au volume des grains solides de l'échantillon.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1-n} \quad (\text{II.2})$$

c. La masse volumique :

On appelle masse volumique d'un matériau la masse de l'unité de volume de la roche (g/cm^3). On définit, suivant l'état du matériau ρ_s : la masse volumique absolue ou masse volumique du solide ρ_h : la masse volumique naturelle ρ_d : la masse volumique sèche ou réelle et ρ_{sat} : la masse volumique saturée (après saturation de la roche). [35]

$$\rho_s = \frac{MS}{V_s} ; \rho_d = \frac{MS}{V_t} ; \rho_h = \frac{Mh}{V_t} ; \rho_{sat} = \frac{Msat}{V_t} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- ✓ MS : la masse du matériau sec; g.
- ✓ V_s : le volume des grains après broyage; cm^3 .
- ✓ V_t : le volume de l'échantillon; cm^3 .

- ✓ M_h : la masse naturelle; g
- ✓ M_{Sat} : la masse de l'échantillon saturée; g.
- ✓ ρ_d dépend de la porosité de la roche, par contre ρ_s ne dépend que de la minéralogie.

Tableau II.4 : La masse volumique apparente des massifs rocheux de BOUKHADRA.

Échantillons	Calcaire	Marne jaune	Marne grise	Marne minéralisée	Minerai de fer	Conglomérat
Masse solide +paraffine (g)	224	237	152	294	139	320
Masse solide (g)	206	203	136	271	121	282
Masse de paraffine (g)	18	34	16	23	18	38
Volume de l'eau initial (cm ³)	400	400	400	400	400	400
Volume de l'eau Final (cm ³)	500	530	475	540	465	560
V2-V1 (cm ³)	100	130	75	140	65	160
ρ (g/cm ³)	2.6	2.2	2.4	2.4	2.7	2.4

d. La teneur en eau :

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

$$W = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \quad (II.4)$$

Tableau II.5 : La Teneur en eau des massifs rocheux de BOUKHADRA. [33]

Roche	Minerai de fer	Calcaire	Marne jaune	Marne minéralisée	Marne grise
La teneur en eau W (%).	-	3.801	1.316	2.159	1.568

e. Le degré de saturation :

C'est le rapport du volume de l'eau contenue dans l'échantillon au volume des vides, le degré de saturation peut varier de 0 % (sol sec) à 100% (sol saturé). [35]

$$Sr = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (II.5)$$

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

V_v : volume des vides, cm^3 .

Tableau II.6: Le degré de saturation des massifs rocheux de BOUKHADRA. [33]

Roche	Minerai de fer	Calcaire	Marne jaune	Marne minéralisée	Marne grise
Le degré de saturation (%)	-	21.19	34.08	37.57	37.53

f. La densité :

On entend par la densité (poids spécifique) d'un minéral le rapport entre son poids et celui du même volume d'eau ; une détermination précise de la densité exige des instruments spéciaux, on peut cependant l'estimer très approximativement en soupesant l'échantillon. On distingue deux types de densité. [30]

- **Densité absolue :** est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température.
- **La densité apparente :** à l'état compacté ou non compacté sera obtenue en établissent le rapport de la masse apparente d'une unité de volume du matériau à

température donnée à la masse d'une même quantité d'eau distillée à même température.

Tableau II.7: Les paramètres physiques des massifs rocheux de BOUKHADRA. [33]

Caractéristique des roches	Masse volumique (g/cm ³)	Dureté	Teneur en eau W (%)	Porosité n (%)	Degré de saturation Sr (%)
Marne jaune	2.2	3	1.316	6.5	34.08
Marne minéralisée	2.4	3	2.159	12	37.57
Marne grise	2.2	4	1.568	15	37.53
Conglomérats	-	-	2.433	79	7.19
Calcaire	2.6	7-8	3.801	51	21.19
Minerai de fer	2.7	5	-	-	-

II.10.2. Les propriétés mécaniques des roches

a. La résistance à la compression :

La résistance à la compression **Rc** est la contrainte maximale supportée par l'échantillon avant la rupture lors d'un essai de compression simple. Elle est donnée par la formule suivante: [21]

$$Rc = \frac{F}{S} \text{ (MPa)} \quad \text{(II.6)}$$

Ou :

- ✓ **F** : effort (charge) maximal;
- ✓ **S** : section ou surface sur laquelle on applique l'effort F;

Tableau II.8 : Classification des roches en fonction de la résistance à la compression.
[21]

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

Nous avons mesuré la résistance à la compression de plusieurs formations par le marteau de Schmidt « le scléromètre » ;

A. Présentation des résultats :

Tableau II.9 : La résistance à la compression des massifs rocheux de BOUKHADRA d'après le marteau de Schmidt.

Roche	Calcaire	Minerai de fer	Marne jaune	Marne minéralisée	Marne grise	Conglomérat
Résistance à la compression (MPa)	49	57	15	20	13	20

B. Interprétation des résultats :

Les résultats de la résistance à la compression représentée dans le tableau suivant ;

Tableau II.10 : Classification des massifs rocheux du BOUKHADRA en fonction de la résistance à la compression.

Roches	Résistance à la compression (MPa)	Qualité de la roche
Calcaire	49	Résistante
Minerai de fer	57	Résistante
Marne jaune	15	Moyenne
Marne minéralisée	20	Moyenne
Marne grise	13	Moyennes
Conglomérat	20	Moyennes

b. La résistance à la traction

➤ Traction directe

En soumettant une éprouvette cylindrique à une traction uniaxiale, la résistance à la traction simple est égale à la contrainte limite de traction qui produit la décohésion des échantillons des roches massives. [21]

$$R_t = \frac{P_{\max}}{A_0} \text{ (MPa)} \quad (\text{II.7})$$

Ou :

- ✓ **P_{max}** : valeur finale atteinte par l'effort appliqué ;
- ✓ **A₀** : surface transversale.

➤ Traction indirecte (Essai brésilien)

C'est l'essai de traction le plus commun pour les roches ; pour réaliser cet essai, on utilise une éprouvette de longueur à peu près égale au diamètre. L'éprouvette est placée entre les plateaux de la presse puis elle est chargée. La contrainte de traction est donnée par la relation suivante : [21]

$$R_t = \frac{2F_{\max}}{\pi DL} \text{ (MPa)} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- ✓ **F_{max}**: la charge maximale appliquée ;
- ✓ **D et L** : dimensions de l'éprouvette cylindrique.

Tableau II.11 : Classification des roches en fonction de la résistance à la traction. [21]

Roches	Faiblement résistantes	Moyennes	Résistantes	Très résistantes
R _t (MPa)	0.40	1.50	4	>20

On peut déterminer la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression, par la relation suivante : [21]

$$R_t = \left(\frac{0,08}{0,12} \right) * R_c \quad (\text{II.9})$$

A. Présentation des résultats :

Tableau II.12 : La résistance à la traction des massifs rocheux de BOUKHADRA en fonction de la résistance à la compression.

Roche	Calcaire	Minerai de fer	Marne jaune	Marne minéralisée	Marne grise	Conglomérat
Résistance à la traction (MPa)	33	38	10	13	9	13

B. Interprétation des résultats :

Les résultats de la résistance à la traction représentée dans le tableau suivant ;

Tableau II.13 : Classification des massifs rocheux du BOUKHADRA en fonction de la résistance à la traction.

Roches	Résistance à la traction (MPa)	Qualité de la roche
Calcaire	33	Moyenne
Minerai de fer	38	Moyenne
Marne jaune	10	Faiblement
Marne minéralisée	13	Faiblement
Marne grise	9	Faiblement
Conglomérat	13	Faiblement

c. La résistance au cisaillement**➤ L'essai de Cisaillement direct :**

Dans l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande, on cherche à provoquer la rupture de l'échantillon suivant un plan imposé. L'échantillon est placé dans une boîte constituée de deux parties qui peuvent glisser horizontalement l'une sur l'autre. On applique à l'échantillon un effort normal de compression verticalement, par l'intermédiaire d'un piston et un effort tranchant T, horizontalement, en déplaçant la demi-boîte inférieure. Un comparateur mesure la variation de l'échantillon. [20]

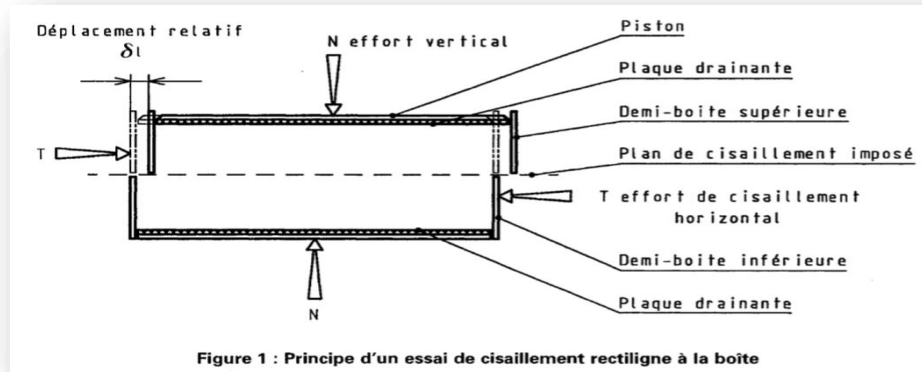


Figure II.10 : Principe d'un essai de cisaillement. [20]

Tableau II.14 : Les paramètres mécaniques de différentes formations dans Boukhadra. [33]

Les propriétés	Cohésion(c) (Bar)	L'angle de frottement interne (ϕ) (°)	Module de Young (E) (GPa)	Coefficient de poisson (ν)
Marne jaune	0.33	23	6.19	0.33
Marne minéralisée	2.6	40	4.47	0.3
Marne grise	2.7	35	4.47	0.35
Calcaire	3.5	50	19.84	0.22
Minerai de fer	3.2	45	21	0.25

II.11 Conclusion

La nature sédimentaire du terrain étudié fait qu'il existe une anisotropie très marquée liée à leur dépôt, cette anisotropie caractérisant donc la matrice rocheuse est souvent désignée par des joints de stratification qui forment des plans de glissement naturels. Les terrains sont formés par des sédiments du Mésozoïque et une partie du Tertiaire et du Quaternaire pour le Mésozoïque, les formations sont formées par les sédiments du Trias et du Crétacé,

Les formations sédimentaires telles que les marnes, les grés, les conglomérats, calcaires et calcaires marneux sont sujet d'éboulement dans quelques zones du massif rocheux de Boukhadra,

La région de Boukhadra est marquée par deux phases tectoniques ; la phase de plissement et la phase de tectonique cassante. Dans la structure anticlinale de Boukhadra,

D'après les études hydrogéologiques il existe une nappe aquifère d'eau non potable qui est caractérisée par un niveau hydrostatique égal à 818 m,

Il y a eu le déclenchement d'une série des effondrements de roche vers le fond d'un vide souterrain depuis 2012 au niveau de la carrière BKII ; le premier a l'axe Nord de gisement, entre les coupes 294-295-296-297-298, axe Nord, le deuxième a eu lieu le 05-10-2019 dans l'axe Sud et entre les coupes 07-08-09-10 et le troisième a eu lieu le 05-10-2019 a l'axe Sud et entre les coupes 07-08-09-10,

Les effondrements sont la conséquence de plusieurs paramètres de différent ordre tel que ; la nature géologique des couches (terrain marneux) ; la circulation des eaux pluviales par le procédé d'infiltration et intercalations des couches de minerai et de marne dans un toit humide et la charge glissante des gradins de BKII, la forme géométrique et le jumelage des gradins, l'interaction entre l'exploitation souterraine et à ciel ouvert ; l'effet des vibrations engendrées par les travaux d'abattage.

Chapitre III:

Caractérisation et classification géomécanique du massif rocheux



III.1. Introduction

L'utilisation de la classification géomécanique des massifs rocheux a un intérêt considérable lors de l'étude de la stabilité des gradins des mines.

Dans ce chapitre, nous appliquons les systèmes de classification des massifs rocheux « RQD, RMR, SMR, Q, GSI », ce qui nous permet d'avoir une connaissance plus précise des différents faciès (Calcaire, Fer, Marne, Conglomérat) de la mine de fer de BOUKHADRA.

III.2. Le Rock Quality Designation index (RQD)

Le Rock Quality Designation (RQD) a été développé par Deere et Al. (1967) afin de donner une estimation quantitative de la fracturation influençant le comportement de la masse rocheuse à partir de l'examen de carottes obtenues par des forages.

Le RQD est défini comme le pourcentage de morceaux intacts de longueur supérieure à 10 cm, sur la longueur totale du forage. [28]

$$\text{RQD}(\%) = \frac{\sum \text{longueurs de morceaux de plus de 10cm}}{\text{longueur totale du forage}} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Tableau III.1 : Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux (tiré de Deere, 1968). [28]

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

II.2.1. La classification du massif rocheux par le système RQD

A. Présentation des résultats :

➤ Les résultats de RQD de **GRADIN 01** sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Les résultats de RQD des différentes sections de GRADIN 01.

GRADIN N°01		
Section :	Ligne de trace :	RQD_{moy} (%) :
01	01	74
	02	
	03	
06	01	57
	02	
	03	
09	01	64
	02	
	03	
14	01	86
	02	
	03	
RQD_{moy} (%) du GRADIN N° 01 :		65%

➤ Les résultats de RQD de **GRADIN 02** sont représentés dans le tableau suivant :

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

GRADIN N°02		
Section :	Ligne de trace :	RQD_{moy} (%)
01	01	70
	02	
	03	
05	01	65
	02	
	03	
11	01	46
	02	
	03	
12	01	68
	02	
	03	
RQD_{moy} (%) du GRADIN N° 02 :		57%

B. Interprétation des résultats :**Tableau III.4:** Qualité de la masse rocheuse d'après le système de classification RQD.

Roche	Qualité de la roche
Calcaire	Moyenne
Minerai de fer	Bonne
Marne jaune	Pauvre
Marne grise	Moyenne
Marne minéralisé	Moyenne
Conglomérat	Très pauvre

Selon les résultats de RQD des différentes sections du GRADIN 01 et GRADIN 02, la qualité du minerai de fer est bonne, moyenne pour le calcaire, la marne grise et la marne minéralisée ; finalement la qualité est pauvre pour la marne jaune et très pauvre pour le conglomérat.

III.3. Le Rock Mass Rating (RMR)

Bieniawski a publié en 1976 les détails d'une classification des masses rocheuses intitulées **Geomechanics Classification or the Rock Mass Rating (RMR) system**. Depuis la version originale, certaines modifications ont été apportées. Désormais, plusieurs variantes de la classification de Bieniawski sont disponibles. Les versions 1976 et 1989 sont les plus couramment utilisées.

En reprenant la version 1976 du système de classification, la somme de ces coefficients détermine la valeur du RMR, qui peut varier entre 0 et 100.

L'utilisation du RMR se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants:

- ✚ 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. [28]

$$\mathbf{RMR}_{\text{de base}} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_3 + \mathbf{A}_4 + \mathbf{A}_5 \quad (\text{III.2})$$

L'application de cette classification est limitée aux cas de massifs dont la matrice a une bonne résistance et dont le comportement est régi par les discontinuités.

La version 1976 du système de classification (\mathbf{RMR}_{76}) est basée sur l'utilisation du $\mathbf{RMR}_{\text{de base}}$, se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants et leurs pondérations. [20]

- ✚ 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. [20]

$$\mathbf{RMR}_{76} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_3 + \mathbf{A}_4 + \mathbf{A}_5 + \mathbf{A}_6 \quad (\text{III.3})$$

Tableau III.5 : Paramètres de classification des roches et notes de pondération. [36]

Paramètre		Coefficient							
1	Résistance de la roche	Indice Franklin	>8 MPa	4-8 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Indice franklin non 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	Espacement des joints	>3m	1-3 m	0.3-1 m	50-300mm	<50mm			
	Note	30	25	20	10	5			
4	Nature des joints	Surface très rugueuse continue épontée en contact épontée non altéré	Surface légère rugueuse épaisseur <1 mm épontée non altéré	Surfaces légères rugueuses épaisseur <1mm Épontée altéré	Surfaces lustrées ou remplissage <5mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	Remplissage mou >5 mm ou joint Ouverts > 5 mm joints continus			
		Note	25	20	12	6	0		
5	Venues d'eau	Débit 10m	Aucune venue d'eau	< 25 l/min	25-125 l/min	> 25 l/min			
		Pression d'eau contrainte principale	0	0.0-0.2	0.2-0.5	> 0.5			
		Hydro géologie	Complètement sec	Suintement (eau interstitielle)	Pression d'eau modérée	Problème sérieux de venues d'eau			
	Note	10	7	4	0				

Tableau III.6 : Qualité du massif rocheux selon Bieniawski. [29]

N° de classe	RMR	Description
I	81-100	Excellente qualité
II	61-80	Bonne qualité
III	41-60	Moyenne qualité
IV	21- 40	Faible qualité
V	< 20	Très faible qualité

III.3.1. La classification du massif rocheux par le système de classification RMR

A. Présentation des résultats :

Tableau III.7 : Exemple de classification de section 01/ GRADIN 01.

RMR pour la section 01/ GRADIN 01					
Les paramètres	Résistance à la compression (MPa)	RQD (Rock Quality Designation)	Espacement des joints	Nature des joints	Venues d'eau
	57	74	1-3 m	Surfaces légères rugueuses épaisseur <1mm Éponte altéré	Aucune venue d'eau
Note	7	13	25	12	10
RMR de base = A₁ + A₂ + A₃ + A₄ + A₅					
RMR de base = 67					
RMR₇₆ = A₁ + A₂ + A₃ + A₄ + A₅ + A₆					
RMR₇₆ = 65					

➤ Les résultats de RMR dans le **GRADIN 01** sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.8 : Les résultats de RMR des différentes sections de **GRADIN 01**.

GRADIN N°01	
Section	RMR₇₆
01	65
05	49
12	25
14	69
RMR moy du GRADIN 01	55

➤ Les résultats de RMR de **GRADIN 02** sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.9 : Les résultats de RMR des différentes sections de **GRADIN 02**.

GRADIN N°02	
Section	RMR₇₆
01	57
05	42
08	72
11	50
12	59
RMR moy du GRADIN 02	50

B. Interprétation des résultats :

Tableau III.10: Qualité de la masse rocheuse de la mine de fer de **BOUKHADRA** d'après le système de classification RMR.

