

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie Minier

Option : Exploitation des mines

Présenté par

- M. OUADI IDIR
- M. KERKOUR AMINE

Thème

**Étude géomécanique de la stabilité des massifs rocheux
de la carrière d'Ain El-kebira (setif)**

Soutenu le 07/10/2021 devant le jury composé de :

Président: Mr. BOUKARM . R

M.C.B U.A.M.Bejaïa

Promoteur: Mr. SAADOUN . A

M.C.B U.A.M.Bejaïa

Examineur: Mr. FREDJ . M

M.C.A U.A.M.Bejaïa

Année Universitaire : 2021-2022

Remerciement

Nous remercions tout d'abord "Allah" de nous avoir donné le courage, la patience, la santé et la puissance pour achever ce travail.

On désire adresser, un merci tout particulier, à notre promoteur

Mr. SAADOUN A, pour ses précieux conseils tout au long de notre travail.

Nous voudrions exprimer toutes nos reconnaissances à Mr BOUKARM R , pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury de notre soutenance.

Un grand remerciement a Mr FREDJ M , pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant, d'examiner et de juger notre travail.

Sans oublier de remercier le personnel de la cimenterie d'Aïne El Kebira qui nous a montré le chemin vers cette expérience ravissante

Enfin, nous présentons toute notre gratitude à tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

*À la mémoire de mon très cher défunt père que
dieu l'accueille dans son vaste paradis*

*À la femme que j'aime plus que tout au monde
ma très chère mère LEÏLA*

*À mes frères ISMAIL, HOUSSEM, MOUSSA et
le petit chouchou de la famille ARIS*

À toute la famille

For my heart and my love SAOUSSANE

À tous mes amis sur tout SALIM le meilleur

À toute la promotion d'EXPLOITATION

MINIÈRE.

Amine

Dédicace

Ce modeste travail est dédié à :

Ma chère mère et Mon cher père,

Mes frères et ma sœur,

A toute la famille,

A tous mes amis,

A toute la promotion d'EXPLOITATION

MINIÈRE.

IDIR

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier la stabilité des talus de la carrière d'Ain El Kebira (gisement de calcaire nouvelle extension -Sétif). Nous avons utilisés deux approches :les systèmes de classification de méthode empirique (RQD, RMR, GSI, SMR) et pour confirmer les résultats obtenu par ces derniers on a utilisé la méthode analytique (Méthode équilibre limite)à l'aide d'un logiciel de calcul de stabilité bien adapté aux problèmes de stabilité (Slide).A l'aide de ce dernier, il a été construit un modèle du gisement en se servant des caractéristiques physico-mécaniques des roches constitutifs ainsi que de la coupe géologique du gisement. Les méthodes de calcul utilisées sont : méthode de Bishop simplifiée, Janbu simplifié, spencer et GLE /Morgenstern Price.

Les résultats obtenus des systèmes de classification indiquent que le massif constituant les gradins de la carrière est stable. Les résultats trouvés confirmés par logiciel de calcul de stabilité (slide) étant donné que les massifs rocheux de la carrière sont stables.

Mots Clefs : Massifs rocheux -Stabilité des talus –Coefficient de sécurité –Calcaire –Carrière d'Ain El Kebira.

Abstract

The objective of this work is to study the stability of the slopes of the Ain El Kebira quarry "New extension limestone deposit" (Sétif). We used the empirical method classification systems (RQD, RMR, GSI, SMR) and to confirm the results obtained by them we used the analytical method (Limit equilibrium method) using a stability calculation software well suited to stability problems (Slide), to understand the failure mechanism. Using the latter, a model of the deposit was constructed using the physico-mechanical characteristics of the constituent lands as well as the geological section of the deposit. The calculation methods used are: simplified Bishop's method, simplified Janbu, Spencer and GLE / Morgenstern Price.

The results obtained from the classification systems indicate that the massif constituting the steps of the quarry is stable. The results found confirmed by stability calculation software (slide) given that the rock massifs of the quarry are stable.

Keywords: Rock massifs -Stability of slopes –Safety factor –Limestone–Ain El Kebira quarry.

الملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة ثبات منحدرات مقلع عين الكبيرة "الامتداد الجديد للحجر الجيري" (سطيف) ، وقد استخدمنا أنظمة التصنيف بالطريقة التجريبية (RQD ، RMR ، GSI ، SMR) وتأكيد النتائج. تم الحصول عليها بواسطة ، استخدمنا الطريقة التحليلية (طريقة التوازن المحدود) باستخدام برنامج حساب الاستقرار المناسب تمامًا لمشاكل الاستقرار (Slide) ، لفهم آلية الفشل. باستخدام الأخير، تم إنشاء نموذج للودائع باستخدام الخصائص الفيزيائية الميكانيكية للأراضي المكونة وكذلك القسم الجيولوجي للودائع. طرق الحساب المستخدمة هي: طريقة Bishop المبسطة و Junbu و Spencer و GLE / Morgenstern و Price.

تشير النتائج التي تم الحصول عليها من أنظمة التصنيف إلى أن الكتلة المكونة لتدرجات المحجر مستقرة ، وقد تم تأكيد النتائج بواسطة برنامج حساب الثبات (شريحة) مع العلم أن كتل الصخور في المحجر مستقرة.

كلمات مفتاحية : كتل صخرية - استقرار المنحدرات - معامل الأمان - الحجر الجيري - محجر عين الكبيرة.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Abréviation

Liste des notations

Introduction générale.....1

Chapitre I -structure et comportement mécanique des massifs rocheux et Les différents systèmes de classification

Introduction.....2

I.1 Classification des roches.....2

a) les roches magmatiques.....2

b) Les roches sédimentaires.....2

c) Les roches métamorphiques.....2

I.2 Structure géométrique des massifs rocheux.....3

I.2.1 Description des massifs rocheux.....3

I.2.2 Aspect géologique.....3

I.3 Description des discontinuités.....5

I.3.1 Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux.....5

I.3.2 Les familles des discontinuités.....6

I.3.3 Les caractéristiques géométriques des discontinuités.....9

I.4 L'instabilité des talus et mouvement des terrains.....10

I.4.1 Type des mouvements.....10

I.4.1.1 Les mouvements lents et continus.....10

I.4.1.2 Glissements.....10

I.4.1.3 Les affaissements.....13

I.4.1.4. Les tassements.....13

I.4.1.5 Fluage et solifluxion.....13

A .Fluage.....13

B. Solifluxion.....14

I.4.1.6. Phénomènes de retrait gonflement des argiles.....	14
I.4.2 Les mouvements rapides.....	14
I.5.Facteurs influant sur la stabilité des talus dans le domaine minier.....	17
I.5.1. Facteurs géologiques (état de contrainte).....	17
I.5.2.Facteurs hydrogéologiques (pression hydrostatique).....	17
I.5.3. Facteurs géotechniques.....	17
I.5.4. Facteurs technologiques.....	17
I.5.5. Facteurs géographiques (précipitation atmosphérique).....	17
1.6 .méthodes d'évaluation de stabilité des talus	17
I.6.1. Méthodes empiriques.....	18
I.6.2. Méthodes analytiques.....	27
I.6.3. Méthodes numériques.....	27
I.7. Calcul facteur de sécurité (Fs).....	27
Conclusion.....	28

CHAPITRE II: Description des sites et conditions géologiques et minières du gisement de calcaire d'Ain El Kebira

Introduction.....	29
Présentation de l'entreprise.....	29
II.1 Etude géologiques du gisement	30
II.1.1 Situation géographique du gisement d'Ain El Kébira.....	30
II.1.2 Climat de la region	32
II.1.3 Stratigraphie de la région du Djebel Medjounes.....	33
II.1.4 Stratigraphie et paléogéographie	34
II.1.5 Géologie du gisement.....	34
II.1.6 Tectonique du gisement.....	35
II.1.7 discontinuité de la carrière.....	35
II.2 Conditions minières	36
II.2.1 Régime de fonctionnement de la carrière.....	36

II.2.2 Système d'exploitation	36
II.2.3 Etat actuel des travaux d'exploitation.....	36
II.2.4 Travaux d'abattage.....	37
II.2.5 Foration.....	37
II.2.6 Les principaux paramètres du tir pour une volée.....	37
II.2.7 Chargement.....	37
II.2.8 Transport.....	38
Conclusion.....	39

Chapitre III- Caractérisation, classification et stabilité du massif de la carrière de Ain el kebira

Introduction	40
III.1.Collecte et traitement des données structurales du carrier.....	40
III.2.Classifications du massif de la carrière d'Ain el kebira djbel medjounes 2.....	41
III.2.1.Calcul RQD (<i>Rock Quality Design</i>) du massif rocheux de la carrière.....	41
III.2.2.Classification RMR du massif (<i>Rock Mass Rating</i>) du massif rocheux de la carrière.....	43
III.2.3.Classification GSI (<i>Geological Strength Index</i>) du massif rocheux de la carrière.....	44
III.2.4.Classification SMR (<i>Slope Mass Rating</i>).....	44
III.3.Caractéristiques géotechniques du massif.....	47
III.3.1.Résistance à la compression R_c (MPa).....	47
III.3.2.Résistance à la traction.....	49
III.3.3.Cohésion.....	50
III.3.4.Angle de frottement.....	51
III.4.Etude de stabilité par la méthode d'équilibre limite par logiciel SLIDE.....	51
III.4.1.Calcul du coefficient de sécurité F_s avec slide dans l'état statique	52

a) L'approche de Bishop simplifiée.....	52
b) L'approche de Janbu simplifiée.....	53
c) L'approche de spencer.....	53
d) L'approche GLE /Morgenstern Price.....	54
III.4.1.Calcul du coefficient de sécurité Fs avec slide dans l'état dynamique	55
a) L'approche de Bishop simplifiée.....	55
b) L'approche de Janbu simplifiée.....	56
c) L'approche de spencer.....	57
d) L'approche GLE /Morgenstern Price.....	58
III.4.2.Interprétation des résultats.....	59
Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	60
Références Bibliographiques.....	61
Annexes	

Liste des tableaux

Tableau I.1. Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux.....	18
Tableau I.2. Comparaison des utilisations du RMR et du Q-system dans le domaine des travaux souterrains.....	22
Tableau I.3. Classification de massif en fonction de la valeur Q.....	23
Tableau I.4. Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI.....	24
Tableau I.5: Notes des paramètres SMR (Romana, 1993).....	25
Tableau I.6. Description des classes SMR (Romana, 1985).....	25
Tableau I.7. Equilibre des talus en fonction des valeurs théoriques du coefficient de sécurité.....	27
Tableau I.8. Equilibre des talus en fonction des valeurs expérimentales du coefficient de sécurité.....	28
Tableau II-1 : limites du périmètre de permis d'exploitation.....	31
Tableau II-2: Précipitation annuelle année 2020.....	32
Tableau II-3: Temperatures année 2020.....	33
Tableau II-4 : Humidité de l'air 2017.....	33
Tableau II-5 : capacité de production de calcaire.....	36
Tableau II-6 : caractéristiques du matériel de chargement.....	38
Tableau II-7: Caractéristiques du matériel de transport utilisé dans la carrière.....	38
Tableau III.1. Orientation des familles de discontinuités les plus importantes dans la carrière.....	41
Tableau III.2 nombre de fissure dans 10m pour chaque couche.....	42
Tableau III.3. Résultats de RQD de différentes couches.....	42
Tableau III.4. Classification RMR de différentes couches de la carrière.....	43
Tableau III.5. Classification GSI de différentes couches de la carrière.....	44
Tableau III.6. ClassificationSMR de différentes couches de la carrière (ROMANA 1993).....	45
Tableau III.7. Classification SMR de différentes couches de la carrière (TOMAS et al, 2007)	46
Tableau III.8. Les résultats des essais de compression uniaxiale pour le calcaire C1.....	49

Tableau.III.9. Les résultats des essais de compression uniaxiale pour le calcaire C2.....	49
Tableau III.10. Résultats des essais au laboratoire de traction en labo sur des échantillons du calcaire C1.....	49
Tableau III.11. Résultats des essais au laboratoire de traction en labo sur des échantillons du calcaire C2.....	50
Tableau III.12. Valeurs obtenues de(<i>Cech</i>) pour le calcaireC1.....	50
Tableau III.13. Valeurs obtenues de(<i>Cech</i>) pour le calcaireC2.....	50
Tableau III.14. Valeurs obtenues de (ϕ_{ech}) pour le calcaire C1.....	51
Tableau III.15. Valeurs obtenues de (ϕ_{ech}) pour le calcaire C2.....	51
TableauIII.16. Résultat de calcul de facteur de sécurité Fs par différente méthodes (statique).....	54
Tableau III.17. Résultat de calcul de facteur de sécurité Fs par différente méthodes (dynamique).....	58

Liste des figures

Figure I.1. Structure géométrique d'un massif rocheux de calcaire au Nord du Liban.....	3
Figure I.2. Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés.....	4
Figure I.3. Types de structures des massifs rocheux.....	5
Figure I.4. Les joints stratigraphiques.....	6
Figure I.5. Les diaclases.....	6
Figure I.6. Les failles.....	7
Figure I.7. Les plis.....	8
Figure I.8. La schistosité.....	8
Fig. I.9 : Mesures de l'orientation du plan de discontinuité, différents types de repérage.....	9
Figure I.10 : Principaux éléments descriptif d'un glissement de terrain.....	11
Figure I.11: Glissement plan.....	11
Figure I.12: Glissement rotationnel simple.....	12
Figure I.13 : Glissement rotationnel complexe.....	12
Figure I.14 : Exemple de fluage.....	13
Figure I.15: Phénomène de retrait et gonflement des argiles.....	14
Figure I.16 : Exemple d'éroulement rocheux.....	15
Figure I.17 : Eboulement d'un massif rocheux.....	15
Figure I.18: Les coulées de boue.....	16
Figure I.19: Effondrement des cavités souterraines.....	16
Figure I.20: Schéma explicatif - méthode du calcul de RQD.....	18
Figure I.21. Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR.....	20
Figure II-1: photo de l'entreprise.....	30
Figure II-2: Situation géographique de la carrière d'Ain kebira.....	31
Figure II-3: vu sur la carrière.....	32
Figure II-4: quelques photos de discontinuité de la carrière.....	35
Figure III.1. Relevée structurale linéaire (Wyllie et Mah, 2004).....	42

Figure III.2. Exemple d'affichage de l'application SMRTTool.....	45
Figure.III.3: échantillon du calcaire.....	47
Figure III.4: photo de l'échantillon écrasé.....	48
Figure III.5 : Disposition des couches du gisement d'Ain El Kebira djebel medjounes 2.....	52
Figure III.6. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de Bishop.....	52
Figure III.7. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de Janbu simplifiée.....	53
Figure III.8. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de spencer.....	53
Figure III.9. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de GLE /Morgenstern Price.....	54
Figure III.10. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de Bishop.....	55
Figure III.11. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de Janbu simplifiée.....	56
Figure III.12. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de spencer.....	57
Figure III.13. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de GLE /Morgenstern Price.....	58

Abréviations

GICA : Groupe industriel des ciments d'Algérie

CPJ : Le ciment Portland aux ajouts

CRS : Le ciment résistant sulfate

SCAEK : Société des ciments Ain El Kébira

DCR20 : Types de Sondeuses

PCR 200DTH : Types de Sondeuses

Jn : Nombre de famille de discontinuités.

Jr : Paramètre de rugosité des joints.

Ja : Paramètre d'altération des joints.

Jw : Paramètre hydraulique.

RQD: Rock Quality Designation

SMR: Slope Mass Rating

RMR: Rock Mass Rating

SRF: Stress Reduction Factor

GSI: Geological Strength Index

Q: le paramètre central d'une méthode développée par le NGI

NGI : Norwegian Géotechnical Institute

(CFMR-MMR [2000]) : Centre Français des Mécaniques des Roches - Manuel de Mécanique des Roches.

Liste des notations

FS : Coefficient de sécurité

λ : Fréquence linéique de discontinuité

Rc : La résistance à la compression (N/m²).