Roche	Qualité de la roche
Calcaire	Bonne qualité.
Minerai de fer	Bonne qualité.
Marne jaune	Faible qualité.
Marne grise	Moyenne qualité.
Marne minéralisée	Moyenne qualité.
Conglomérat	Faible qualité.

Suivant les résultats de RMR des différentes sections du GRADIN 01 et GRADIN 02 ; la qualité de la masse rocheuse est comme suit :

- Le Minerai de fer, le calcaire sont bons de classe II ;
- Moyenne pour la marne grise et la marne minéralisée, de classe III ;
- Par contre pour la marne jaune et le conglomérat la qualité est faible de classe IV.

III.4. La projection stéréographique

La projection stéréographique est une construction géométrique qui permet de représenter les orientations des discontinuités en 2D.

La théorie de cette projection est une transformation géométrique appelée inversion, par laquelle une droite est représentée par :

- ✓ un point ;
- ✓ un plan ;
- ✓ une ligne.

Les représentations classiques sont les projections dans un cercle équatorial selon les méthodes de Wulff ou de Schmidt.

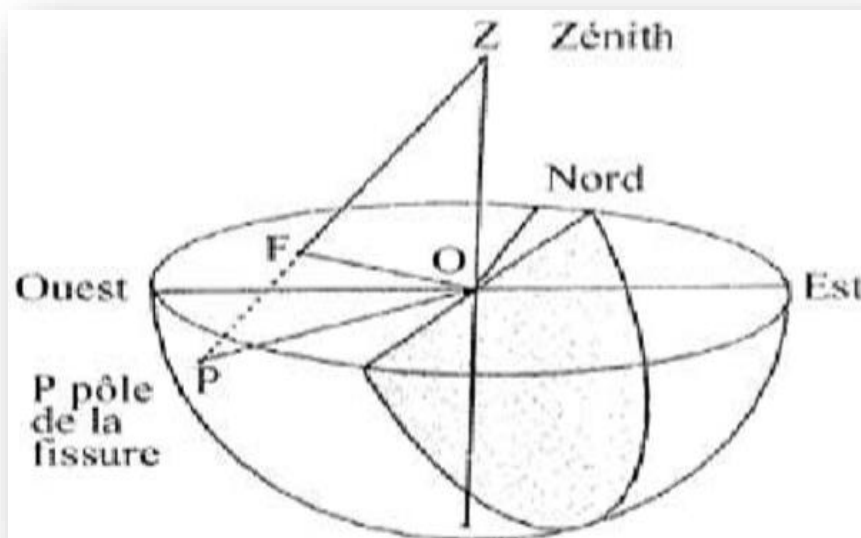


Figure III.1 : Projection de Wulff. [20]

III.5. Représentation stéréographique

Cette projection a été réalisée par le programme STERONET (Un programme de projection sténographique, pour l'analyse et la présentation de données géotechniques). Pour connaître les nombres de familles des discontinuités.

III.5.1. Les directions et les pendages des talus

Tableau III.11 : Les directions et les pendages des talus des différentes sections du GRADIN01.

GRADIN N°01		
Section	Direction	Pendage
01	350	50
	110	75
	110	45
04	100	57
	320	35
	150	60
05	130	30
	300	75
14	110	45
	110	75
	350	55

Tableau III.12 : Les directions et les pendages des talus des différentes sections du GRADIN02.

GRADIN N°02		
Section	Direction (°)	Pendage (°)
01	180	75
	360	35
	360	55
05	350	76
	80	70
	320	75
11	120	50
	90	80
12	120	45
	120	75
	360	50

III.5.2. La projection des directions et des pendages de la discontinuité de différents gradins

Les figures suivantes représentent des exemples sur la projection pour chaque gradin étudié.

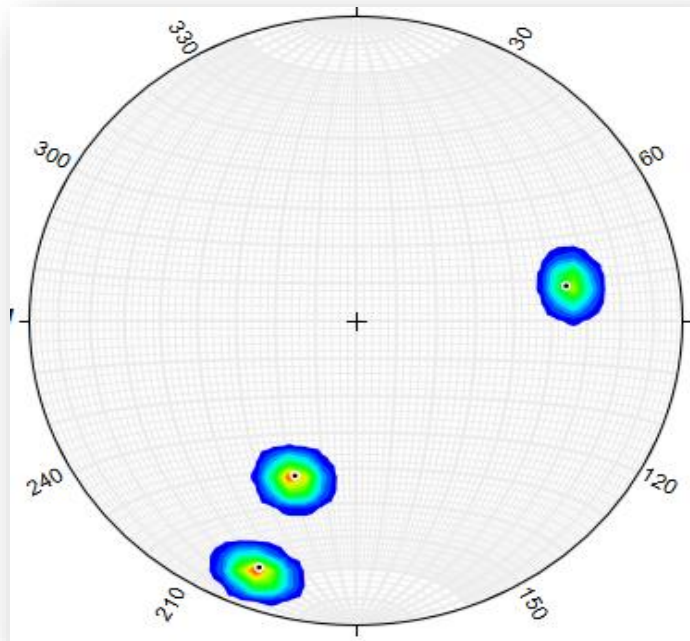


Figure III.2 : Projection stéréographique section 14 / GRADIN 01.

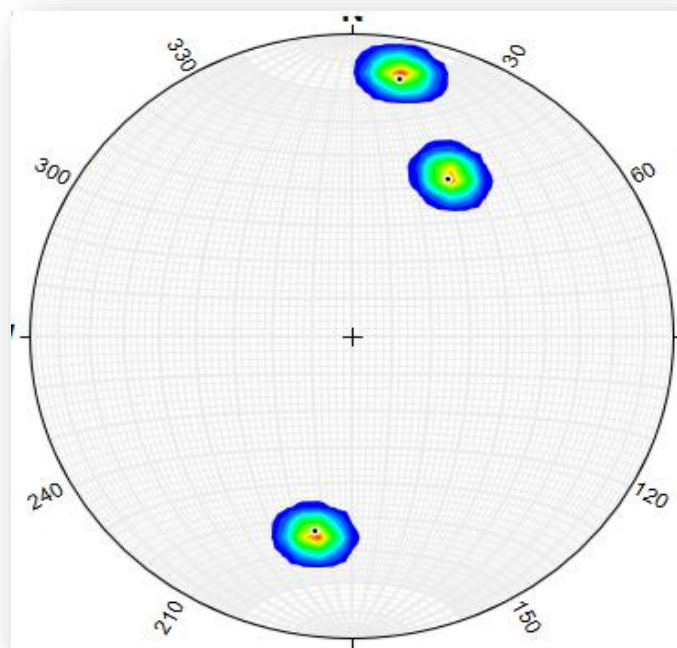


Figure III.3 : Projection stéréographique section 10 / GRADIN02.

III.5.3. Présentation des résultats de la projection

Tableau III.13 : Les résultats de la projection des différentes sections de GRADIN 01.

Section	Famille	Direction des joints (°)	Pendage des joints (°)
01	01	080	40
	02	200	45
	03	200	15
03	01	049	55
	02	010	20
06	01	029	55
	02	300	20
	03	010	20
13	01	029	40
	02	050	34
	03	180	10
14	01	079	35
	02	200	45
	03	200	15

Tableau III.14: Les résultats de la projection des différentes sections de GRADIN 02.

Section	Famille	Direction des joints	Pendage des joints
01	01	090	15
	02	090	35
	03	270	55
04	01	080	25
	02	090	10
	03	180	07
07	01	350	20
	02	300	20
08	01	090	10
	02	300	10
	03	230	35
09	01	030	20
	02	050	45
	03	221	60
12	01	080	40
	02	181	45
	03	200	15

III.6. Slope Mass Rating (SMR)

Romana a défini un système de classification pour les talus et les falaises qu'il a nommé le SMR (Slope Mass Rating) en s'appuyant sur le principe de la classification de Bieniawski en ajoutant un facteur d'ajustement factoriel en fonction de l'orientation relative des discontinuités et de la pente et à un autre facteur de correction en fonction de la méthode d'excavation. Il a ainsi défini le SMR par la formulation suivante : [20]

$$\text{SMR} = \text{RMR}_{\text{Base}} + (\mathbf{F}_1 \times \mathbf{F}_2 \times \mathbf{F}_3) + \mathbf{F}_4 \quad (\text{III.4})$$

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. [20]

- ✓ **F1**: est un facteur dépendant du parallélisme entre les discontinuités et la pente, qui prend des valeurs comprises entre 0.15 et 1 et peut être définie par la formule suivante :

$$\mathbf{F1} = (1 - \sin A)^2 \quad (\text{III.5})$$

A: est la différence entre la direction du pendage des talus et celle des discontinuités.

- ✓ **F2**: Est lié au pendage. Il prend des valeurs comprises entre 0.15 et 1. Il est défini par la formule suivante :

$$\mathbf{F2} = \tan \beta_j \quad (\text{III.6})$$

Où :

B : est le pendage des discontinuités.

- ✓ **F3** : est l'ajustement de Bieniawski pour les joints ;
- ✓ **F4** : détermine le type du talus (naturel, artificiel, etc.), qui varie entre -8 et +15 selon le type de talus ; [28]

III.6.1. La classification du massif rocheux par le système de classification SMR

A. Présentation des résultats :

Tableau III.15 : Exemple de classification dans la section 14/ GRADIN 01.

SMR pour Section 14 / GRADIN 01			
Les familles	1^{er} famille des discontinuités	2^{ème} famille des discontinuités	3^{ème} famille des discontinuités
Direction du talus	110	110	350
Pendage du talus	45	75	55
Direction du joint	200	200	079
Pendage du joint	45	15	35
RMR de base	71	71	71
SMR = RMR de base + (F₁ × F₂ × F₃) + F₄			
F1	0.15	0.15	0.15
F2	0.85	0.15	0.85
F3	-25	-60	-60
F4	-8	-8	-8
SMR	59.81	61.65	55.35
SMR_{moy}		59	

➤ Les résultats de SMR pour le **GRADIN 01** sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.16 : Les résultats de SMR des différentes sections de GRADIN 01.

GRADIN N °01			
Section	Les familles	SMR	SMR_{moy}
01	01	47.62	50
	02	52.65	
	03	50.81	
04	01	44.7	47
	02	51	
	03	44.7	
06	01	41.4	43
	02	41.4	
	03	45	
07	01	51	51
	02	51	
11	01	28.64	30
	02	32	
	03	28.81	
14	01	59.81	59
	02	61.65	
	03	55.35	
SMR_{moy} = 46			

➤ Les résultats de SMR de **GRADIN 02** sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.17 : Les résultats de SMR des différentes sections dans le GRADIN 02.

GRADIN N°02			
Section	Les familles	SMR	SMR_{moy}
01	01	49.65	48
	02	51	
	03	43.35	
09	01	28.4	30
	02	32	
	03	28.81	
12	01	47.81	47
	02	49.65	
	03	44.62	
SMR_{moy} = 42			

B. Interprétation des résultats :

Tableau III.18 : Les différentes classes de la stabilité par la valeur du SMR.

Roche	Classe	Description	Stabilité
Calcaire	III	Normal	Partiellement stable
Minerai de fer	II	Bonne	Stable
Marne jaune	IV	Mauvaise	Instable
Marne grise	III	Normal	Partiellement stable
Marne minéralisé	III	Normal	Partiellement stable
Conglomérat	V	Très mauvaise	Complètement instable

D'après les résultats que nous avons obtenus avec la méthode SMR ; la note de l'SMR donne une note dans l'intervalle de (61-80) pour le minerai fer c'est-à-dire le massif est de bonne qualité et stable.

Une note de (41-60) pour le calcaire et la marne grise et la marne minéralisé ; Alors on peut dire que le massif est de qualité normal et partiellement stable. Mais pour la marne jaune une note dans l'intervalle (21-40) qui signifie que le massif est de mauvaise qualité et instable, et pour le conglomérat la qualité est très mauvaise c'est-à-dire le massif est complètement instable.

III.7. Q-system

La classification de Barton a été présentée en 1974. Elle repose sur le même principe que la classification de Bieniawski, c'est-à-dire qu'elle attribue une note de qualité au massif rocheux, en combinant plusieurs paramètres. Cette classification fait intervenir les paramètres suivants:

- ✚ le RQD,
- ✚ J_n = indice des familles de joints ;
- ✚ J_r = indice de rugosité des joints ;
- ✚ J_a = indice d'altération des joints ;
- ✚ J_w = conditions hydrauliques ;
- ✚ SRF = conditions de contraintes. [29]

Q est calculé comme suit :

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w/SRF). \quad (III.7)$$

Tableau III.19 : Qualité du massif rocheux selon Barton. [29]

Intervalles de valeurs du coefficient Q	Qualité du massif
400 – 1000	Exceptionnellement bonne
100 – 400	Extrêmement bonne
40 – 100	Très bonne
10 – 40	Bonne
4 – 10	Moyenne
1 – 4	Mauvaise
0.1 – 1	Très mauvaise
0.01-0.1	Extrêmement mauvaise
0.001-0.01	Exceptionnellement mauvaise

III.7.1. La classification du massif rocheux par le Q-system

A. Présentation des résultats :

Les résultats de Q-system de **GRADIN 01** sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.20 : Les résultats de Q-system des différentes sections de **GRADIN 01**.

GRADIN N°01								
Section	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Qualité du massif
01	74	9	1.5	1	1	1	12	Bonne
05	56	4	1.5	1	1	1	21	Bonne
09	64	4	1.5	1	1	1	24	Bonne
13	69	9	1.5	1	1	1	12	Bonne
14	86	9	1.5	1	1	1	14	Bonne

Tableau III.21 : Les résultats de Q-system des différentes sections de **GRADIN 02**.

GRADIN N°02								
Section	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Qualité du massif
01	70	9	1.5	1	1	1	12	Bonne
04	61	9	1.5	1	1	1	10	Bonne
07	59	4	1.5	1	1	1	22	Bonne
10	36	9	1.5	1	1	1	6	Moyenne
11	46	4	1.5	1	1	1	17	Bonne
12	68	9	1.5	1	1	1	11	Bonne

B. Interprétation des résultats :

Tableau III.22 : Qualité de la masse rocheuse d'après le système de classification Q-system.

Roche	Qualité du massif
Calcaire	Bonne
Minerai de fer	Bonne
Marne jaune	Moyenne
Marne minéralisé	Bonne
Marne grise	Bonne
Conglomérat	Moyenne

D'après les résultats de la classification du massif rocheux de la mine de fer de BOUKHADRA par le Q-system,

On déduit que la qualité du minerai de fer, calcaire, marne grise et minéralisé est bonne, Sauf que la marne jaune et le conglomérat la qualité est moyenne.

III.8. Geological Strength Index (GSI)

L'estimation de la valeur de GSI se base sur le critère de Hoek et Brown qui s'appuie sur une observation directe de la structure du massif rocheux. [21]

Le GSI se détermine comme suit :

$$\text{GSI} = \text{RMR}'89 - 5 \text{ si } \text{RMR}'89 > 23 \quad (\text{III.8})$$

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

Le RMR'89 est calculé en retenant une valeur 15 pour le coefficient relatif à l'eau (A5) et une valeur nulle pour le coefficient de correction relatif à l'orientation des discontinuités (B).

Dans notre cas le RMR'89=RMR de base. [21]

Tableau III.23 : Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI. [30]

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

III.8.1. La classification du massif rocheux par le GSI

A. Présentation des résultats :

Tableau III.24 : Les résultats de GSI des différentes sections de **GRADIN 01**.

GRADIN N°01		
Section	GSI	Qualité de la roche
01	62	Bonne
05	54	Moyenne
08	48	Moyenne
12	25	Très mauvaise
14	66	Bonne

Tableau III.25: Les résultats de GSI des différentes sections de **GRADIN 02**.

GRADIN 02		
Section	GSI	Qualité de la roche
01	54	Moyenne
04	54	Moyenne
07	45	Moyenne
10	25	Très mauvaise
12	54	Moyenne

B. Interprétation des résultats :

Tableau III.26 : Qualité de la masse rocheuse d'après le système de classification Q-system.

Roche	Qualité de la roche
Calcaire	Bonne
Minerai de fer	Bonne
Marne jaune	Mauvaise
Marne grise	Moyenne
Marne minéralisé	Moyenne
Conglomérat	Très mauvaise

Suivant les résultats de GSI des différentes sections du GRADIN 01 et GRADIN 02 ; la qualité de la masse rocheuse est de bonne qualité pour le calcaire et le minerai de fer en suite elle est de moyenne qualité pour la marne grise et la marne minéralisé. Finalement la qualité est mauvaise pour la marne jaune et aussi très mauvaise pour le conglomérat.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué les systèmes de classification « RQD, RMR, SMR, Q, GSI », qui nous permet de retenir quelques remarques essentielles ;

- ✓ Les valeurs du RQD , montrent que la qualité de la masse rocheuse est bonne pour le minerai de fer, en suite moyenne pour le calcaire, la marne grise et la marne minéralisée, finalement une qualité pauvre pour la marne jaune et très pauvre pour le conglomérat.
- ✓ Pour la classification RMR, le Minerai de fer et le calcaire ont de bonnes qualités de classe II, une qualité moyenne pour la marne grise et la marne minéralisée de classe III, mais pour la marne jaune et le conglomérat la qualité est faible de classe IV.

- ✓ Pour la classification SMR, le Minerai de fer est de bonne qualité on peut dire que le massif est stable, pour le calcaire et la marne grise et la marne minéralisée la qualité est normale alors le massif est partiellement stable. Par contre pour la marne jaune la note signifie que le massif est de mauvaise qualité et instable, et de très mauvaises qualités pour le conglomérat c'est-à-dire le massif est complètement instable.

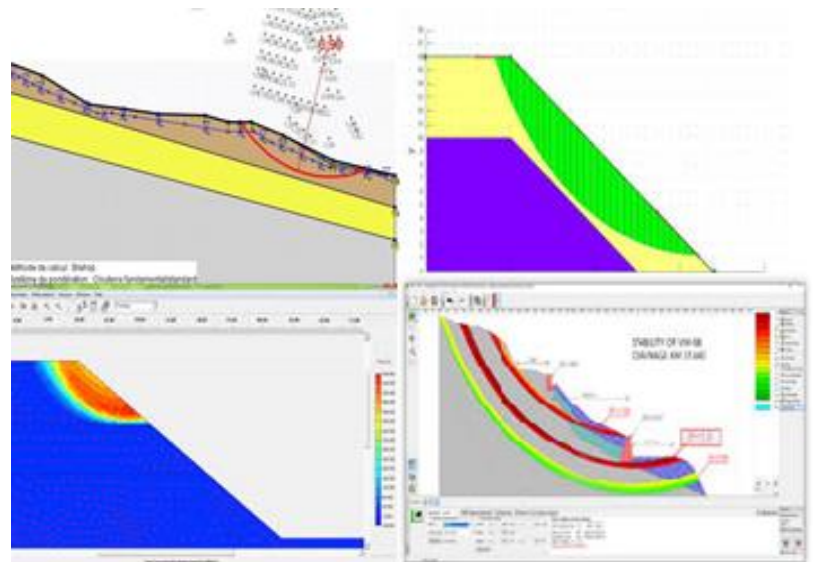
- ✓ Pour Le Q- système, on conclut que le minerai de fer, le calcaire, les marnes grises et minéralisées ont une bonne qualité, sauf que la marne jaune et le conglomérat sont de moyenne qualité.

- ✓ Suivant les résultats de la classification GSI; la qualité de la masse rocheuse est de bonne qualité pour le calcaire et le minerai de fer, en suit elle est de moyenne qualité pour la marne grise et la marne minéralisée. Mais pour la marne jaune, le conglomérat la qualité est de mauvais a très mauvais.

L'application des différentes méthodes de classification des massifs rocheux indique que les zones formées par des marnes et des conglomérats sont très instables et nécessite une étude détaillée de stabilité qui sera réalisée dans le chapitre suivant.

Chapitre IV:

*Calcul de la
stabilité et
modélisation
numérique*



IV.1. Introduction

Les logiciels informatiques jouent un rôle très important dans le domaine géotechnique, qu'ils sont développés pour faciliter la prise en compte de tous les paramètres physiques et mécaniques et géométriques et conduisent à des solutions générales plus réalistes de la stabilité des pentes.

Dans ce chapitre nous allons utiliser trois logiciels « GEOSLOPE, Roc-Science (Slide) », qui nous permet d'utiliser la méthode d'équilibre limite (Morgenstern- Price, Fellenius et Bishop) et la méthode des éléments finis (Calcul à la rupture) à l'aide PLAXIS 2 D V8.2.

IV.2. Méthode de calcul de la stabilité des talus

IV.2.1. Définition du coefficient de sécurité

Le calcul de la stabilité des talus est généralement estimé à l'aide d'un coefficient appelé : coefficient de sécurité F_s . Ce coefficient est défini comme étant le rapport du moment par rapport à un point fixe de la résultante des forces résistantes au glissement aux forces provoquant le glissement. [39]

$$F_s = \frac{\Sigma \text{Moment des forces résistant au mouvement}}{\Sigma \text{Moment des forces provoquant le mouvement}} \quad (\text{IV.1})$$

Tableau IV.1 : Équilibre des talus en fonction des valeurs expérimentales du coefficient de sécurité. [39]

Coefficient de sécurité	
$F_s < 1$	Talus instable
$1 < F_s < 1,5$	Glissement possible
$F_s > 1,5$	Généralement stable

IV.2.2. Méthodes de calcul de la stabilité

Les principales méthodes de calcul de la stabilité des talus sont :

- Les méthodes basées sur l'équilibre limite :
 - ✓ Méthode globale.
 - ✓ Méthode des tranches.

- Les méthodes des éléments finis.
- Les méthodes des abaques. [39]

IV.2.2.1. Méthodes basées sur l'équilibre limite

IV.2.2.1.1. Méthode des tranches

Cette méthode consiste à considérer les forces qui tendent à retenir un certain volume de terrain, délimité par les forces libres du talus et une surface de rupture potentielle, et celles qui tendent à la mettre en mouvement.

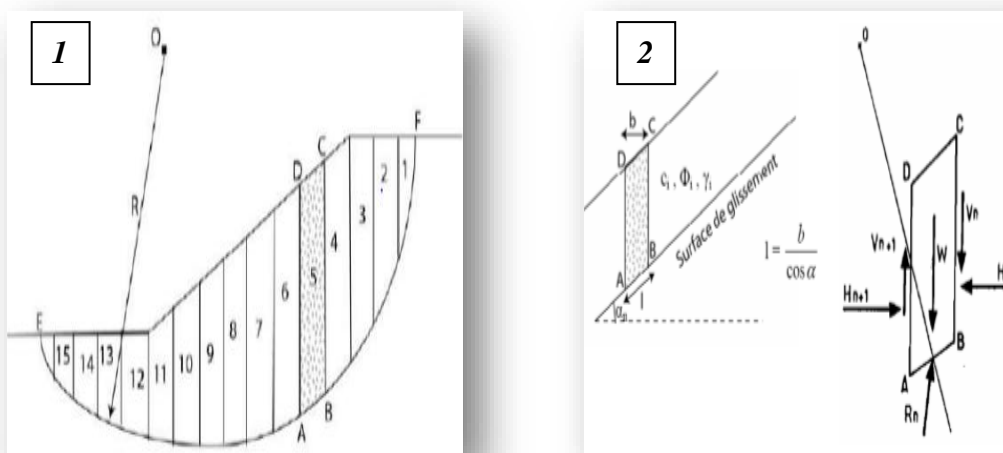


Figure IV.1 : 1,2 Découpage en tranches d'un talus. [39]

Soit un cercle quelconque de centre O et de rayon R pour lequel on vérifie la sécurité vis-à-vis du risque de glissement. La méthode des tranches consiste à découper le volume de sol (compris dans l'arc EF) en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux. En l'absence d'eau, une tranche (n) est soumise à :

- ✚ Son poids $W = \gamma_n \cdot h_n \cdot b_n$;
- ✚ Les efforts inter-tranches décomposées en efforts horizontaux H_n et H_{n+1} et en efforts Verticaux V_n et V_{n+1} ;
- ✚ La réaction R_n du milieu sous-jacent sur l'arc AB (résistance de cisaillement). Elle se décompose en une composante normale et tangentielle. [39]

A. La méthode de FELLENIUS (1936)

On considère que :

- ✚ La ligne de glissement est de forme circulaire ;
- ✚ On néglige totalement les efforts inter tranchés ;
- ✚ La seule force agissante sur l'arc AB est le poids W.

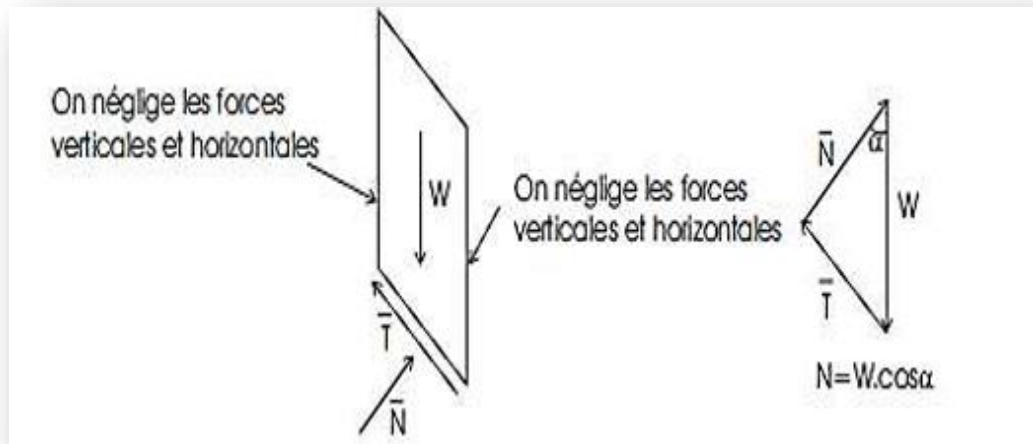


Figure IV.2 : Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Fellenius. [39]

L'expression du facteur de sécurité :

$$F_s = \frac{\sum [C_i - \frac{bn}{\cos \alpha_n} + W_n \cos \alpha_n \tan \phi_i]}{\sum W_n \sin \alpha_n} \quad (IV.2)$$

Ou :

- ✚ **b**: la largeur des tranches.
- ✚ **α** : l'angle orienté que fait le rayon du cercle passant par le milieu de la base de la tranche avec la verticale.
- ✚ La hauteur de la tranche pour le calcul du poids W. [39]

B. Méthode de BISHOP simplifiée (1954)

- ✚ La ligne de glissement est toujours de forme circulaire.
- ✚ Les efforts verticaux inter-tranches sont nuls ($V_n - V_{n+1} = 0$).

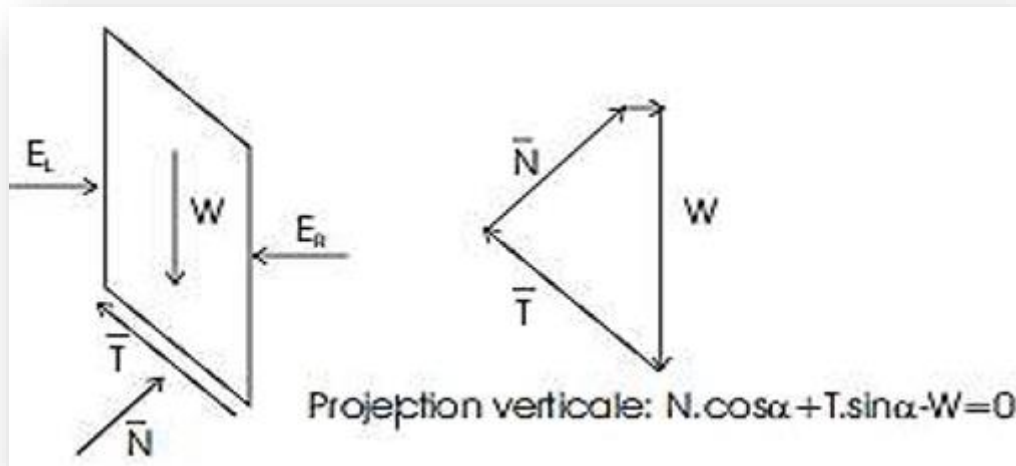


Figure IV.3 : Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Bishop simplifiée.

[30]

Le facteur de sécurité est donné par la formule suivante : [39]

$$F_s = \frac{\sum(C_i b_i + W_n \tan \phi_i)}{m \alpha \sum W_n \sin \alpha_n} \quad (\text{IV.3})$$

IV.3. Programme GEO-STUDIO [2014]

GEO-SLOPE est un programme de calcul de stabilité des pentes qui permet de modéliser des problèmes de géotechnique comme les glissements de terrain, les tassements, la consolidation, les infiltrations des eaux dans le corps de la digue d'un barrage ...

Ce programme permet d'utiliser la méthode des tranches pour déterminer le facteur de sécurité des massifs en pente constitués d'une ou de plusieurs couches de sol, avec ou sans présence de nappe, avec ou sans sollicitations sismiques, avec ou sans succion, etc. Dans son architecture globale, ce programme est composé de huit modules ou sous codes distincts. Voici une brève de ces différents modules :

- ✚ **SLOPE/W** : Permet de calculer le coefficient de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyse classiques et aussi par la méthode des éléments finis, mais à l'aide de la modélisation obtenue par le programme SIGMA/W.
- ✚ **SEEP/W** : Permet de calculer les infiltrations des eaux (par la méthode des éléments finis).
- ✚ **QUAKE/W** : Modélisation par éléments finis du comportement du sol sous séisme.
- ✚ **SIGMA/W** : Permet d'analyser les problèmes de la relation contrainte / déformation (par la méthode des éléments finis).

- ✚ **TEMP/W** : Permet d'analyser les problèmes géothermiques du sol (par la méthode des éléments finis)...et autres logiciels.
- ✚ **CTRW/W** : Modélisation du mouvement d'une contamination dans des matériaux poreux.
- ✚ **AIR/W** : Analyse des interactions entre l'eau et l'air du sol dans des matériaux poreux.
- ✚ **VADOSE/W** : Analyse de flux en dessous de la surface du sol, dans la vadose non saturée et qui rejoignent le régime de l'eau dans le sol. [40]

Dans notre travail, on a utilisé le module **SLOPE/W**, qui est basé sur la théorie de l'équilibre limite dans les calculs du coefficient de sécurité des pentes. Et permet de :

- ✓ Décrire la géométrie du problème ;
- ✓ La stratigraphie du site ;
- ✓ Les paramètres de résistances des sols ;
- ✓ Modéliser la saturation ou la non-saturation du sol. [40]

IV.3.1. La géométrie et les paramètres géotechniques des modèles

✓ La géométrie :

La géométrie des trois modèles générés est représentée dans le tableau suivant :

Tableau IV. 2: Les valeurs géométriques des modèles réalisés.

La géométrie des modèles			
Le gradin	La hauteur	La largeur	L'angle d'inclinaison des gradins
Marne jaune	45	99	80
Conglomérat	45	99	80
Marne jaune +mélange	45	99	80

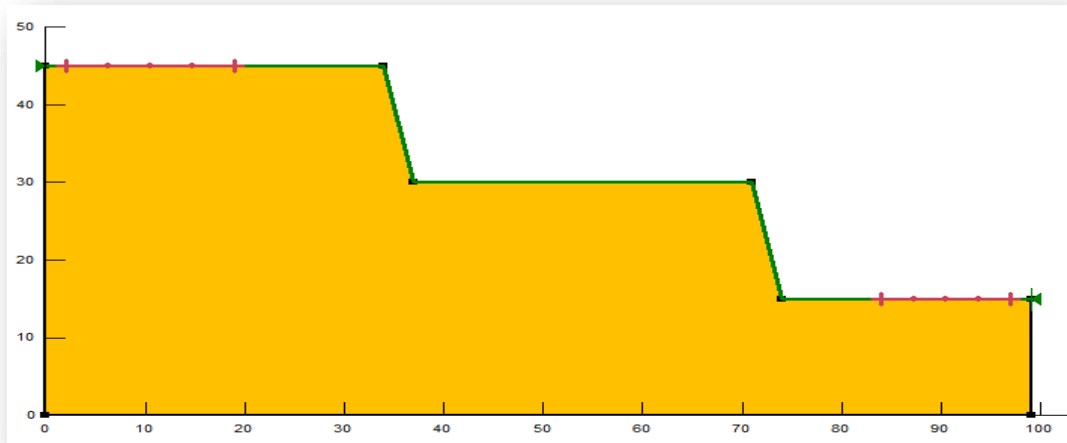


Figure IV.4 : Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune.

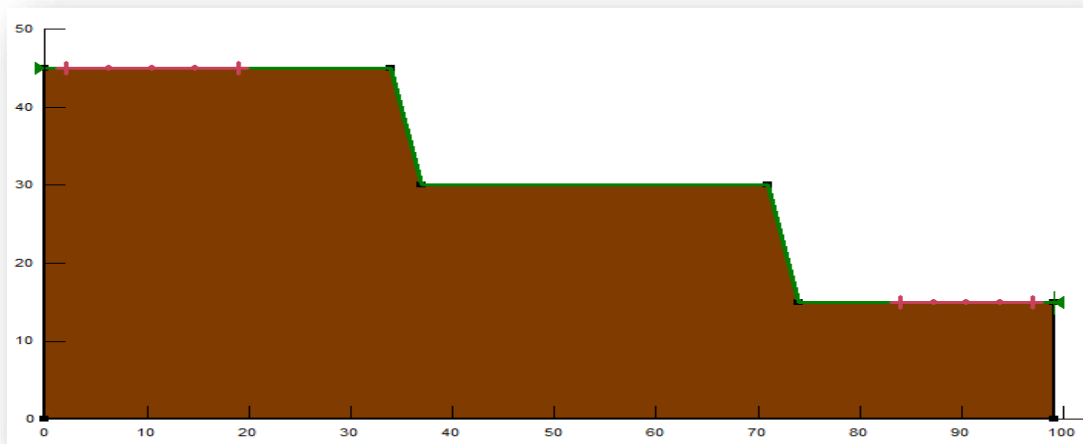


Figure IV.5 : Le modèle géométrique de la rampe du béton.

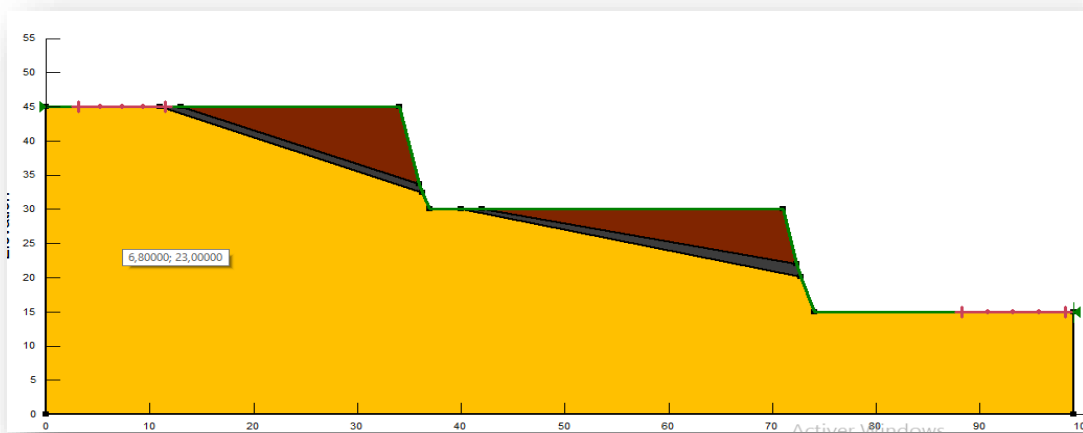


Figure IV.6 : Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune+mélange.

✓ Les paramètres géotechniques

Tableau IV.3 : Les différents paramètres géotechniques introduits dans SLOPE/W pour la modélisation.