D : Diamètre de l'éprouvette (mm)

Fmax: La force de compression maximale

RT: La résistance à la traction(MPA)

S : surface sur laquelle la charge est appliquée (m²)

S : surface de l'éprouvette sur laquelle est appliqué l'effort de traction qui produit la d'échantillon de roche. (m²)

Tmax: l'effort maximal de traction

Φ_{ech} : Angle de frottement l'échantillon(°)

Cech: Cohésion de l'échantillon (MPa)

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La conception optimale d'un ouvrage minier implique à intégrer les concepts de sécurité, de récupération du minerai et de rentabilité, et doit reconnaître que les opérateurs miniers et les investisseurs s'attendent à ce que les pentes soient stables ou que les instabilités soient gérables pour la durée de vie de la mine ou carrière à ciel ouvert.

La stabilité des talus des mines reste des questions principales qui se posent lors de l'exploitation à ciel ouvert des gisements. Elle a une influence directe sur la sécurité du travail dans la mine, les principes technologiques d'exploitation, la profondeur totale de la mine, les problèmes de drainage, etc.

Cependant un problème majeur touche les massifs rocheux dans le domaine minier : c'est l'instabilité qui se produit lorsqu'un certain nombre d'éléments, de facteurs, sont réunis et que pour une raison ou l'autre, l'état de stabilité précaire prévalant jusque-là, passe à une situation instable se traduisant par des déplacements de roches, caractérisés par leur type (glissement, écoulement, chute...). Plusieurs méthodes de calcul de la stabilité des talus (analytiques, empiriques et numériques), ils sont utilisés par les chercheurs pour l'évaluation de stabilité des ouvrages miniers.

La présente étude se focalise sur l'étude de la stabilité des talus de la nouvelle carrière de calcaire d'Ain El Kebira (Wilaya de Sétif).

Pour cela, notre travail est organisé comme suit :

- Le premier chapitre consiste à donner une description des massifs rocheux, leur structure ainsi que nous abordons les différents types d'instabilité et les différentes méthodes d'évaluation de la stabilité.
- Dans le second chapitre, on va faire une description du site et conditions géologiques et minières du la carrière d'Ain el kebira « gisement de calcaire nouvelle extension »
- Et enfin un troisième chapitre consacré pour étudier la stabilité de la carrière d'Ain el kebira « gisement de calcaire nouvelle extension » par deux méthodes (empirique et analytique) on se base sur le coefficient de sécurité obtenue afin de valider les résultats, nous avons utilisé la méthode d'équilibre limite par logiciel (slide 6.0) pour confirmer les résultats trouvés.

Enfin, ce travail se termine par une conclusion permettant de synthétiser les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I

Chapitre I -structure et comportement mécanique des massifs rocheux et Les différents systèmes de classification

Introduction

La classification des roches est complexe, car elle est basée sur un grand nombre de critères, la reconnaissance des massifs rocheux permet de comprendre les problèmes qui peuvent se poser lors d'une étude d'un projet minier ou de construction.

Le problème de stabilité des talus dans les mines (ou carrières) reste une préoccupation majeure de la géotechnique et de l'exploitation minière. A travers les différentes méthodes utilisées dans l'analyse de la stabilité, l'estimation de la sécurité réelle vis-à-vis du risque de rupture est une question complexe surtout dans le domaine des données limitées ou peu connues.

I.1 Classification des roches

Le Comité Français de Mécanique des Roches (CFMR-MMR [2000]) définit la roche comme étant « un assemblage de minéraux qui ont acquis des liaisons plus ou moins fortes au cours de leur histoire géologique ». [1]

Trois catégories principales sont à l'origine de la classification des roches :

a- les roches magmatiques : Les roches magmatiques sont issues de la solidification de magmas siliceux, liquides aux hautes températures et pressions qui règnent au contact du manteau et de la lithosphère ; les magmas très siliceux ($\approx 75\%$), très visqueux, de type granitique se solidifient lentement en profondeur pour produire les roches plutoniques ; les magmas moins siliceux ($\approx 50\%$), assez fluides, de type basaltique, se solidifient rapidement en surface pour produire les roches volcaniques. Entre ces deux pôles, on pourrait en fait caractériser une variété continue de magmas, diversifiés selon leur teneur relative en silice et silicates ferromagnésiens, et donc de roches magmatiques.

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

c- Les roches métamorphiques : les roches métamorphiques sont issues de roches magmatiques et /ou sédimentaires retournées en profondeur par l'effet de la tectonique de plaques, recristallisées sans fusion selon la température et /ou la pression atteintes et revenues à la surface par érosion. [03]

I.2 Structure géométrique des massifs rocheux

I.2.1 Description des massifs rocheux

Formés d'une juxtaposition de matériaux hétérogènes, les massifs rocheux sont des Structures très complexes. Ils sont assimilés à un assemblage de blocs appelés matrice Rocheuse lesquels sont délimités par des discontinuités constituées de fissures, de fractures ou de failles ou encore de limites stratigraphiques [03].



Figure I.1. Structure géométrique d'un massif rocheux de calcaire au Nord du Liban [03].

Le comportement mécanique des massifs rocheux est un facteur déterminant dans le dimensionnement des ouvrages qui y sont exécutés. Afin de comprendre, expliquer et modéliser ce comportement, il est nécessaire de connaître la structure géométrique ou plus précisément le modèle de distribution géométrique des fractures, ainsi que les propriétés mécaniques de chacune des composantes que sont la matrice rocheuse et les discontinuités [03].

I.2.2 Aspect géologique

Afin d'étudier le comportement mécanique d'un massif rocheux, il est essentiel de connaître le degré de fracturation ainsi que la répartition des discontinuités dans l'espace. Pour un ensemble de massifs rocheux, les discontinuités constituent une superposition de différentes familles de fractures, disposant chacune de lois de distribution et des caractères statistiques différents. Ces derniers sont souvent déterminés par le biais de la méthode de projection stéréographique [03].

Divers auteurs ont essayé de regrouper les structures géométriques des massifs rocheux dans des catégories bien définies. Cela est illustré dans la figure I.2 pour une série de massifs

rocheux. Nous distinguons les massifs à blocs polyédriques, équidimensionnels, prismatiques ou en colonnes, les massifs à bancs minces dont l'épaisseur est moins épaisse que la longueur et les massifs comprenant plusieurs familles de fractures [03].

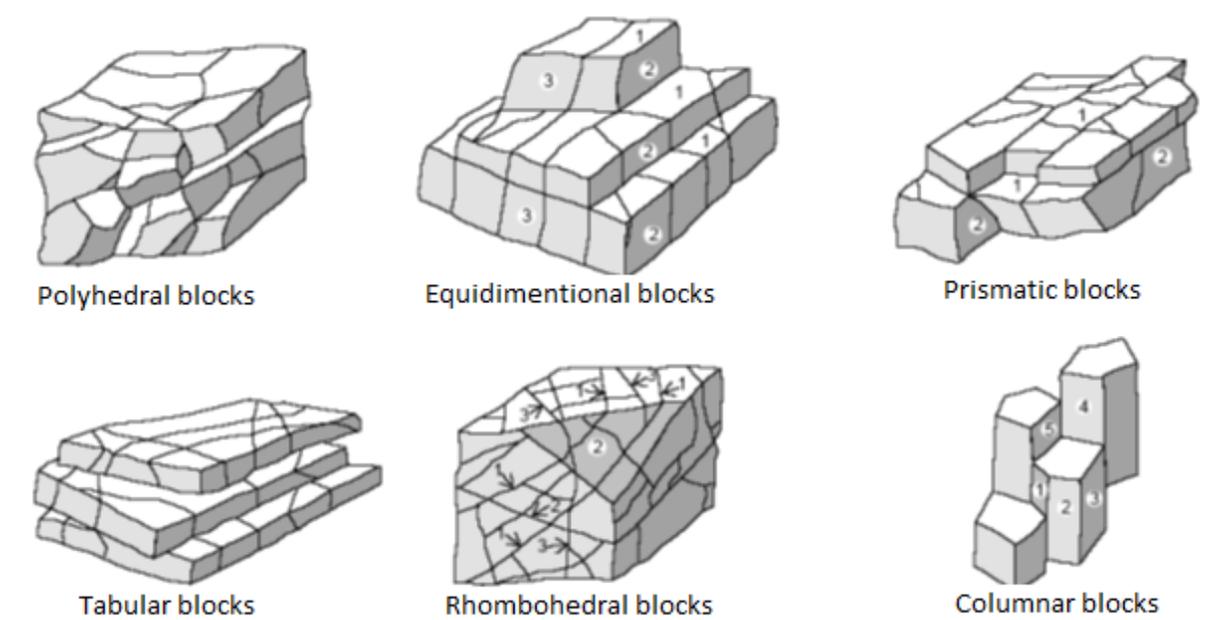


Figure I.2. Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés [03].