Nature de la roche	γ [KN/m ³]	C [KN/m ²]	ϕ [°]
Marne jaune	22	33	23
Minerai de fer	27	260	40
Conglomérat	24	125	28

IV.3.2. Calcul par Geoslope

Le calcul du coefficient de sécurité effectué par les variantes précédentes (Fellnius, Bishop, Jambu, etc.) et la localisation des cercles de ruptures, en état sec et saturé est schématisé sur les figures suivantes :

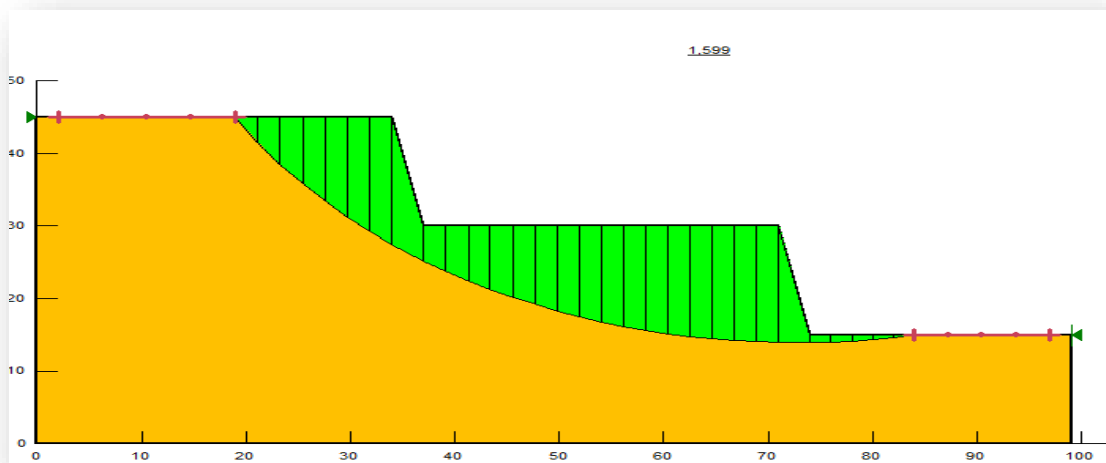


Figure IV.7 : La valeur du coefficient de sécurité pour la marne jaune à l'état sec.

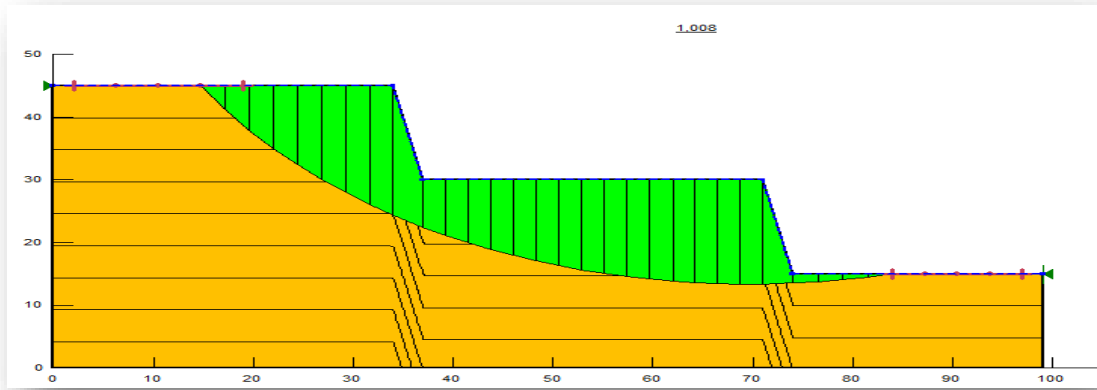


Figure IV.8 : La valeur du coefficient de sécurité pour la marne jaune à l'état saturé.

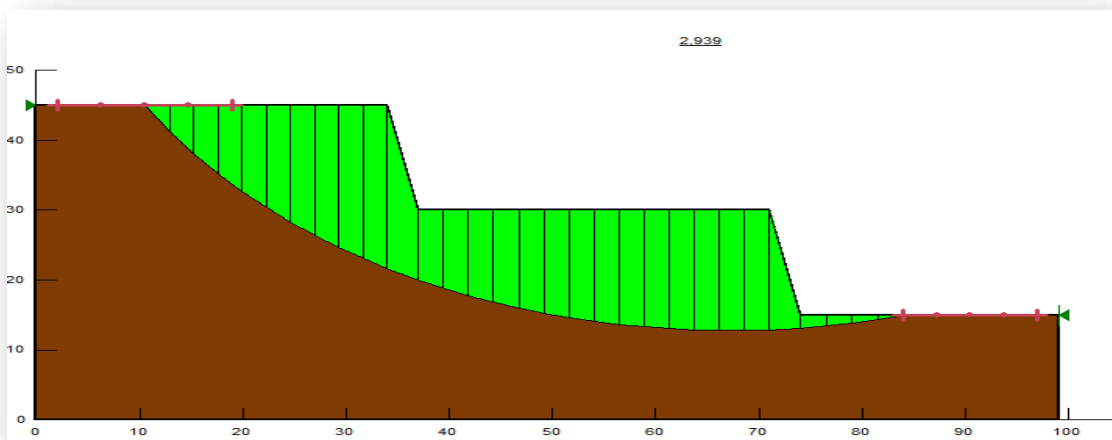


Figure IV.9: La valeur du coefficient de sécurité pour le conglomerat à l'état sec.

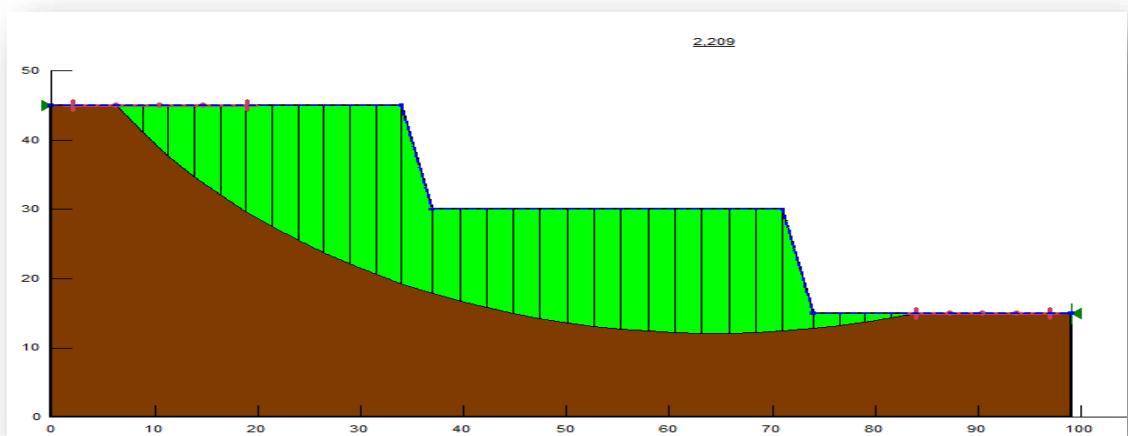


Figure IV.10 : La valeur du coefficient de sécurité pour la marne jaune à l'état saturé.

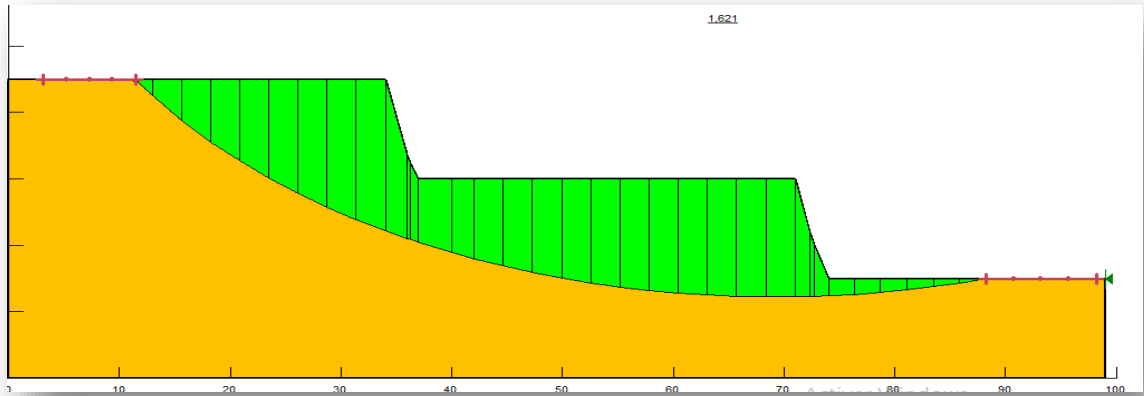


Figure IV.11 : La valeur du coefficient de sécurité pour la marne jaune + mélange à l'état sec.

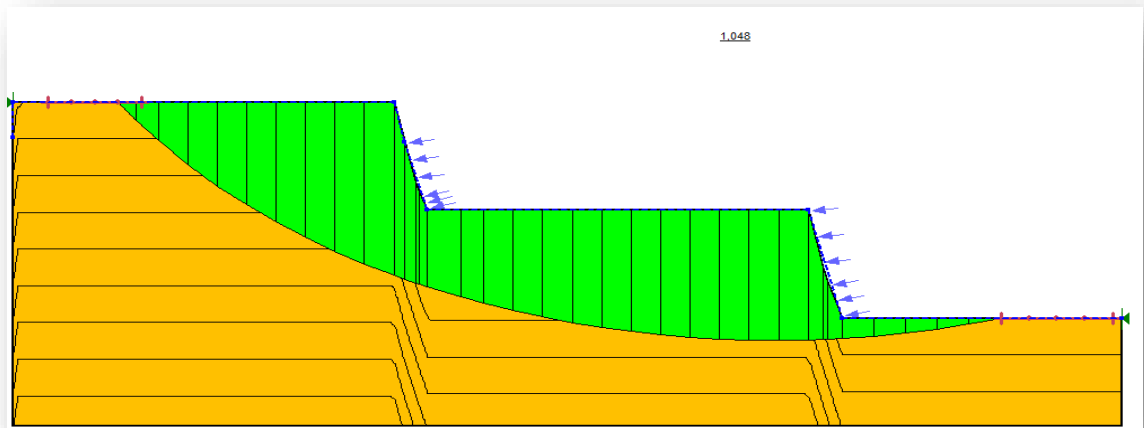


Figure IV.12 : La valeur du coefficient de sécurité pour la marne jaune + mélange à l'état saturé.

Tableau IV.4 : Les résultats de coefficient de sécurité.

Gradin	Fs à l'état sec	Fs à l'état saturé
Marne jaune	1.599	1.008
Conglomérat	2.939	2.209
Marne jaune+mélange.	1.621	1.048

IV.3.3 Interprétation des résultats

- **À l'état sec :** Les valeurs du coefficient de sécurité montrent que la zone d'étude est stable à court terme et $F_s \geq 1.2$ pour la plupart des profils que ce soit pour un gradin ou pour la rampe.
- **À l'état saturé :** Les valeurs du coefficient de sécurité en présence d'eau pour le faciès marneux et le mélange (marne jaune+passage de fer+conglomérat) indiquent que la zone est instable et $F_s \leq 1.2$. Par contre pour le profile de conglomérat le $F_s \geq 1.2$.
- En générale les calcules réalisées selon les différentes conditions pour la plupart des profiles indiquent que les gradins sont stable à l'état sec et instable à l'état saturé.

IV.4. Programme PLAXIS [2 D V8.02]

Le plan général du programme PLAXIS est présenté dans l'organigramme de la (Figure IV.4). L'interface du programme PLAXIS utilise principalement quatre Sous-programmes ;

- ✓ PLAXIS-Input,
- ✓ PLAXIS- Calculations,
- ✓ PLAXIS-Output,
- ✓ PLAXIS-Curves.

PLAXIS-Input: Facilite la création et modification des modèles géométriques, à l'engendrement des maillages des éléments finis et à la définition des conditions initiales.

PLAXIS-Calculations: Facilite la définition des phases et au commencement de la procédure de calcul des éléments finis.

PLAXIS-Output: Facilite la visualisation des résultats de la phase de calculs, comme les déplacements au niveau des nœuds, les contraintes les forces au des éléments structuraux, etc.

PLAXIS-Curves: Sers à la construction des courbes de chargement – déplacement, des chemins de contraintes, en plus de divers autres diagrammes. [40]

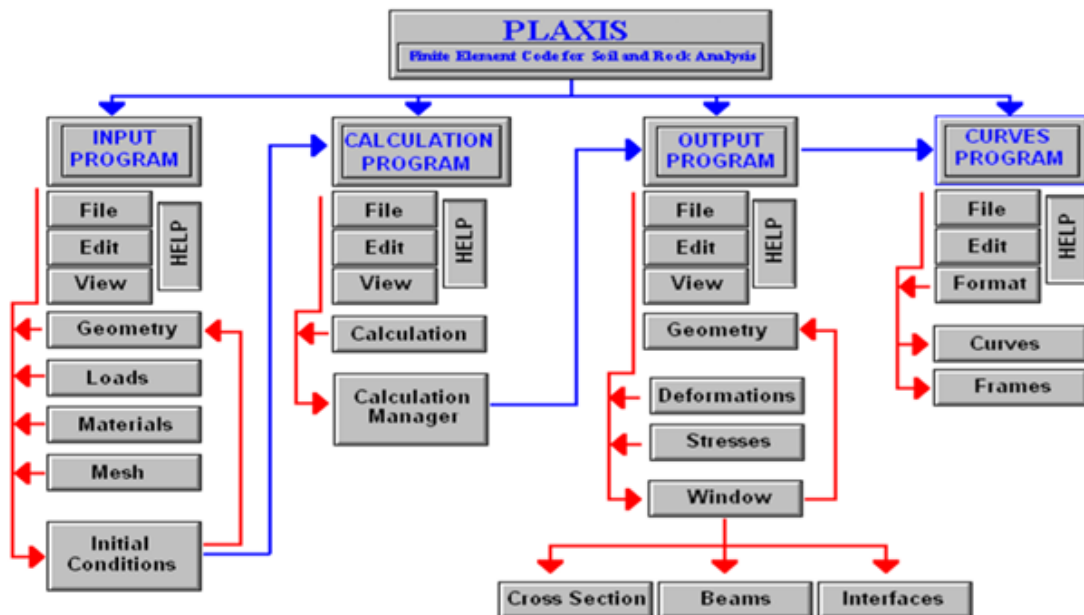


Figure IV.13 : Organigramme du code Plaxis. [41]

IV.4.1. Les modèles incorporés dans le PLAXIS

Le PLAXIS code version 8.2 utilisée dans la présente investigation contient les modèles constitutifs des sols suivants :

IV.4.1.1. Le modèle élastique linéaire (EL)

Le comportement mécanique des sols peut être modélisé à différents niveaux d'exactitude. La loi de Hook, par exemple est la plus simple relation contrainte-déformations disponible. Cette loi considère le matériau comme étant linéaire, isotropique et élastique. Le comportement est caractérisé par le module de Young, E , et le coefficient de Poisson (ν). Cette loi est trop simple pour modéliser le comportement réel des sols. [41]

IV.4.1.2. Le modèle de Mohr -Coulomb (MCM)

Le modèle de Mohr -Coulomb, ou modèle élasto-plastique est un modèle constitutif de sol qui inclus cinq paramètres caractéristiques du sol, i.e. le module de Young, E , le coefficient de Poisson, ν sont représentatifs de l'élasticité du sol, l'angle de frottement interne ϕ et la cohésion, c , sont représentatifs de la plasticité du sol, ψ est un paramètre qui représente la dilatance du sol. Le modèle de Mohr - Coulomb est considéré comme un modèle de première approximation du comportement du sol, et recommandé pour les analyses primaires des problèmes géotechniques. [41]

Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma n \tan\phi + c \quad (\text{IV.4})$$

Où (σn) et (τ) sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et (c) et (ϕ) respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau. [41]

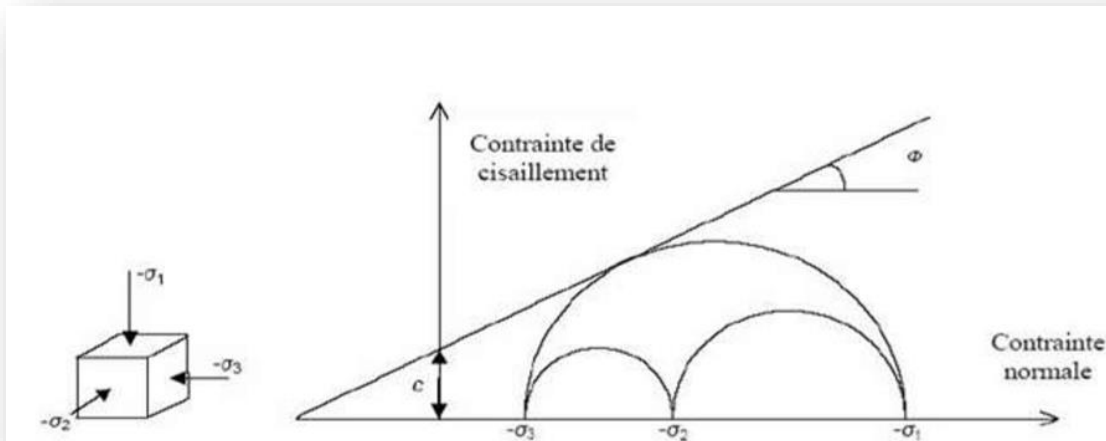


Figure IV.14 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr- Coulomb. [41]

IV.4.1.3. Modèle de durcissement par écouissage isotropique « Hardening-Soil model » (HSM)

Le modèle de durcissement par écouissage isotropique ou ‘Hardening-soil model’ est un modèle beaucoup plus développé que le modèle de Mohr –Coulomb, les états limites de contraintes sont présentés par l’angle de frottement, la cohésion, c’est l’angle de dilatance, ψ .

La rigidité du sol est quantifiée plus précisément par l’utilisation de trois différents paramètres de rigidité :

- ✓ La rigidité de chargement triaxiale E_{50} ,
- ✓ La rigidité de déchargement triaxiale E_{ur} ,
- ✓ La rigidité de chargement œdométrique E_{oed} .

Par rapport au modèle de Mohr–Coulomb, le HSM prend en considération la dépendance aux contraintes, du module de rigidité, ce qui signifie que les rigidités augmentent avec la pression. [41]

✚ Paramètres du HSM :

Les paramètres du HSM sont les suivantes:

C : cohésion (effective) [kN/m²].

Φ : angle de frottement interne effectif [°].

Ψ : angle de dilatance [°].

✚ Paramètres de rigidité:

E_{50ref}: module sécant dans un essai triaxial [kN/m²].

E_{oedref}: module tangent dans un essai œdométrique [kN/m²].

m : Puissance (environ 0,58 pour les sables).

- ✓ Janbu (1963) rapporte des valeurs de m autour de 0.5 pour les sables et les silts norvégiens.
 - ✓ Von Soos (1980) rapporte de diverses différentes valeurs dans la gamme.
- [41]

$$0,5 < m < 1,0$$

IV.4.1.4. Modèle des sols doux ou « Soft–Soil-Creep model » (SSCM)

Le modèle SSCM, est convenable pour tous les sols, mais ne prends pas en considération l'effet de la viscosité, c'est-à-dire le fluage et la relaxation des contraintes. En réalité, tous les sols exhibent un certain fluage et une compression initiale est souvent suivie par une certaine quantité de compression secondaire. Cette compression est plus dominante dans les sols doux, les argiles normalement consolidées, les vases et les tourbes.

Quelques caractéristiques de base du SSC modèle sont : rigidité dépendante des contraintes, distinction entre la compression de chargement et déchargement – rechargement, compression secondaire dépendante du temps, contrainte de préconsolidation, rupture selon le critère de Mohr – Coulomb. [41]

IV.4.2. Le modèle numérique du calcul de glissement par PLAXIS**IV.4.2.1. Définition des données**

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

IV.4.2.2. La géométrie des modèles

On a respecté les mêmes paramètres géométriques des profiles motionner dans le tableau (IV.2) qui sont utilisé dans le programme Geoslope.

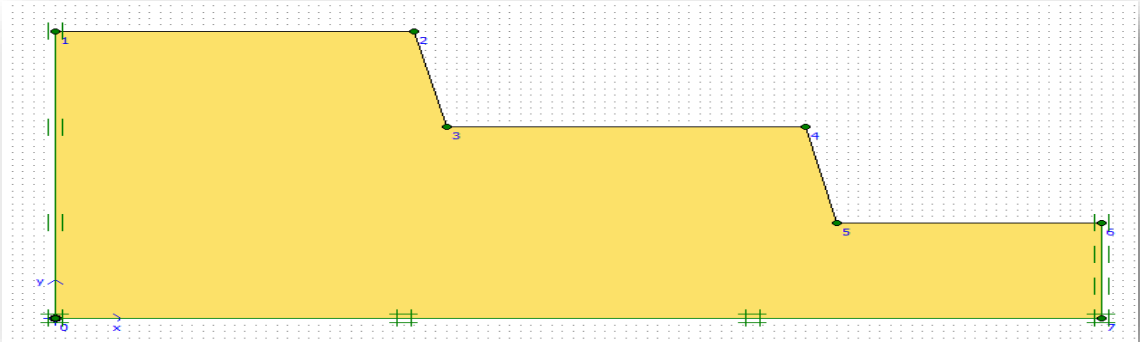


Figure IV.15 : Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune.

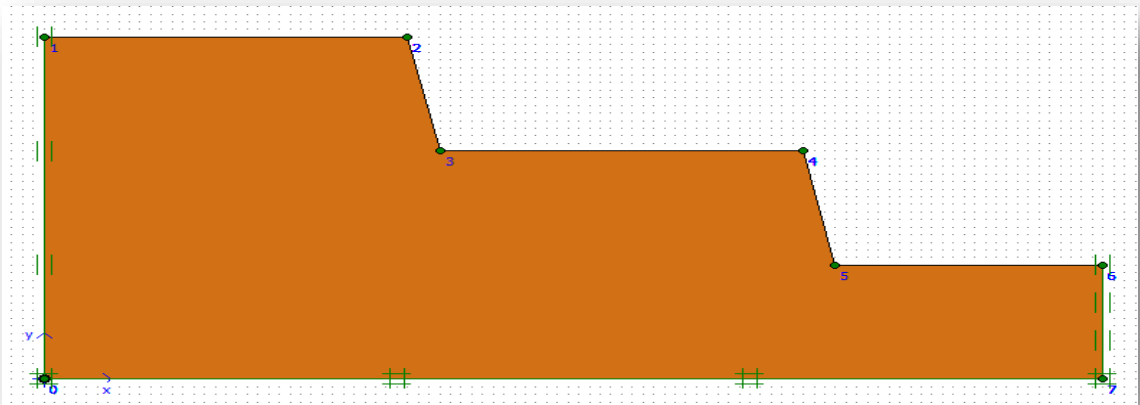


Figure IV.16 : Le modèle géométrique de la rampe du conglomérat.

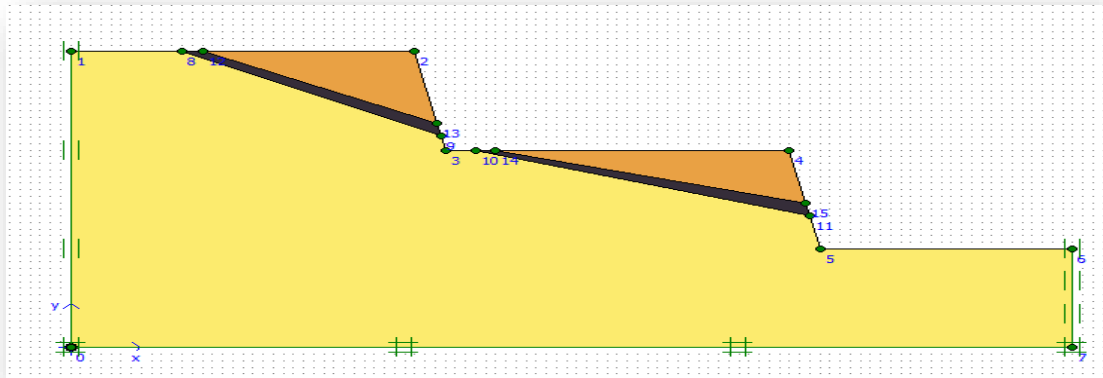


Figure IV.17 : Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune+mélange.

IV.4.2.3. Les conditions aux limites

Les conditions aux limites choisies par défaut (on bloque les déplacements horizontaux dans les côtes du système et on laisse les déplacements verticaux libres; tandis le déplacement de la base sont entièrement bloqué (voir figure précédente).

IV.4.2.4. Caractéristiques des matériaux

La carrière est formée par quatre formations (Marne, Fer, calcaire, conglomérat) composent la géologie du site, à cause de l'arrangement de ces couches (subvertical), et à partir des résultats de classification des massifs rocheux on a choisir les profiles les plus critique formée par la marne jaune, le conglomérat avec passage de fer, qui sont de mauvaise qualité ou il y a risque de glissement.

Les propriétés de la Marne jaune, le minerai de fer et le conglomérat sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.5 : Les différentes caractéristiques de la Marne jaune, minerai de fer et conglomérat.

Nature de la roche	Type	γ_{sat} [kN/m ³]	γ_{unsat} [kN/m ³]	K_x [m/day]	K_y [m/day]	ν	E_{ref} [kN/m ²]	C_{ref} [kN/m ²]	Φ [°]
Marne jaune	Non drainé	22	21	10^{-6}	10^{-6}	0.33	6.19×10^6	33	23
Minerai de fer	Non drainé	27	26	10^{-8}	10^{-8}	0.25	4.47×10^6	260	40
Conglomérat	Non drainé	24	23	10^{-6}	10^{-6}	0.29	2.37×10^6	125	28

IV.4.2.5. Générations du Maillage

L'étape consiste à discrétiser la géométrie de la pente en élément fini. Le modèle de référence se fait part des éléments à 6 nœuds. Le nombre d'éléments est de (670) éléments et le nombre des nœuds est de (5529) nœuds, le maillage est (Refine globale).

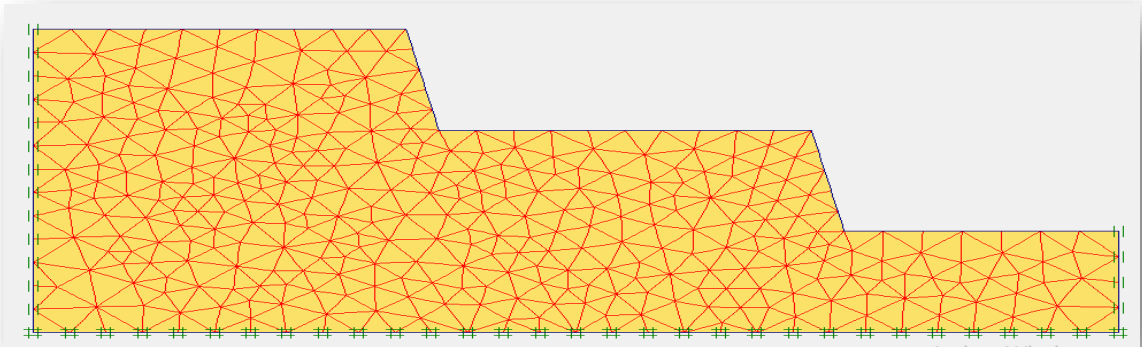


Figure IV.18 : Le maillage de la rampe de la marne jaune.

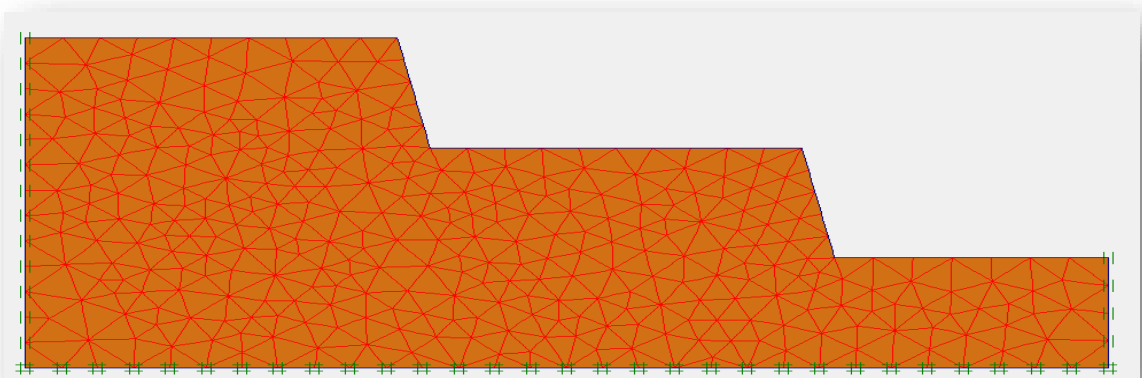


Figure IV.19 : Le maillage de la rampe du béton.

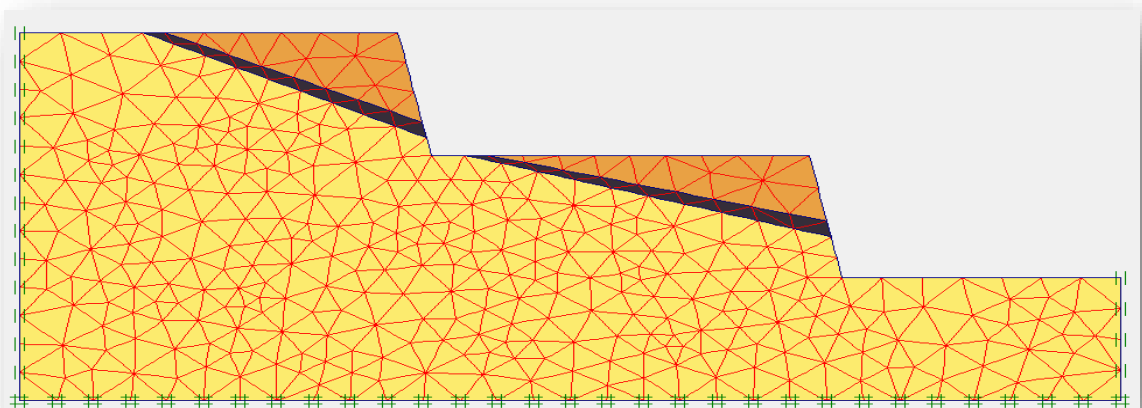


Figure IV.20 : Le maillage de la rampe de la marne jaune+mélange.

IV.4.2.6. Conditions initiales

Les conditions initiales nécessitent la génération des pressions interstitielles initiales ainsi que des contraintes initiales.

a) Conditions hydrauliques :

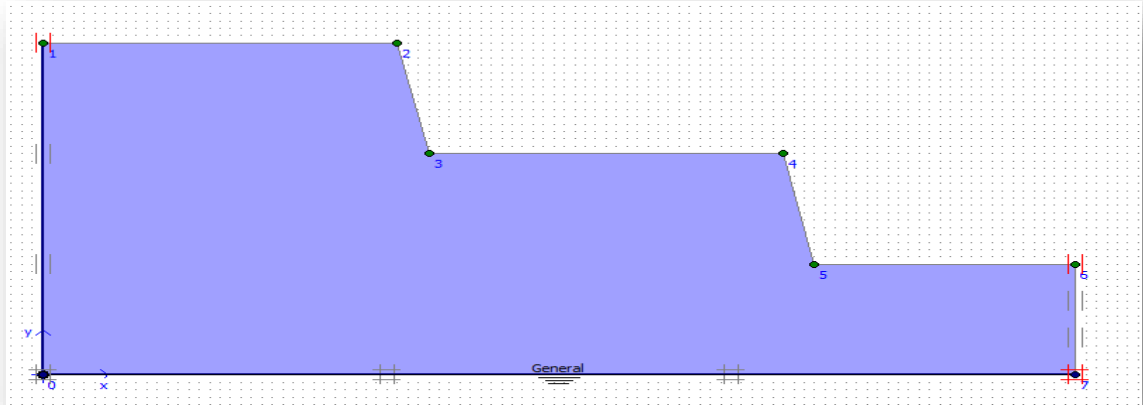


Figure IV.21 : Les conditions hydrauliques des différentes rampes.

b) Contraintes initiales

Pour le calcul des contraintes initiales, on génère alors les contraintes initiales en prenant les valeurs de K_0 par défaut. La valeur de K_0 est proposée automatiquement d'après la formule de Jacky. On garde le poids du sol à 1, ce qui correspond à une application totale de la gravité.

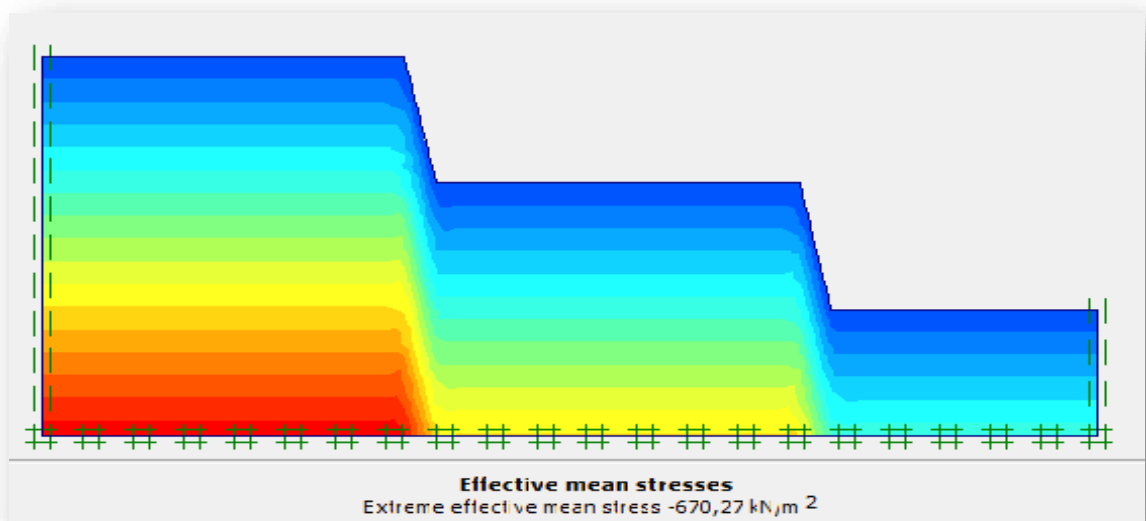


Figure IV.22 : La distribution des Contraintes totales (Marne jaune).

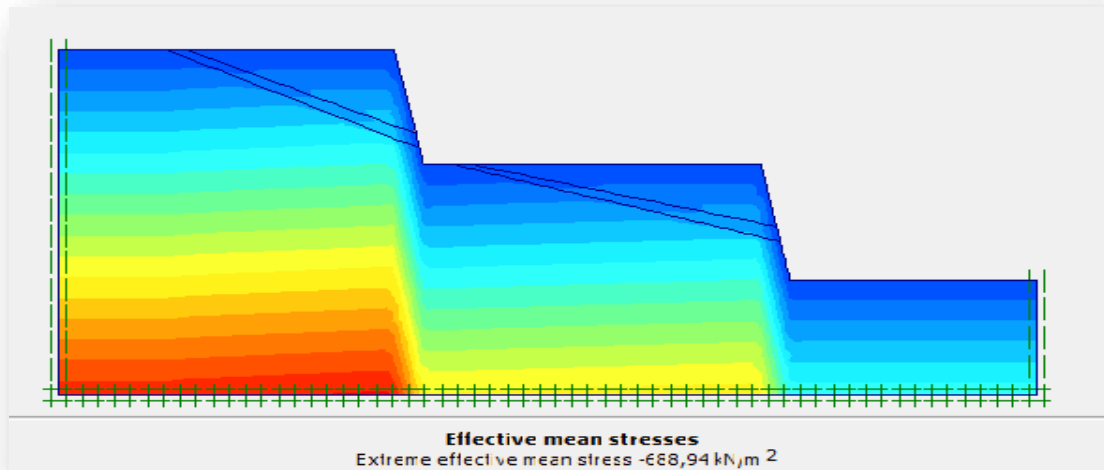


Figure IV.23 : La distribution des Contraintes totales (Marne jaune+mélange).

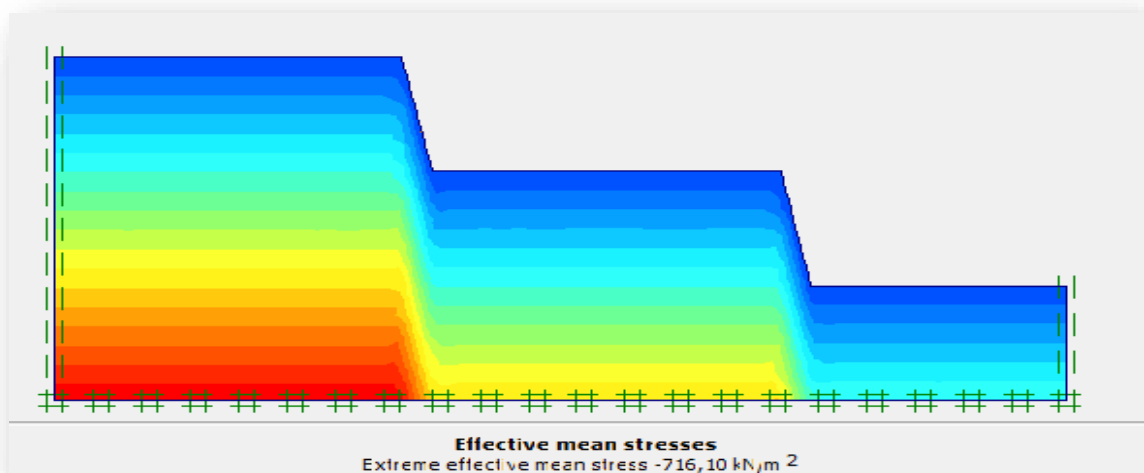


Figure IV.24: La distribution des Contraintes totales (Conglomérat).