Le Manuel de Mécanique de Roche (CFMR-MMR [2000]) vient appuyer dans ce sens la définition des divers types déjà cités ci-dessous. Parmi plusieurs variantes plus complexes mais moins significatives, trois modèles géométriques principaux sont illustrés dans la (figure I.2).

- Certains granites ou calcaire massifs formés de blocs parallélépipédiques (Figure I.3-a), révèlent la présence de trois familles de fractures trirectangulaires pour lesquelles tous les plans de discontinuités sont continus. Toutefois, il faut noter que cette forme géométrique est très idéalisée. Des solutions analytiques existent déjà pour le calcul des propriétés mécaniques de tels massifs dont certaines seront présentées dans le chapitre suivant.
- Le schéma de la (Figure I.3-b) représente un massif sédimentaire dont l'une des directions prend davantage d'importance et les diaclases perpendiculaires sont moins continues. Cette définition peut correspondre à des calcaires à bancs minces, des alternances de marnes et de calcaires, degrés et de marnes des formations appelées flysch ou des roches schisteuses. Les observations montrent que l'espacement entre les bandes est souvent équivalent à la taille des diaclases ou à sa moitié. Ces types de massifs sont très courants mais non accessibles à des traitements analytiques simples ; le recours à des méthodes d'homogénéisation numérique nous semble très pertinent.

La structure de ces massifs est définie géométriquement par un nombre limité de paramètres que nous précisons dans le paragraphe suivant.

- Souvent situées dans des zones tectoniques, les roches écrasées comme les schistes et les brèches de faille présentent une direction d'anisotropie largement dispersée. Dans un tel type de massif, la précision d'un nombre bien défini de familles de fractures n'est pas évidente. Toutefois, des méthodes empiriques approximatives permettent le calcul de leurs propriétés mécaniques. [03]



Figure I.3. Types de structures des massifs rocheux [03].

I.3 Description des discontinuités

On définit une discontinuité dans un massif rocheux par une surface qui interrompt la continuité physique du milieu sain [04].

L'identification géologique, géométrique et mécanique des discontinuités, à toutes les échelles est indispensable dans l'étude de comportement du massif.

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

I.3.1 Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux

- De couper la roche en plaques, blocs et coins (libres de tomber et de bouger) ;
- D'agir comme plan de faiblesse pour le glissement ;
- De faciliter l'écoulement d'eau et créer des réseaux d'écoulement ;
- D'entraîner de grandes déformations ;
- De changer la distribution et l'orientation des contraintes [05].

I.3.2 Les familles des discontinuités

On distingue généralement :

a. Les joints stratigraphiques : ils marquent une discontinuité dans le phénomène de sédimentation des formations sédimentaires. Ils présentent une forte extension et souvent une faible ondulation [04].



Figure I.4. Les joints stratigraphiques [05].

b. Les diaclases: elles sont souvent perpendiculaires ou obliques aux joints de stratifications ou à la schistosité. Elles ne présentent pas de trace de mouvement et elles ont une extension limitée [04].



Figure I.5. Les diaclases.

c. Les fentes ou fractures d'extension : elles sont formées sous l'effet d'une traction qu'a subi le massif au cours des mouvements tectoniques. Elles sont souvent remplies de cristallisation de calcite ou de quartz [04].

d. Les failles : elles résultent de la rupture d'une zone du massif qui a subi un grand effort de cisaillement. Elles représentent ainsi des discontinuités séparant deux grandes entités du massif. Elles sont caractérisées par une grande extension et souvent un remplissage de matériau broyé et altéré, parfois des recristallisations [04].



Figure I.6. Les failles.

e. les plis : les plis sont le résultat de la flexion d'une strate rocheuse sous l'effet d'une force tectonique ou d'un mouvement.

Les plis ne sont généralement pas considérés comme éléments du massif rocheux. Ils sont souvent associés à un haut degré de fracturation et à des roches relativement faibles et tendres [05].



Figure I.7. Les plis [05].

f. la schistosité : La schistosité dans les roches métamorphiques, la forte compression a perturbé et transformé l'organisation des minéraux internes. Ceux-ci se sont alignés selon une direction orthogonale à la compression et ont entraîné la formation de plans de rupture préférentiels. L'ardoise, qui est fendue selon cette schistosité, en est une bonne illustration [06].



Figure I.8. La schistosité.

I.3.3 Les caractéristiques géométriques des discontinuités

La modélisation de la distribution spatiale et de l'emplacement des familles de fractures dans un massif rocheux fracturé est fondée principalement sur la connaissance des paramètres géométriques des discontinuités. Chacun de ces derniers est associé à une variable aléatoire dont les lois de distribution sont déduites des données acquises sur le terrain. Dans ce qui suit nous définissons sommairement chacun de ces paramètres. Cette définition est un préalable nécessaire à l'établissement de notre classification numérique.

A- Orientation :

Les orientations des discontinuités déterminent la forme de blocs individuels existant dans un massif rocheux et par suite elles sont responsables de leur anisotropie qui gouverne leur comportement hydraulique et mécanique.

Le pendage est l'angle que fait la ligne de plus grande pente avec l'horizontale. La direction, ou azimut, est l'angle que fait l'horizontale du plan de la discontinuité avec le Nord magnétique.

La distribution de l'orientation et du pendage est souvent représentée par une loi hémisphérique, normale ou log-normale. [02]

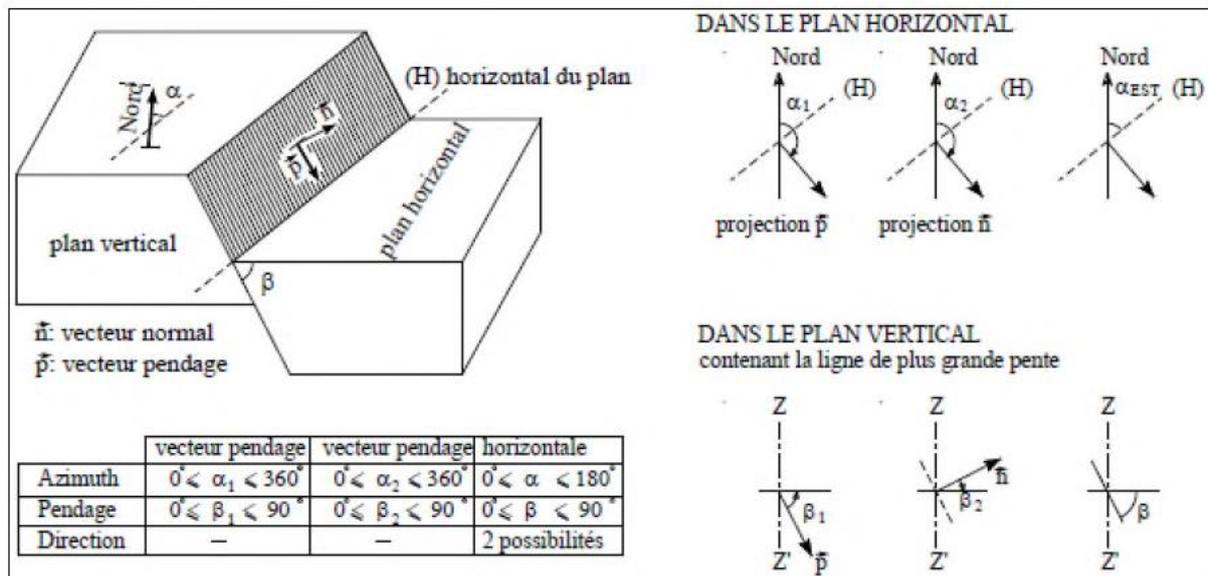


Figure. I.9 : Mesures de l'orientation du plan de discontinuité, différents types de repérage [02]

B- Extension :

La taille des fractures conditionne, avec leur orientation et leur espacement, leur probabilité d'intersection. Par conséquent, elle joue un rôle essentiel dans la connectivité des blocs. Une fracture est souvent assimilée à une forme géométrique simple dont une dimension

particulière définit son extension (exemple : diamètre d'un disque dans l'espace, longueur d'un segment dans un plan). Cette dimension n'est pas accessible directement ; il faut la déduire de la continuité des traces observées sur l'affleurement. Les diamètres peuvent suivre une loi exponentielle décroissante ou log-normale. [02]

C- Espacement :

C'est la distance moyenne qui sépare deux intersections successives d'une ligne droite, appelée également ligne d'échantillonnage, avec les traces de fractures d'un affleurement.

Cette grandeur dépend de la ligne de levé et de l'extension des discontinuités. En effet, pour un nombre constant de traces sur une surface, les traces longues ont plus de chances d'être intersectées par la ligne de levé et paraissent plus rapprochées. [02]

D- Densité :

Cette grandeur est en relation directe avec l'espacement. Les modèles géométriques des discontinuités décrivent leur position dans l'espace en précisant la localisation d'un point représentatif, par exemple, le centre d'un disque ou d'un segment qui est souvent ajusté par une loi uniforme. Le nombre de centres considérés dans un volume ou sur une surface définit, respectivement, la densité volumique et la densité surfacique des fractures. Quant à la densité linéique, elle est définie comme étant l'inverse de l'espacement ou le nombre d'intersections entre les discontinuités et la ligne d'échantillonnage. [02]

E- Ouverture :

Ce paramètre affecte largement la perméabilité des discontinuités et par suite leur comportement hydraulique. Il est défini comme étant la distance entre les deux épontes d'une discontinuité mesurée perpendiculairement à son plan moyen et il suit généralement une loi exponentielle décroissante ou log-normale. La détermination de l'ouverture est limitée souvent aux relevés examinés directement sur un affleurement ou sur des carottes de sondages. [02].

I.4 L'instabilité des talus et mouvement des terrains

I.4.1 Type des mouvements

I.4.1.1 Les mouvements lents et continus :

La déformation de ces mouvements est progressive, présente souvent des phases d'évolution lentes par fois accompagnées de rupture mais en principe d'aucune accélération brutale.

I.4.1.2 Glissements :

Les glissements de terrain sont des mouvements de masses compactes et/ou de terrain meuble glissant vers l'aval. Ils se produisent généralement dans des matériaux faiblement cohérent

(marnes, argiles ...). Les instabilités naturelles de ce genre sont extrêmement courantes et apparaissent sous de nombreuses formes.

Les principaux éléments morphologiques d'un glissement sont représentés sur la figure

I.10

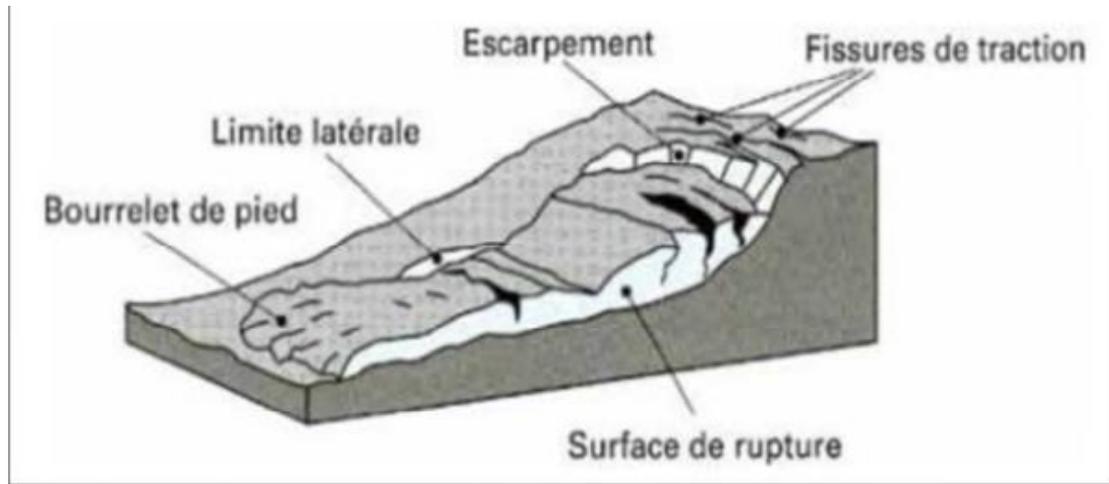


Figure I.10 : Principaux éléments descriptif d'un glissement de terrain. [07]

On définit deux grandes catégories de glissement selon la forme de la surface de rupture, on peut avoir :

les glissements plans et les glissements rotationnels. [07]

A. Glissements plans :

En général, la ligne de rupture suit une couche mince ayant de mauvaises caractéristiques mécaniques, et sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche appelée couche savon. [08]

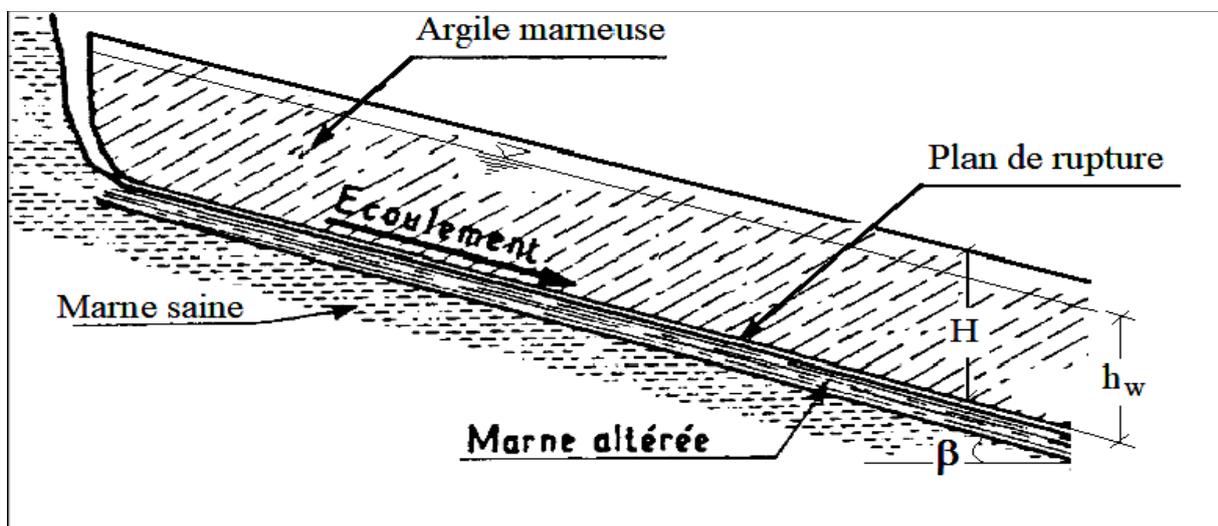


Figure I.11: Glissement plan. [08]

B. Glissements rotationnels :

Le terrain glisse le long d'une surface concave ayant la forme d'une cuillère. On distingue le glissement rotationnel simple et complexe (composé). [09]

a) Glissement rotationnel simple:

C'est le type de glissement le plus fréquent. La surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à une portion de cylindre.