IV.4.2.7. Procédure des calculs

Le calcul du modèle de référence se fait défini en une seule phase comme suite :

- ✚ **Phase 1** : calcul de glissement (c/Φ réduction).

La procédure de calcul est présentée dans la figure ci-dessous :

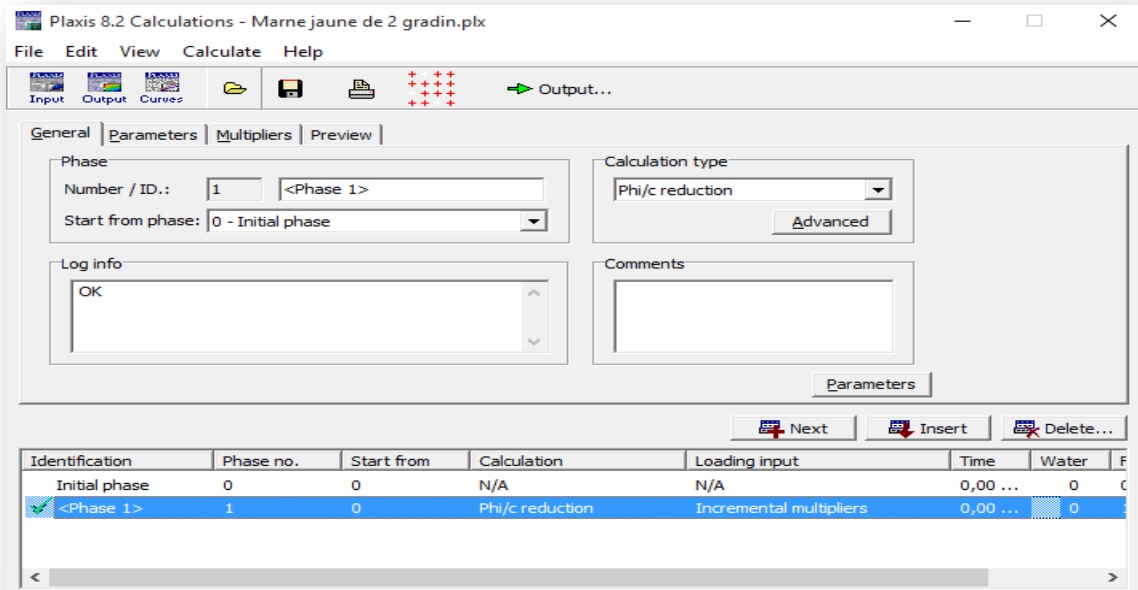


Figure IV.25 : Les procédures de calculs.

IV.4.2.8. Les résultats de la modélisation

Il y'a deux types de déformation : déformation de forme et déformation interne telle que :

- ✓ Déformation de maillage.
- ✓ Déformation des couches de sol : le coefficient de sécurité.

➤ La déformation de maillage et des éléments :

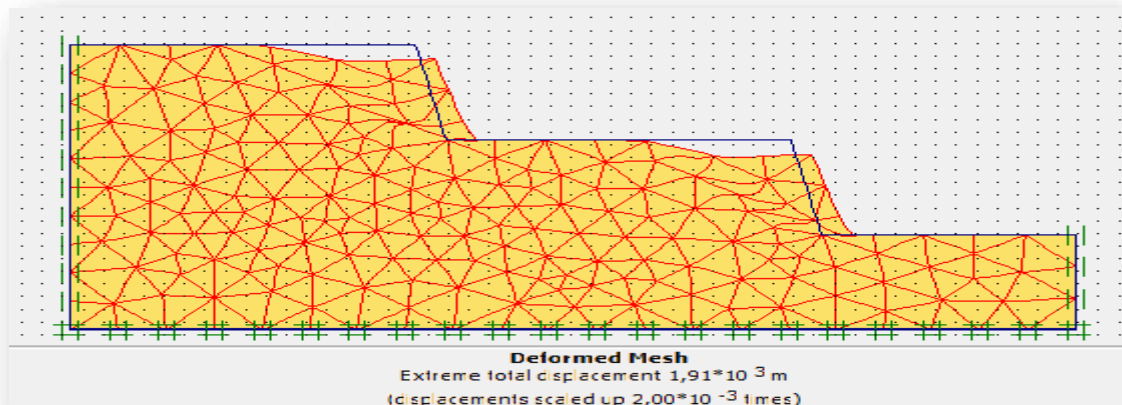


Figure IV.26 : La déformation de maillage (Marne jaune).

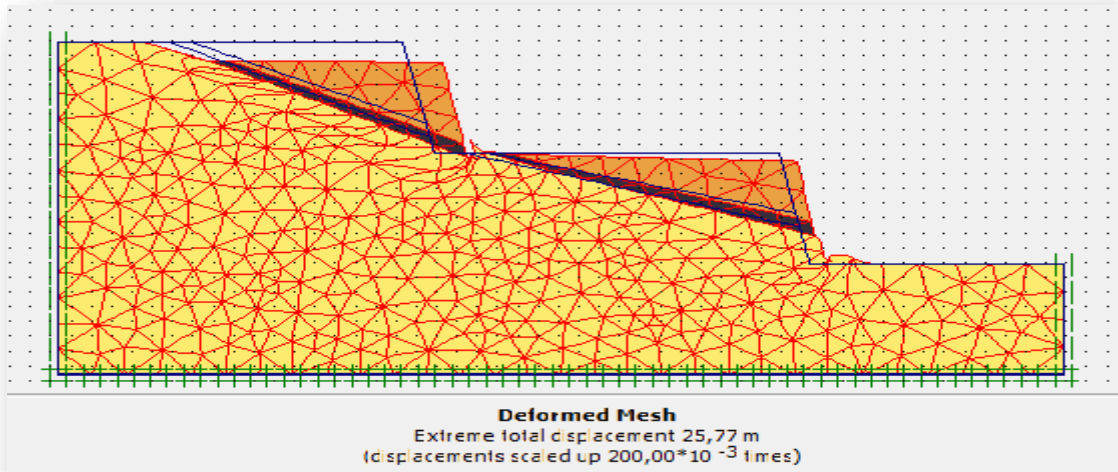


Figure IV.27 : La déformation de maillage (Marne jaune + mélange).

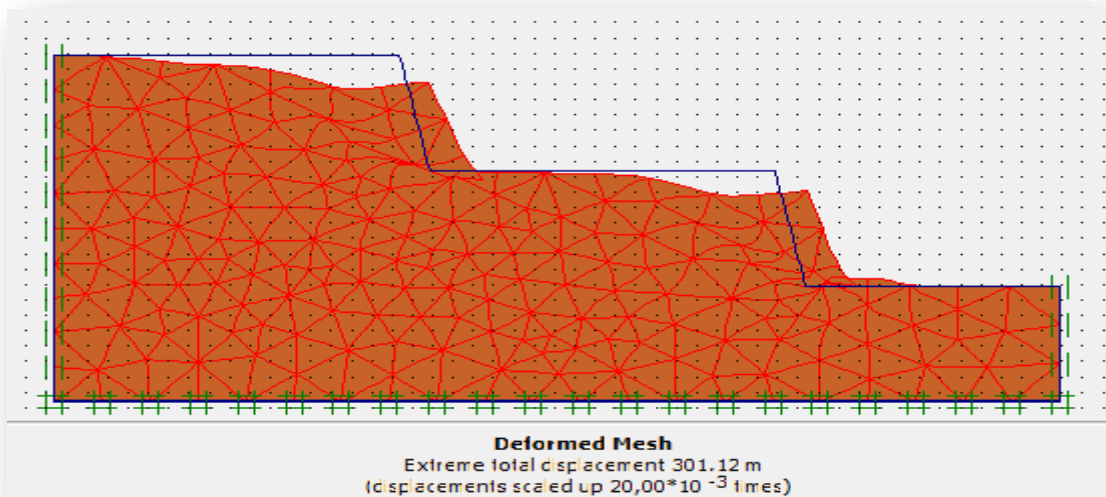


Figure IV.28 : La déformation de maillage (Conglomérat).

➤ **Les déformations de cisaillement :**

Les résultats des déformations trouvées et l'allure des cercles de glissements indiquent que le gradin est instable pour une hauteur de 45 m ;

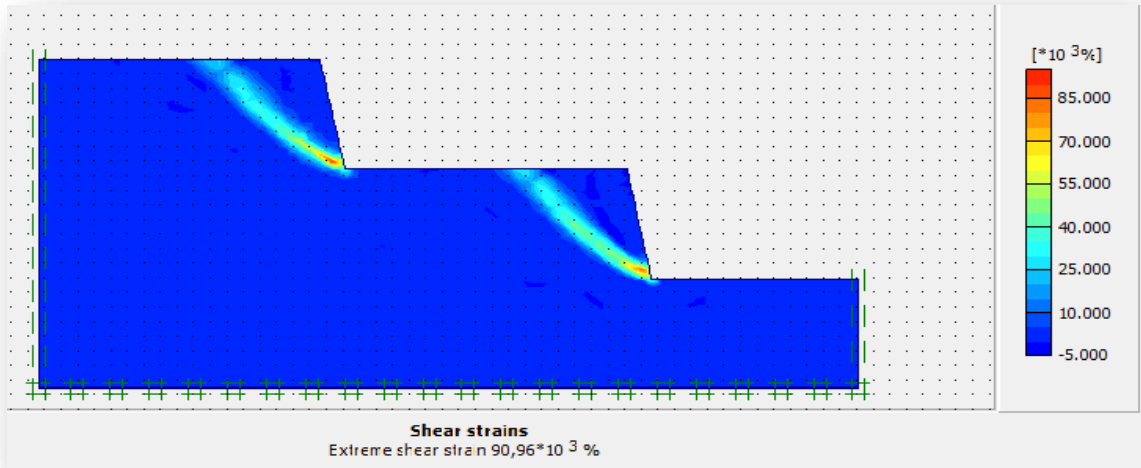


Figure IV.29 : La déformation de cisaillement (Marne jaune).

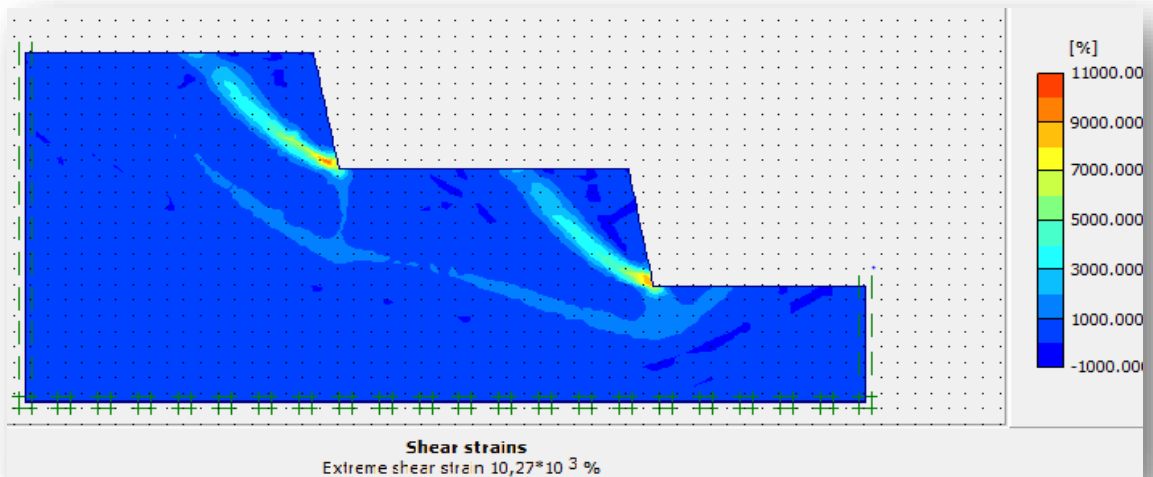


Figure IV.30 : La déformation de cisaillement (Conglomérat).

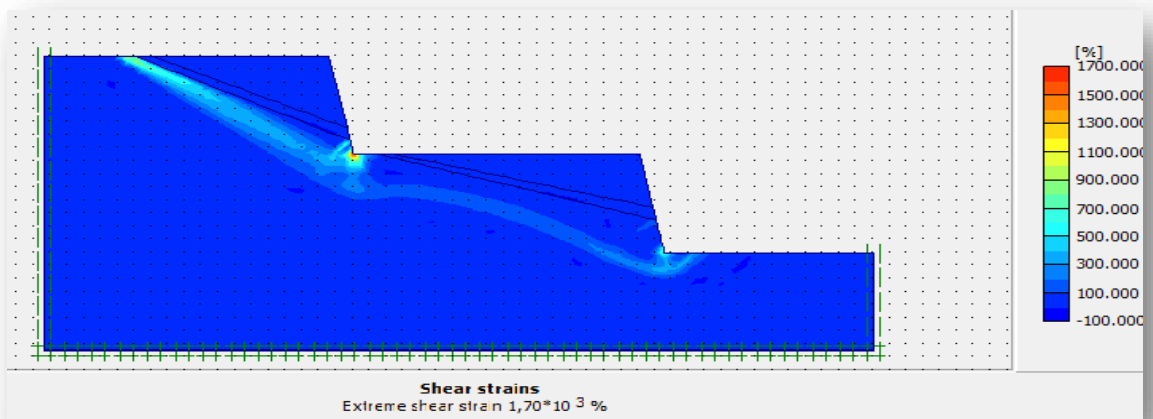


Figure IV.31 : La déformation de cisaillement (Marne jaune + mélange).

➤ La valeur de coefficient de sécurité FS :

Les valeurs du coefficient de sécurité sont représentées sur les figures suivantes :

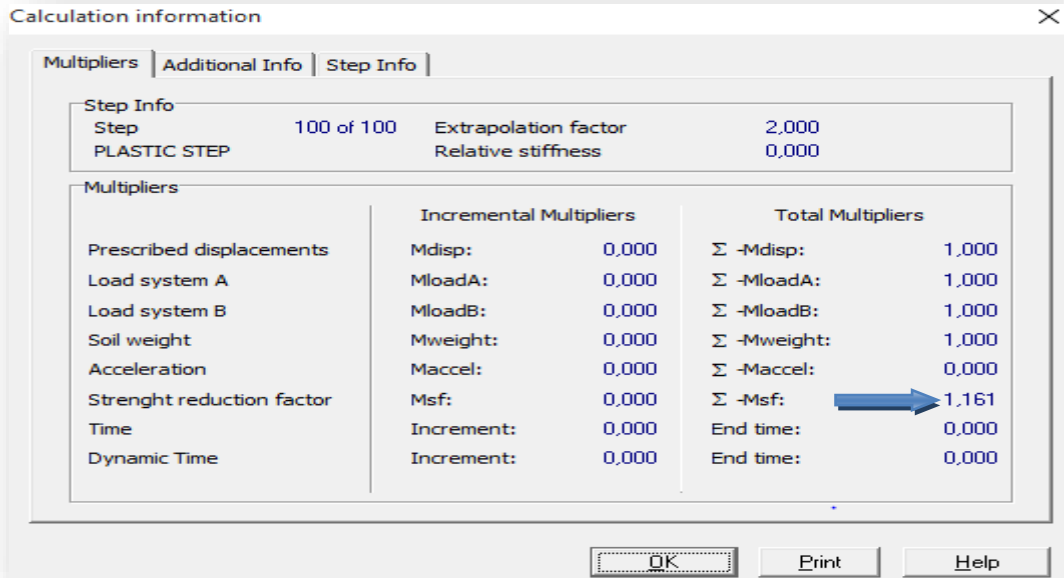


Figure IV.32 : La valeur du coefficient de sécurité (Marne jaune).

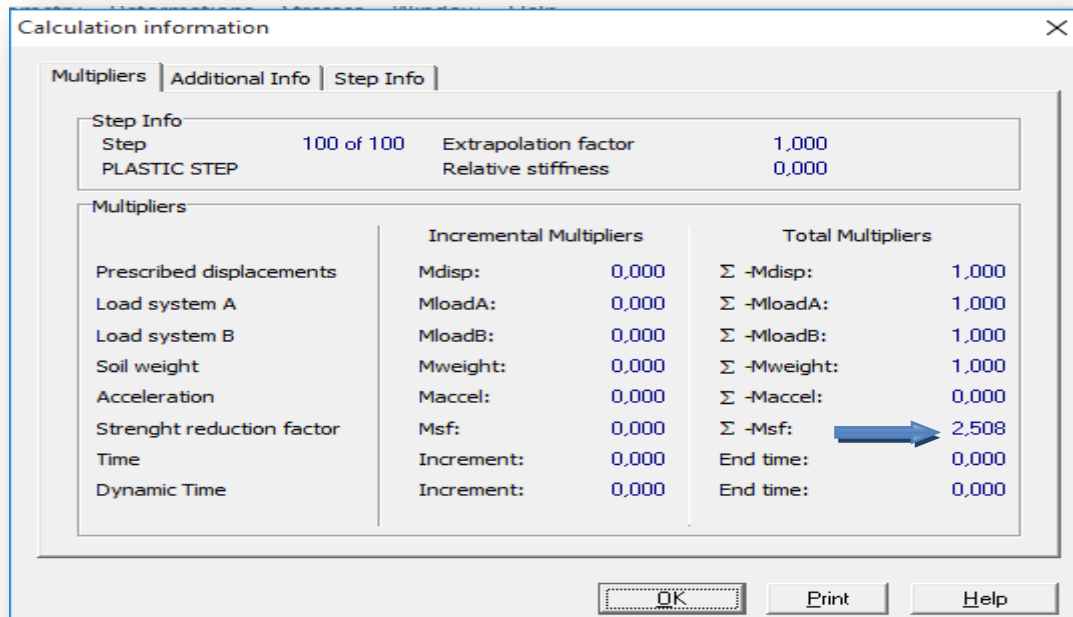


Figure IV.33 : La valeur du coefficient de sécurité (Conglomérat).

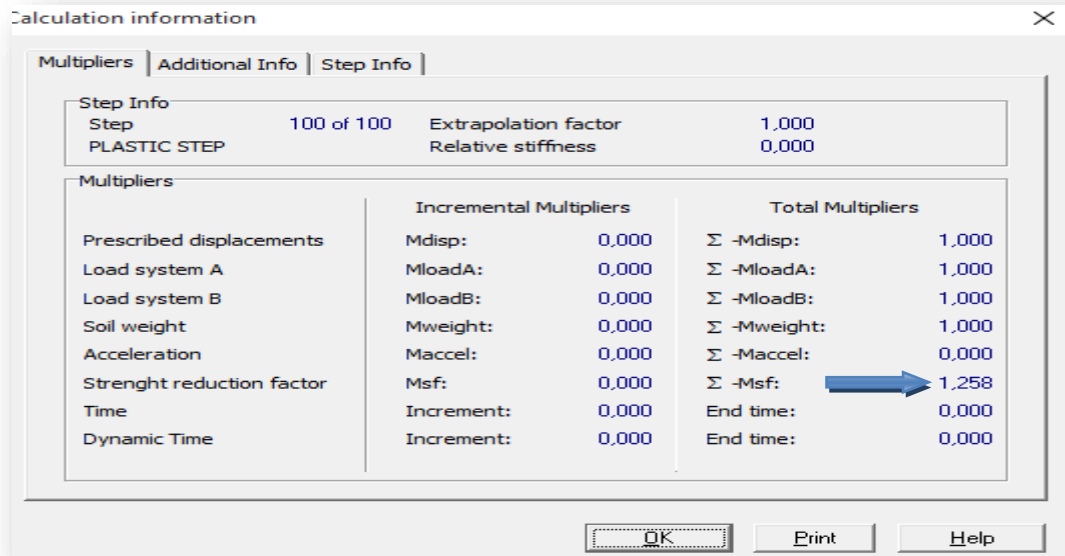


Figure IV.34: La valeur du coefficient de sécurité (Marne jaune +Mélange).

Tableau IV.6 : Les résultats du coefficient de sécurité.

Le gradin	Fs à court terme sec	Fs à court terme saturé	Fs à long terme sec	Fs à long terme saturé
Marne jaune	1.16	1.13	0.77	0
Conglomérat	2.50	2.22	1.84	1.64
Marne jaune+mélange.	1.25	0	0.76	0

IV.4.3. Interprétation des résultats

- **À court terme :** Les valeurs de coefficient de sécurité trouvées en présence d'eau et sec indiquent que la zone d'étude est stable à court terme et $Fs \geq 1.2$ pour la plupart des profils que ce soit pour un gradin ou pour la rampe.
- **À long terme :** Les valeurs de coefficient de sécurité trouvées en présence d'eau et sec indiquent que la zone d'étude est instable à long terme et $Fs \leq 1.2$ pour le faciès marneux et le mélange (marne jaune+passage de fer+conglomérat) que ce soit pour un gradin (calcul local) ou pour la rampe (calcul global), par contre pour le profil former par le conglomérat le Fs trouvé est inférieur au résultat trouvé précédemment d'où on peut conclure que les caractéristiques mécaniques estimées influent considérablement sur les résultats.

- En générale les calculs réalisées selon les différentes conditions pour la plupart des profils indiquent que les gradins sont stable à court terme et instable à long terme localement et globalement.

IV.5. Programme Roc-Science « Slide »

Slide 5.0 est un logiciel d'analyse de stabilité des pentes le plus complète disponible, complet avec des capacités de sensibilité, d'analyse probabiliste. Ce programme 2-D combine une interface graphique CAO attrayante et facile à utiliser avec une large gamme d'options de modélisation et d'interprétation des données qui vous permettent d'effectuer des analyses de manière plus approfondie, plus rapidement.
[20]

IV.5.1. La géométrie des modèles

On a respecté les mêmes paramètres géométriques des profils mentionner dans le tableau (IV.2) qui sont utilisé dans les programmes Geoslope /Plaxis 2D.V 8.2

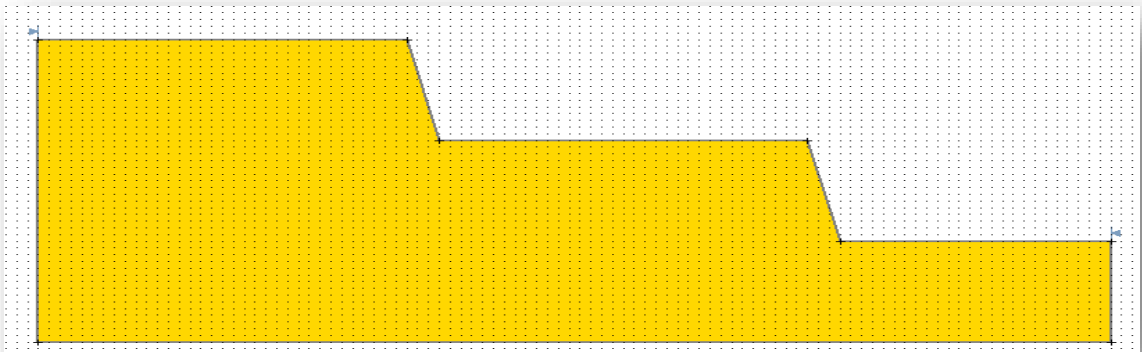


Figure IV.35 : Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune.

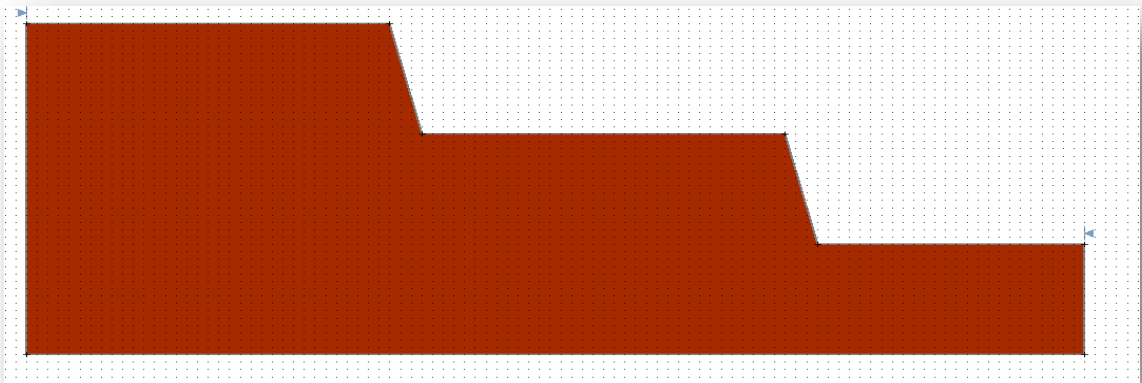


Figure IV.36 : Le modèle géométrique de la rampe du conglomerat.

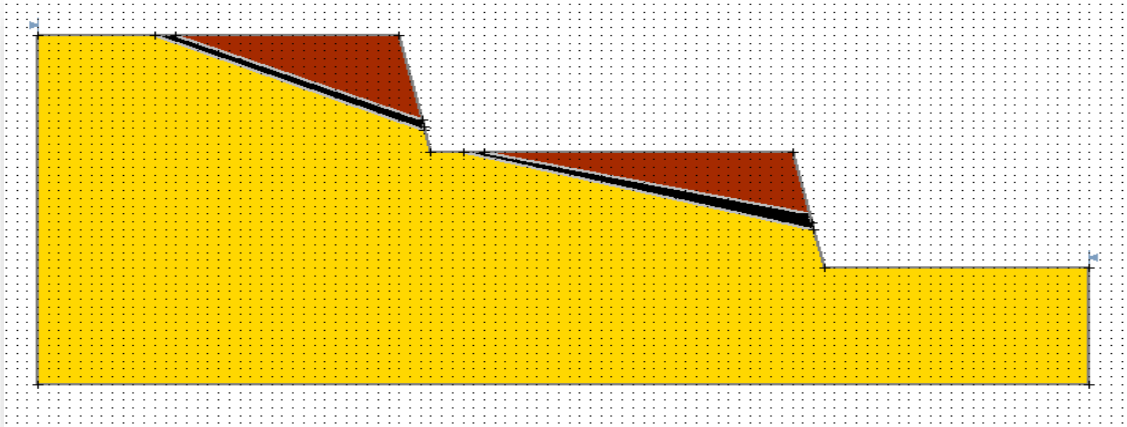


Figure IV.37 : Le modèle géométrique de la rampe de la marne jaune+ mélange.

IV.5.2. Calcul par Roc-Science « Slide »

IV.5.2.1 Facture de sécurité et surface de rupture critique

On a utilisé le programme Slide 5.0 qui nous donne des résultats de Fs proches aux autres programmes « PLAXIS 2D.V 8.2, GEOSLOPE », qui sont indiquées dans les figures suivantes :

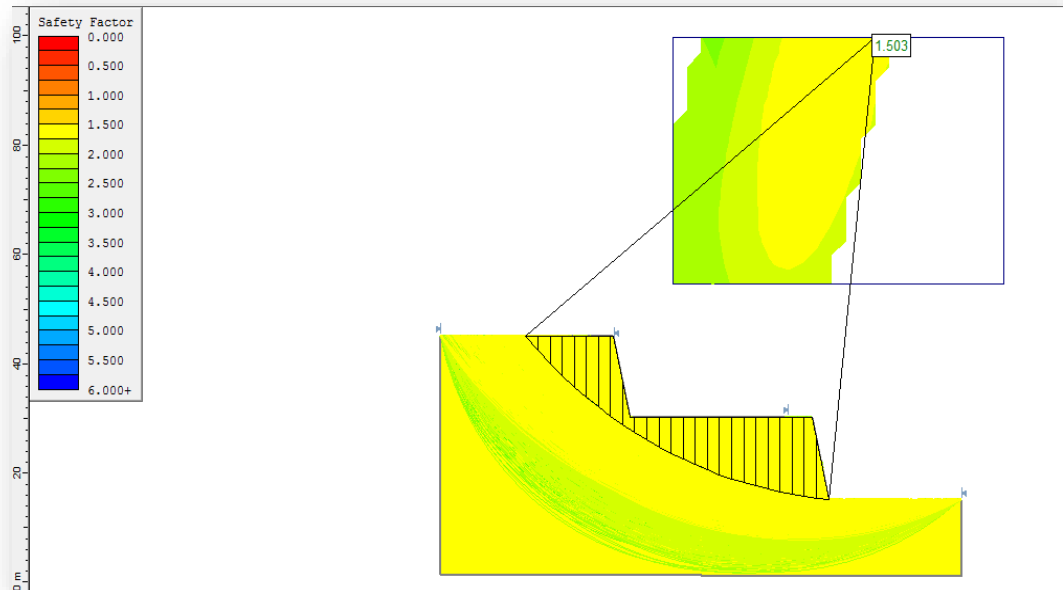


Figure IV.38 : Coefficient de sécurité pour la rampe de la marne jaune à l'état sec.

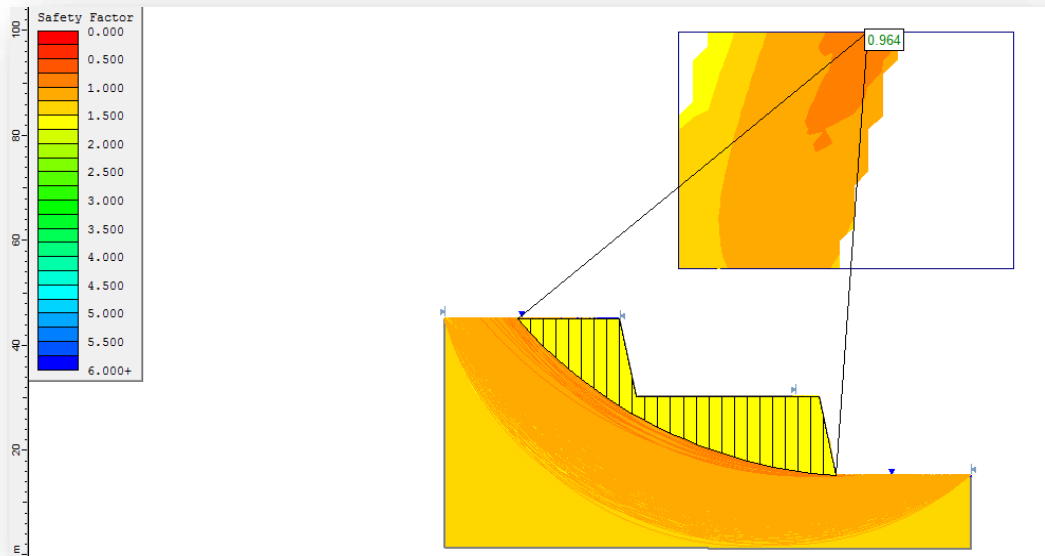


Figure IV.39 : Coefficient de sécurité pour la rampe de la marne jaune à l'état saturé.

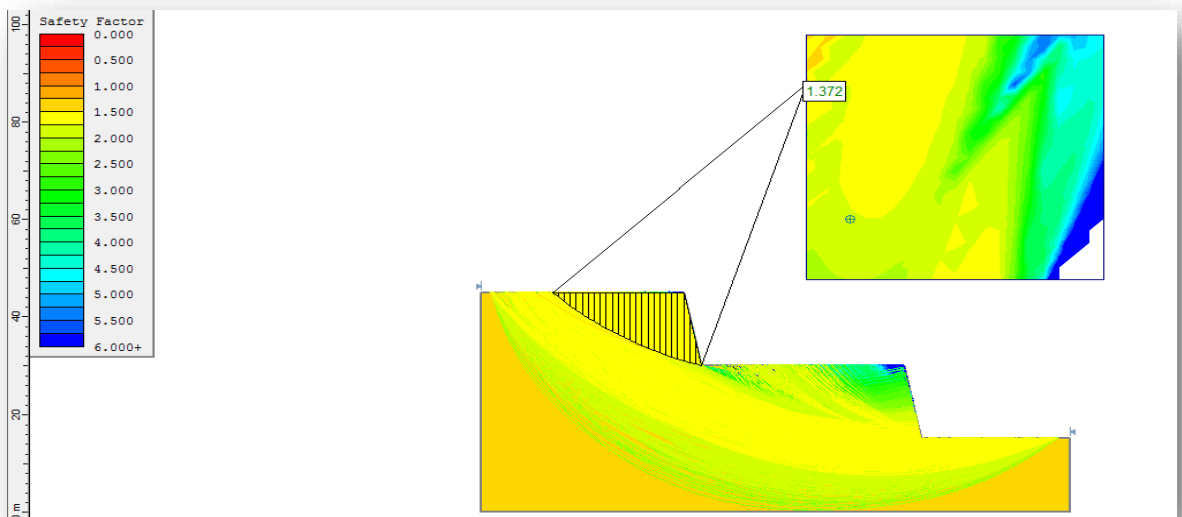


Figure IV.40 : Coefficient de sécurité pour la rampe de la marne jaune+mélange à l'état sec.

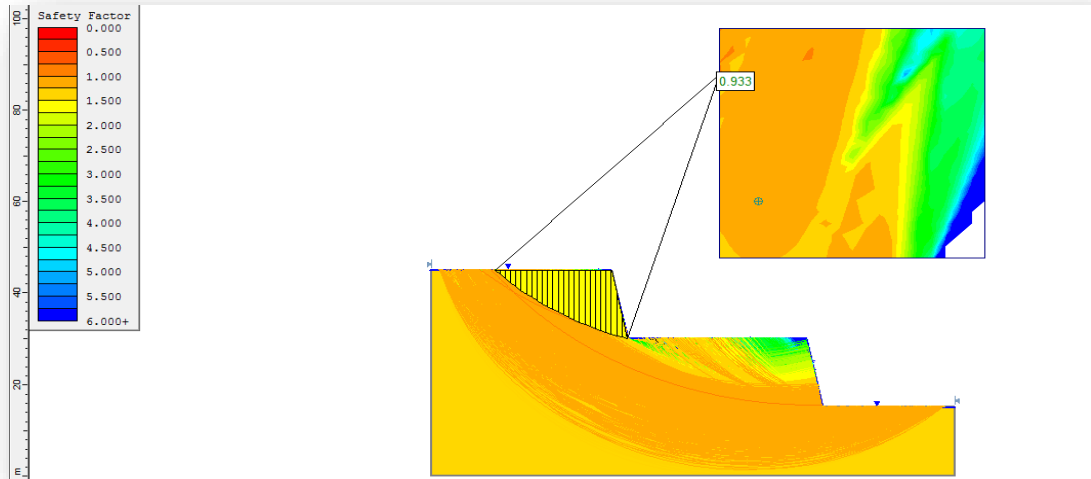


Figure IV.41 : Coefficient de sécurité pour la rampe de la marne jaune à l'état saturé.

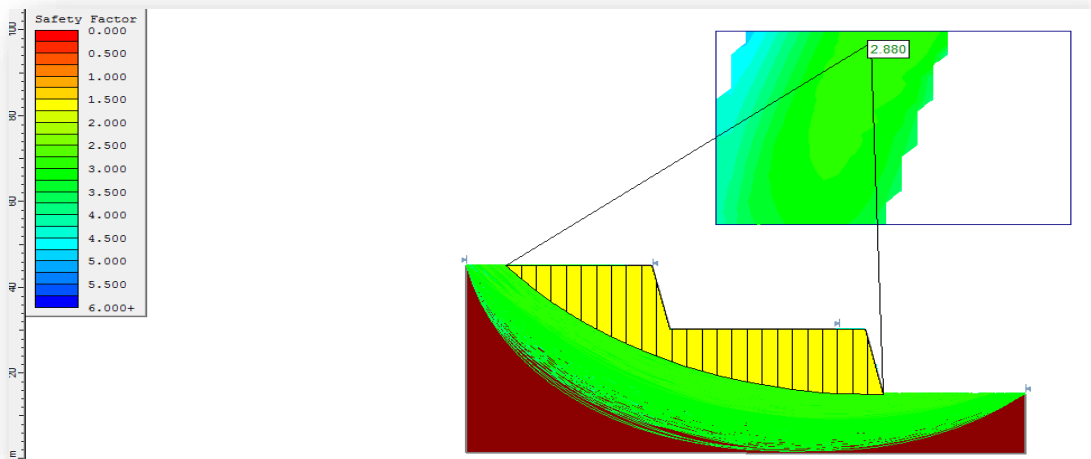


Figure IV.42 : Coefficient de sécurité pour la rampe du béton à l'état sec.