Le plus souvent, la ligne de rupture peut être assimilée à un cercle : il s'agit alors d'un glissement circulaire. Si la ligne de rupture a une forme plus complexe, le glissement est appelé glissement non circulaire. [08]

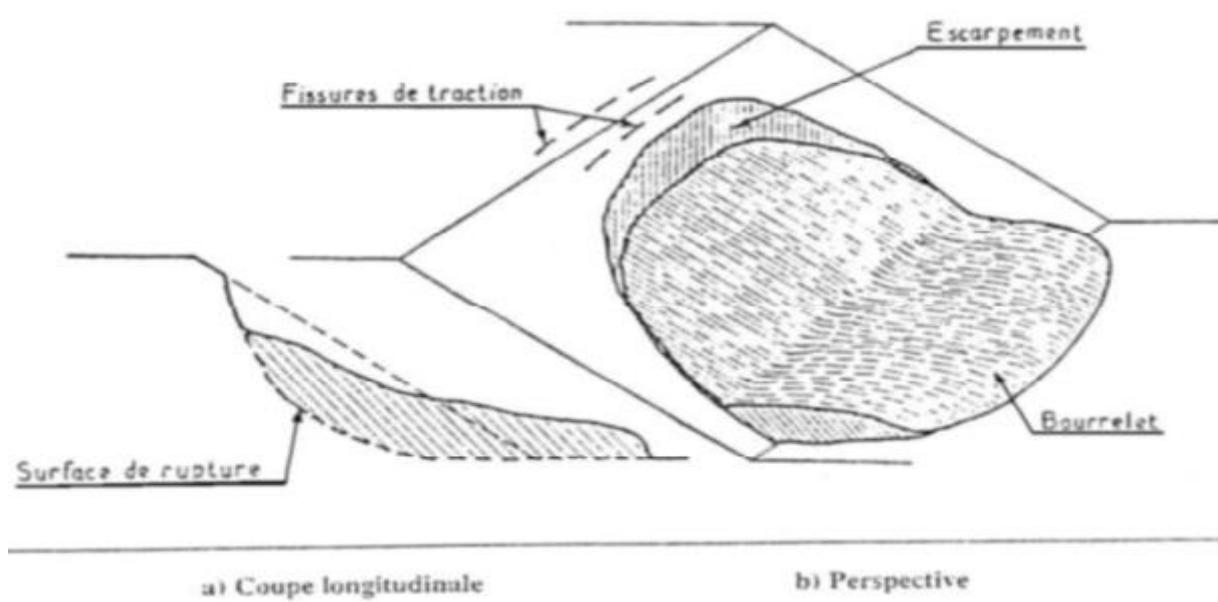


Figure I.12: Glissement rotationnel simple. [08]

b) Glissement rotationnel complexe:

Ce type de glissement résulte d'un emboîtement les uns dans les autres de glissements rotationnels simples, dont la surface de rupture globale est non circulaire (glissement par escalier) évoluant généralement dans les milieux hétérogènes et anisotropes. [10]

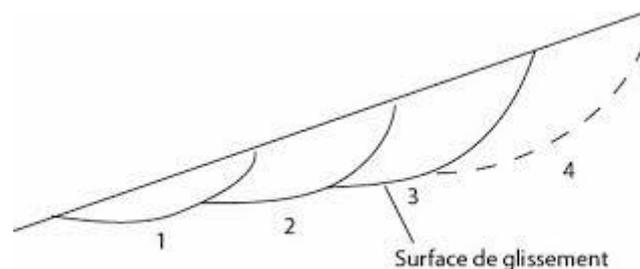


Figure I.13 : Glissement rotationnel complexe. [10]

I.4.1.3 Les affaissements :

Ils se caractérisent soit par une dépression topographique sans rupture apparente ou bien par une évolution de cavités souterraines dont l'effondrement est amorti par le comportement souple des terrains superficiels.

I.4.1.4. Les tassements :

Il s'agit d'une diminution de volume de certains sols (vases, tourbes, argiles...etc.), sous l'effet des charges appliquées et de l'assèchement. Ces phénomènes peuvent être de grande extension et affecter des agglomérations entières, par exemple : Mexico, construite sur des alluvions, s'est tassée de sept mètre depuis le début du siècle par exploitation excessive de la nappe d'eau. [07]

I.4.1.5 Fluage et solifluxion :

A. Fluage :

Les phénomènes de fluage correspondent à des mouvements lents dus à des sollicitations atteignant le domaine plastique donc proche de la rupture.

La figure I.14 montre une couche de marne argileuse surchargée par un massif calcaire limité par une falaise. La marne flue sous le poids excessif de la falaise calcaire, risquant d'entraîner la fissuration du banc calcaire peu déformable, voire l'écroulement de la falaise.

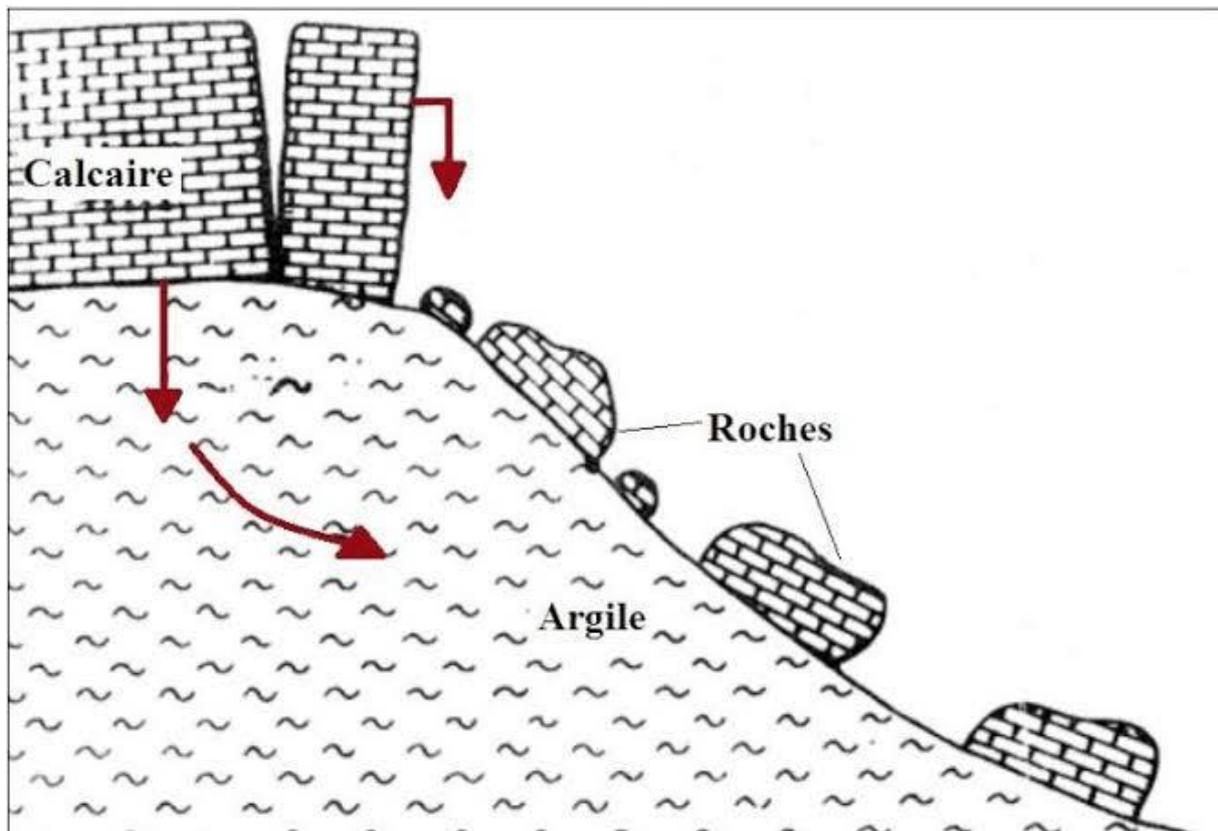


Figure I.14 : Exemple de fluage. [08]

B. Solifluxion :

Les phénomènes de la solifluxion représentent un des cas particuliers de fluage. C'est un phénomène superficiel provoqué par les variations volumiques du sol au cours des saisons (gel et dégel en montagnes, alternance de saisons sèches et pluvieuses).

Lorsqu'ils affectent des pentes, les mouvements alternés conduisent à une reptation du sol vers l'aval. La solifluxion se repère par la présence d'ondulations du sol et par l'inclinaison des arbres. [08]

I.4.1.6. Phénomènes de retrait gonflement des argiles:

Ils sont liés aux changements d'humidité des sols très argileux, qui sont capables de fixer l'eau disponible, mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse.