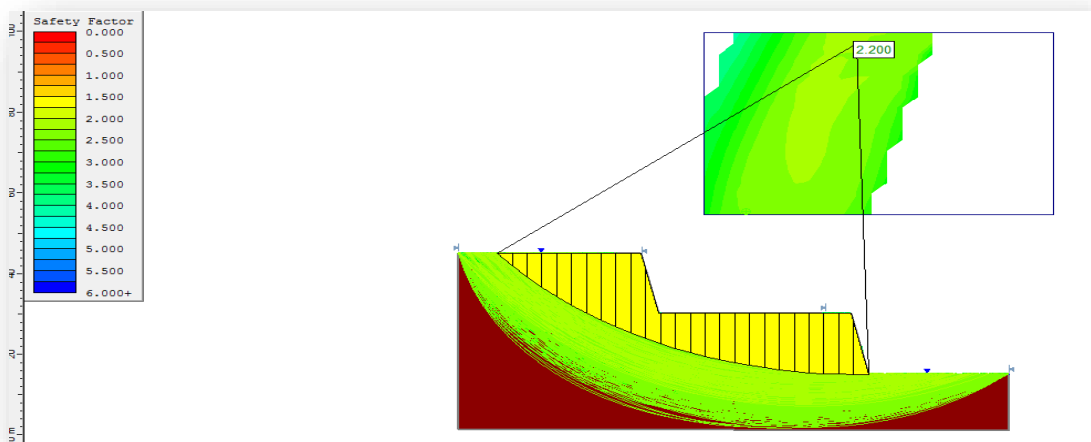


Figure IV.43: Coefficient de sécurité pour la rampe du béton à l'état saturé.

Tableau IV.5: Les résultats de coefficient de sécurité.

Le gradin	Fs à l'état sec	Fs à l'état saturé
Marne jaune	1.503	0.964
Conglomérat	2.88	2.20
Marne jaune+mélange.	1.372	0.933

IV.5.2.2. Interprétation des résultats

- **À l'état sec :** Les valeurs du coefficient de sécurité montrent que la zone d'étude est stable à court terme et $Fs \geq 1.2$ pour la plupart des profils que ce soit pour un gradin ou pour la rampe.
- **À l'état saturé :** Les valeurs du coefficient de sécurité en présence d'eau pour le faciès marneux et le mélange (marne jaune plus passage de fer et conglomérat) indiquent que la zone est instable et $Fs \leq 1.2$. Par contre pour le profile de conglomérat le $Fs \geq 1.2$.
- En général les calculs réalisés selon les différentes conditions pour la plupart des profils indiquent que les gradins sont stables à l'état sec et instable à l'état saturé.

IV.5.2.3. Résultats globaux de calcul de stabilité

Les résultats de calcul global sont représentés dans le tableau suivant ;

Tableau IV.6 : Les résultats globaux.

Le gradin	Les logiciels	Calcul de Fs	
		Sec	Saturé
La marne jaune	GEOSLOPE	1.599	1.008
	PLAXIS	1.16	1.13
	SLIDE	1.503	0.964
Le conglomérat	GEOSLOPE	2.939	2.209
	PLAXIS	2.50	2.22
	SLIDE	2.88	2.20
Marne jaune+mélange	GEOSLOPE	1.621	1.048
	PLAXIS	1.25	0
	SLIDE	1.372	0.933

D'après les résultats du coefficient de sécurité qu'ils sont représentés dans le tableau précédent, nous concluons que :

- La plupart des programmes utilisés ont donné les mêmes résultats d'où on constate la fiabilité des résultats trouvés.

IV.6. Conclusion

D'après les résultats obtenus lors de la modélisation numérique par les différents logiciels : PLAXIS [2D V 8.2], GEOSLOPE [2014], Roc science « Slide », nous concluons que ;

- ✓ Les résultats trouvés pour le calcul à court terme en absence des conditions hydrauliques montrent bien que la carrière est stable localement et globalement.
- ✓ Les résultats obtenus en condition de saturation totale montrent bien que la stabilité de la carrière est devenue très critique d'où on constate que l'eau influe considérablement sur le comportement des marnes jaune et conglomérat.
- ✓ Les classifications géomécaniques indiquent que les gradins sont classés dans la catégorie III de très pauvre qualité et qui sont instable qui coïncide avec les

résultats de calcul par les trois codes qui montre bien que les gradins sont instables a long terme avec un coefficient $F_s < 1$.

- ✓ On constate que l'eau joue un rôle très important et influe considérablement sur l'état de stabilité des gradins ou le coefficient décroît rapidement jusqu'à une valeur nulle.
- ✓ Les résultats trouvés pour les faciès du conglomérat montrent que les valeurs de F_s sont plus grandes par rapport aux autres formations puisque les caractéristiques mécaniques sont estimées.
- ✓ À cause des résultats trouvés, nous n'avons pas ajouté l'effet de vibration dû à l'explosif et l'accroissement des travaux d'exploitation souterraine puisque le coefficient de sécurité est inférieur à 1.

*Conclusion
générale et
recommandation.*



Conclusion générale et recommandations

Conclusion générale et recommandations

Les mouvements de terrain en générale et les glissements en particulier, sont l'un des phénomènes géotechniques les plus répandus dans le monde, sous l'effet d'influence naturelle ou anthropique, pour cela nous avons montré les différents types des mouvements des terrains selon la vitesse de déplacement et la morphologie de leur surface de rupture avec une approche approfondie sur les glissements rocheux.

Les conditions géologiques, hydrogéologiques et géotechniques sont des outils très importants pour le géotechnicien, qui permet de comprendre le comportement du massif rocheux afin d'évaluer la stabilité et les nouvelles dégradations et faire une observation générale sur l'état actuel de la mine. À cet égard, nous avons pris la mine à ciel ouvert de fer de Boukhadra pour la réalisation de l'étude.

Les observations des plusieurs problèmes géotechniques qui sont classés comme des risques dangereuses vis-à-vis les travailleurs en premiers lieux et aux installations et équipements en second lieux, indiquent que ces problèmes sont la conséquence de plusieurs paramètres de différent ordre tel que l'interaction entre l'exploitation souterraine et à ciel ouvert qui conduit a la réduction des épaisseurs des couches marneuses, le jumelage des gradins formant des hauteurs élevées , la largeur de plate forme n'est pas respectée, nous permettent de conclure que la mine nécessite une étude géotechnique de stabilité des gradins.

L'application des systèmes de classification nous a permis de tirer les constatations suivantes :

- ✚ Les valeurs du RQD, SMR, estiment que la qualité de la masse rocheuse du minerai de fer est bonne, on peut dire que le massif est stable, pour le calcaire et la marne grise et la marne minéralisée la qualité est moyenne alors le massif est partiellement stable. Par contre pour la marne jaune la qualité est mauvaise c'est-à-dire le massif est instable, sauf que le conglomérat est complètement instable avec une qualité très mauvaise.
- ✚ Pour la classification de RMR, la qualité est bonne pour le minerai de fer et le calcaire de classe II, pour la marne grise et la marne minéralisée la qualité est moyenne de classe III, par contre pour la marne jaune et le conglomérat la qualité est faible de classe IV.

Conclusion générale et recommandations

- ✚ Pour Le Q- système, on déduit que le minerai de fer et le calcaire et les marnes grises et minéralisées ont une bonne qualité, sauf que la marne jaune et le conglomérat et de moyennes qualités.
- ✚ Suivant les résultats de la classification de GSI; la qualité de la masse rocheuse de la mine de fer de BOUKHADRA bonne pour le calcaire et le minerai de fer et de qualité pour la marne grise et la marne minéralisé. Mais pour la qualité de la marne jaune est mauvais aussi pour le conglomérat est très mauvais
- ✚ On peut conclure que RQD, RMR, SMR, GSI, Q-système donnent une classe de qualité mauvaise à très mauvaise pour la marne jaune et le conglomérat d'où il est nécessaire de valider les descriptions qualitatives par des descriptions quantitative on utilise la méthode d'équilibre limite et les éléments finis.

D'après les résultats obtenus lors de la modélisation numérique par les différents logiciels : PLAXIS 2D V 8.2, GEOSLOPE, Roc science « Slide », nous concluons que ;

- ✓ Les résultats trouvés pour le calcul à court terme en absence des conditions hydrauliques montrent bien que la carrière est stable localement et globalement.
- ✓ Les résultats obtenus en condition de saturation totale montrent bien que la stabilité de la carrière est devenue très critique d'où on constate que l'eau influe considérablement sur le comportement des marnes jaune et conglomérat.
- ✓ Les classifications géomécaniques indiquent que les gradins sont classés dans la catégorie III de très pauvre qualité et qui sont instable qui coïncide avec les résultats de calcul par les trois codes qui montre bien que les gradins sont instables a long terme avec un coefficient $F_s < 1$.
- ✓ On constate que l'eau joue un rôle très important et influe considérablement sur l'état de stabilité des gradins ou le coefficient décroît rapidement jusqu'à une valeur nulle.
- ✓ Les résultats trouvés pour les faciès du conglomérat montrent que les valeurs de F_s sont plus grandes par rapport aux autres formations puisque les caractéristiques mécaniques sont estimées.

Conclusion générale et recommandations

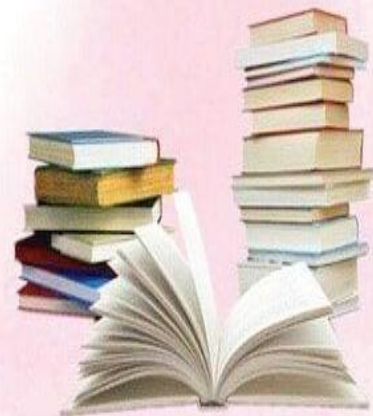
- ✓ À cause des résultats trouvés, nous n'avons pas ajouté l'effet de vibration dû à l'explosif et l'accroissement des travaux d'exploitation souterraine puisque le coefficient de sécurité est inférieur à 1.

À la lumière des résultats trouvés nous recommandons les points suivants :

- Diminuer la hauteur des talus dans les endroits où la marne jaune et minéralisée est dominante ou nous recommandant une hauteur de 10 m
- Diminuer l'angle de talus des gradins dans les endroits où la marne jaune et minéralisée est dominante ou nous recommandant un angle de 65°
- La réalisation des canaux de drainage des eaux de ruissellement en tête des gradins pour la minimisation des infiltrations et la saturation des marnes jaunes
- Pour minimiser l'effet des vibrations engendrées par les travaux de tir et d'abattage, il est recommandé d'appliquer le pré découpage qui est très utilisé dans la géotechnique
- Introduire l'effet de l'exploitation souterraine ou l'évolution du vide dans les modèles analytiques et numériques lors des calculs de la stabilité des gradins,
- utiliser d'autres programmes qui prennent en considération la présence des discontinuités comme Flac qui utilise la méthode des éléments distincts.

Références

bibliographiques



Références bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] : **Collection Prévention des risques naturels, août 2012.** Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie : les mouvements de terrain.

[2] : **Direction de la Surveillance et de la Prévention des Risques., Septembre-2008.** "Etude pour la réalisation d'une cartographie et d'un système d'information géographique sur les risque majeurs au Maroc : mission 01 identifications des risques". Version 1.0.

[3] : **Julien, L., Hélène, H. M., 2017.** Les glissements de terrain, modélisation et prévision.

[4] : **Djamel Eddine BENOUIS., 2010.** Université de Saida (Algérie) - Ingénieur d'état en génie civil option Construction Civile et Industrielle.

[5] : **BENDADOUCHE.H, LAZIZI.S, 2013.** Glissement de terrain et confortement .Pages bleues.

[6] : **AISSA Mohamed Hamza., 2011.** « Analyse et modélisation d'un glissement de terrain : cas de Sidi Yousef beni messous – Alger ». Master géotechnique, Centre Universitaire Khemis Miliana.

[7] : **Jack-Pierre Piguet., Mars 1997.** Affaissements et d'déformations au-dessus des exploitations minières : mécanisme, conséquences et facteurs influents. Conférence mondiale sur le développement durable des anciens pays charbonniers " l'Après-Charbon".

[8] : **T. Sharma, S. Abramson.** Slope stability and Stabilisation méthodes, second édition, John Wiley & Sons New York.

[9] : **la Société Suisse de Géomorphologie (SSGm) :** Géomorphologie de la montagne froide.

[10] : **R.M. Faure.,** « Stabilité des pentes; Rappels de géologie ».

[11] : **Héritier NDAMINYAA CHANGWI., 2012.** Méthodes de prévention des risques dues aux éboulements des roches dans les mines souterraines, Université officielle de Bukavu.

[12] : **Diudonné FEKOUA., 2010.** Anthropisation et risques environnementaux sur les collines de Yaoundé. Master professionnel en études d'impacts environnementaux, Centre régional d'enseignement spécialisé en agriculture forêt/ bois Cameroun.

Références bibliographiques

[13] : **D. Hantz, LIRIGM., juillet 1998.** EVALUATION DES RISQUES D'EBOULEMENTS ROCHEUX, Université Joseph Fourier.

[14] : **Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux:** des travaux menés dans le cadre du projet de recherche C2ROP, **septembre 2019.**

[15] : **Institut des Risques Majeurs (2001).** - Mémento du maire et des élus locaux- Altitude Impression.

[16] : **Jean.N.S, Frédéric.H., 2018.** Les laves torrentielles et les coulées boueuses, Université Michel de Montaigne-Bordeaux3.

[17] : **LAMAMRA Abdelssattar et MAMMERIE Mohamed., 2015.** « La Caractérisation du massif rocheux cas : la mine de Boukhadra (wilaya de Tébessa) ». Master Exploitation Minière, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.

[18] : **Mme BENDI-OUIS A, 2020 :** Cours M1 Mécanique des roches « STABILITÉ DES VERSANTS ROCHEUX », UNIVERSITE DE TLEMCEM, Faculté de Technologie - Département de Génie Civil.

[19] : **Chalhoub M., [2006],** «Apport des méthodes d'homogénéisation numérique à la classification des massifs rocheux fracturés », Thèse de doctorat 2006, Ecole Nationale des mines de Paris, 206 pages.

[20] : **BENBOULAKHRAS Mohammed Islam., 2019 :** « 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 ».Master Géotechnique, Université Larbi Tebessi – Tébessa.

[21] : **SADEK Kahina et CHAOUCH Ibtissem., 2015 :** « Caractérisation et classification du massif rocheux du Djebel de Boukhadra –Tébessa », Thèse de doctorat, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.

[22] : **H.LE BISSONNAIS, TERASOL.,** Tunnels et ouvrages souterrains, « Caractérisation du massif-Recommandations du GT1 AFTES ».

[23] : **Hamdane Ali.,** « cours 3^{ème} année licence mécanique des roche ».

Références bibliographiques

[24] : **François MARTIN ; Adrien SAÏTTA., 2005** : « Mécanique des Roches et Travaux Souterrains » ; Centre d'Études des Tunnels.

[25] : **Abdelouahed T., [1992]**, «Modélisation des massifs rocheux fissurés par la méthode des éléments distincts », Thèse de doctorat de l'École Nationale des ponts et chaussées en géologie de l'ingénieur.

[26] : **Bouali Afaf et Zeghdani Aouatef., 2019.** « Instabilité rocheux caractérisation et stabilisation cas de la route entre Hammam Bni Haroun et el Milia », Master Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique, Université Larbi Tebessi. Tébessa.

[27] : **CHEKIR Mohammed et MANI Nidal., 2016.** « Caractérisation et classification géomécaniques du massif rocheux d'Aokas Bejaia ». Master Exploitation Minière, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.

[28] : **ZAHRI FARID., 2017.** « Contribution à l'étude de la stabilité des massifs rocheux par modélisation numérique (Cas des carrières de granulats de Sétif - Algérie) ». Thèse de doctorat, option Exploitation des Sols et Sous Sols, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.

[29] : **CHANTRON Laurent, ZUMBO Vilma., 2002.** « FORMALISATION DES CRITÈRES DESCRIPTIFS D'UN MASSIF ROCHEUX - MISE AU POINT D'UNE FEUILLE DE SAISIE DES DISCONTINUITÉS ».Centre d'Etudes des Tunnels, 25 avenue François Mitterrand, 69674 Bron Cedex.

[30] : **BENZEMOURI Moussa., 2017.** "Etude de la stabilité des gradins d'une mine à ciel ouvert Cas : la mine de fer d'el Ouenza". Master géotechnique, UNIVERSITE LARBI TEBSSI –TEBESSA.

[31] : **Collin Alexander et al. [1846]**, « stabilité des ponts ».Paris.

[32] : **Société Suisse de Géomorphologie (SSGm). Août 2009**, « Géomorphologie de la montagne ».

[33] : Documents fournie par l'entreprise de **BOUKHADRA**, « les plans topographiques et géologiques de la mine, la géologie de la mine ».

Références bibliographiques

[34] : **Hiba BOULAHBEL et Souhaila NAHAL., 2019.** « Diagnostic de l'effondrement dans la carrière de Boukhadra ». Master Exploitation Minière, UNIVERSITE LARBI TEBSSI –TEBESSA.

[35] : **Amrani S., [2011],** « Etude de stabilité des talus de la carrière de Mefteh (Blida) », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier, Ecole nationale polytechnique Alger, 112 pages.

[36] : **Bieniawski [1973],** « Engineering classification of jointed rock masses ». Trans. S. Afr. Instn Civ. Engrs, Vol. 15.

[37] : **Djellali, A et al ., [2019],** « Evaluation of Cement-Stabilized Mine Tailings as Pavement Foundation Materials », UNIVERSITE LARBI TEBSSI –TEBESSA.

[38] : **Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V.** Caractérisation mécanique d'un versant rocheux instable au moyen du système RMR - Cas de la Clapière (Alpes Maritimes). Symposium International Param2002, Identification et détermination des paramètres des sols et des roches pour les calculs géotechniques, 2/3 septembre 2002, Paris, France, 2002.

[39] : **Abdelkader Ben Aissa., [11-2003],** « Glissements de terrain calcul de stabilité ». Office des Publications Universitaires ; page 1-9 ; Edition 01-05-4220, Algérie.

[40] : **CALGARY, ALBERTA :** « Stability Modling with SLOPE/W Cours », 2012 version Thiard édition, Canada, 2008, Web : <http://www.geo-slope.com>.

[41] : **R.B.J Brinkgreve :** « Manuel de référence version 8 », Delft University of technology, Pays-Bas, DELFT, 2003.