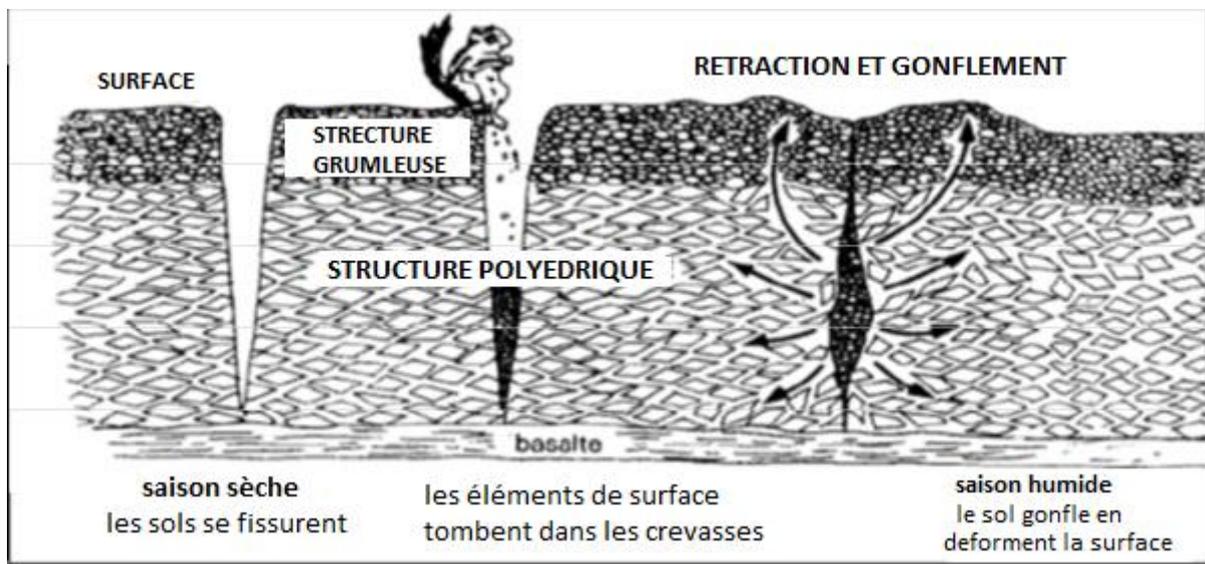


Figure I.15: Phénomène de retrait et gonflement des argiles. [08]

I.4.2 Les mouvements rapides :

I.4.2.1. Les écroulements et chute de blocs :

Sous les actions météoriques, et en particulier le mouillage et le gel, la surface d'une falaise peut se disloquer et des blocs se détacher. Ce phénomène est spectaculaire et dangereux mais rare.

Ils résultent de l'évolution de falaises allant, selon les volumes de matériaux mis en jeu, de la simple chute de pierres (inférieur à 0,1 m³), à l'écroulement catastrophique supérieur

À dix millions de m³ avec, dans ce dernier cas, une extension importante de matériaux éboulés et une vitesse de propagation supérieure à 100 km/h.



Figure I.16 : Exemple d'éroulement rocheux. [07]

I.4.2.2. Les éboulements :

Ce sont des ruptures brutales intéressant des masses rocheuses importantes qui, sont sollicités par la pesanteur. Au moment de la rupture, le rocher est généralement soumis à des contraintes très inférieures à sa résistance. La rupture n'est possible que grâce à une fissuration préexistante (figure I.17). [07]

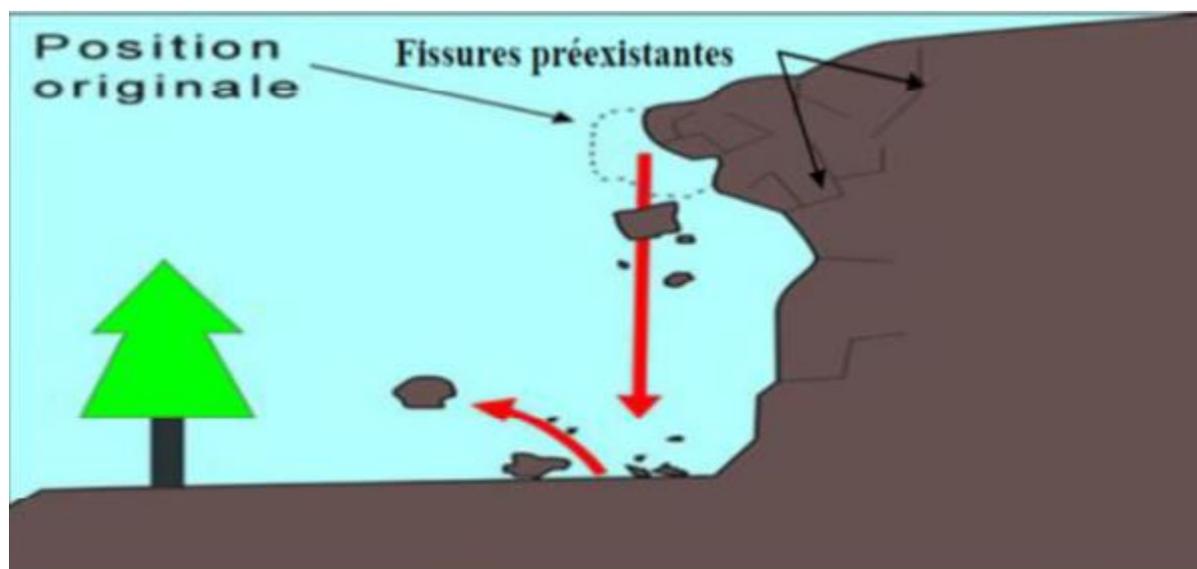


Figure I.17 : Eboulement d'un massif rocheux. [07]

I.4.2.3. Coulées de boue :

Les coulées de boue sont constituées d'un mélange de terrain meuble, de sol et d'eau, qui se déplace vers l'aval sous forme de masse généralement peu épaisse.

La teneur en eau des coulées de boue est supérieure à celle des glissements de terrain.

Moins compactes que les glissements, les coulées de boue se déplacent plus rapidement vers l'aval et peuvent donc avoir des conséquences dévastatrices subites. [11]

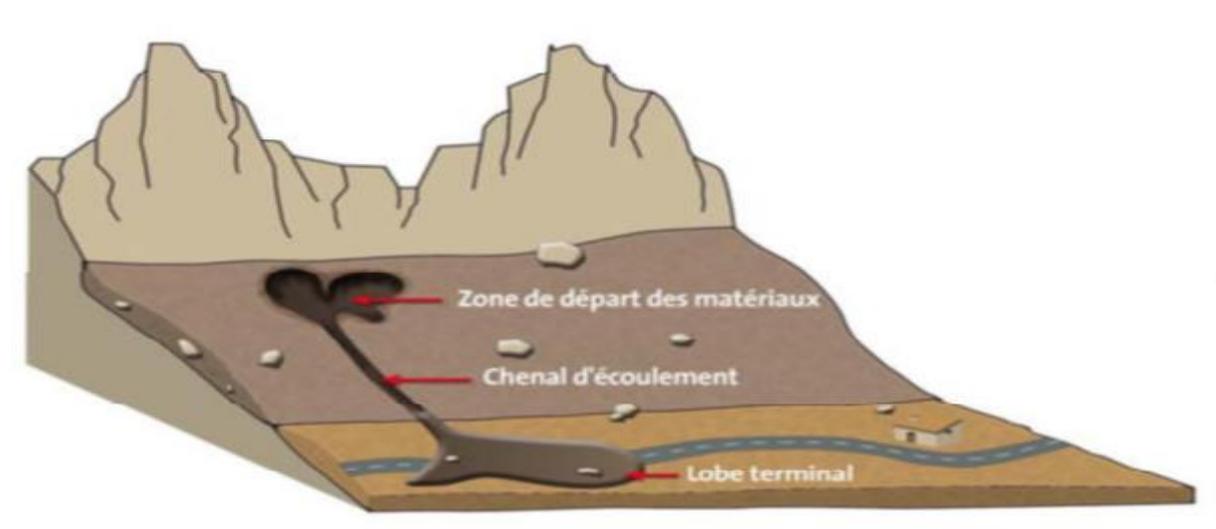


Figure I.18: Les coulées de boue. [11]

I.4.2.4. Les effondrements :

Les effondrements sont des écroulements subverticaux dus à l'évolution des cavités souterraines naturelles (résultant de la dissolution de roche, calcaire ou gypse) ou artificielles (carrières et ouvrages souterrains) peuvent entraîner l'effondrement du toit de la cavité et provoquer en surface une dépression généralement d'une forme circulaire (figure I.19). [07]

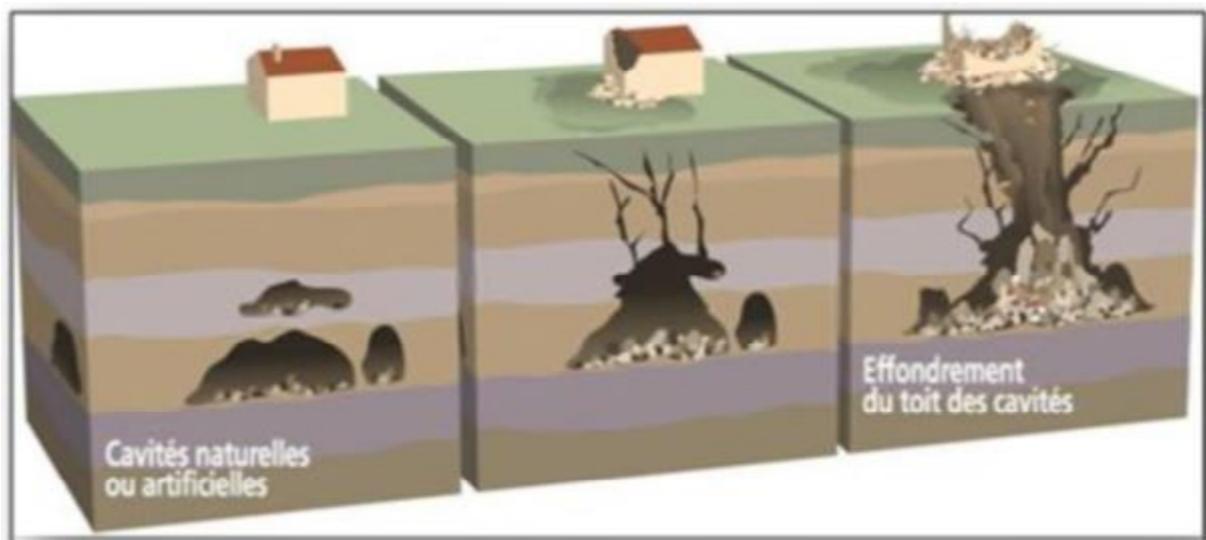


Figure I.19: Effondrement des cavités souterraines. [07]

I.5.Facteurs influant sur la stabilité des talus dans le domaine minier

De nombreux facteurs influent sur la stabilité des talus des gradins des carrières et des mines à ciel ouvert, et sur le mécanisme de leur déformation.

Chacun des facteurs prédétermine la stabilité du massif rocheux en fonction de la nature des liaisons structurales des roches et de la nature du matériau rocheux.

Selon la nature et la structure du matériau rocheux, on distingue trois types essentiels de roches :

- ✓ Roches à liaison rigides ;
- ✓ Roches tendres mais cohérentes ;
- ✓ Roches élastiques.

I.5.1. Facteurs géologiques (état de contrainte)

- ❖ Structure du massif rocheux ;
- ❖ Propriétés chimiques, physique et mécaniques des roches.

I.5.2.Facteurs hydrogéologiques (pression hydrostatique)

- ❖ Présence de nappe aquifère ;
- ❖ Pression des pores ;
- ❖ Dissolution.

I.5.3. Facteurs géotechniques.

- ❖ Résistance de la roche au cisaillement ;
- ❖ Cohésion de la roche ;
- ❖ Angle de frottement interne.

I.5.4. Facteurs technologiques

- ❖ Angle initial du talus de gradin ;
- ❖ Hauteur de gradin ;
- ❖ Plate-forme de travail ;
- ❖ Incidences des travaux de fragmentation ;
- ❖ Vitesse d'avancement des travaux d'extraction...

I.5.5. Facteurs géographiques (précipitation atmosphérique)

- ❖ Relief (horizontal, montagneux...) ;
- ❖ Température des roches ;
- ❖ Température de l'air. [12][13]

1.6 .méthodes d'évaluation de stabilité des talus

L'analyse de la stabilité des ouvrages en terre se fait traditionnellement au moyen des méthodes de calcul à la rupture qui donnent par facteur de sécurité (FS). Plusieurs méthodes divisées en trois groupes principales, existent afin d'analyser la stabilité de talus à ciel ouvert. Plusieurs d'entre elles permettent de prendre en compte de nombreux facteurs géologie,

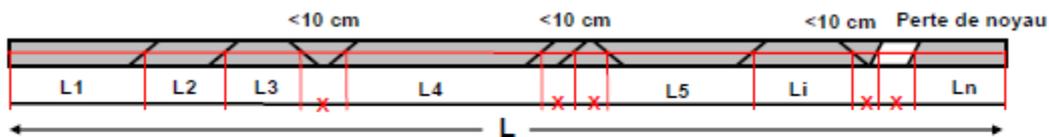
technique et géométrique. Ces principaux groupes sont les méthodes empiriques (Système de classification géomécanique:RQD, RMR, SMR..., analytiques (Projection stéréographique ,Méthode équilibre limite...) et numériques (Plaxis, Flac,Udec...),[26]

I.6.1. Méthodes empiriques

1.6.1.1. Rock Quality Designation (RQD):

Deere (1964) propose un paramètre évaluant la qualité du roc de la masse rocheuse selon un index intitulé RQD (Rock Quality Designation). Obtenu à partir de carotte de forage géologique, cet indice représente l'évaluation du pourcentage des carottes récupérées sur une longueur de course précise. Basée sur un procédé qualitatif, seule la somme des longueurs de morceaux de plus de 10 Cm est conservée et cette somme est divisée par la longueur de course de la carotte de forage. Ce paramètre est défini comme suit [15] :

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



$$RQD = (L1 + L2 + \dots + Ln) / L \times 100\%$$

Figure I.20: Schéma explicatif - méthode du calcul de RQD. [15]

Deere et al. (1967) affirment que le RQD s'avère utile pour déterminer le facteur de réduction du module de déformation de la roche intacte à la masse rocheuse. [16]

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.1 ci-dessous.

Tableau I.1.Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux [15].

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

Il existe aussi des méthodes alternatives pour estimer l'indice RQD autre que par l'utilisation de carottes de forage géologique. Priest et Hudson 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 [17] :

$$\mathbf{RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)} \quad (\text{I.2})$$

Lorsqu'aucun forage géologique n'est disponible, cette corrélation s'avère très utile [18].

La méthode suivante est proposée pour un massif rocheux sans remplissage d'argile. Proposé par Palmström (1982), l'indice RQD peut être indirectement déterminé par le nombre de joints/discontinuités par unité de volume pour définir la somme volumétrique des joints (J_v) caractérisant la surface du massif rocheux [19]:

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

$$\mathbf{\text{Pour } J_v < 4,5 \text{ le RQD} = 100.} \quad (\text{I.4})$$

Le système de classification RQD se base sur des forages géologiques standard et sa plus grande force retombe sur sa simplicité, la vitesse d'acquisition et aussi qu'il est peu coûteux.

Le RQD doit être interprété comme un indice de qualité du massif lorsque la roche présente des caractéristiques problématiques comme un haut degré de détérioration et se présente par un comportement ductile, une zone de cisaillement ou un massif fracturé (Deere et Deere, 1988). Ceci signifie que l'indice RQD est seulement capable d'évaluer la partie intacte du massif rocheux.

I.6.1.2. Système RMR (Rock Mass Rating)

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

Le RMR résulte de la somme de cinq notes de caractérisation (d'A1 à A5) et d'une note d'ajustement. Ces paramètres sont illustrés sur la (figure I.21).

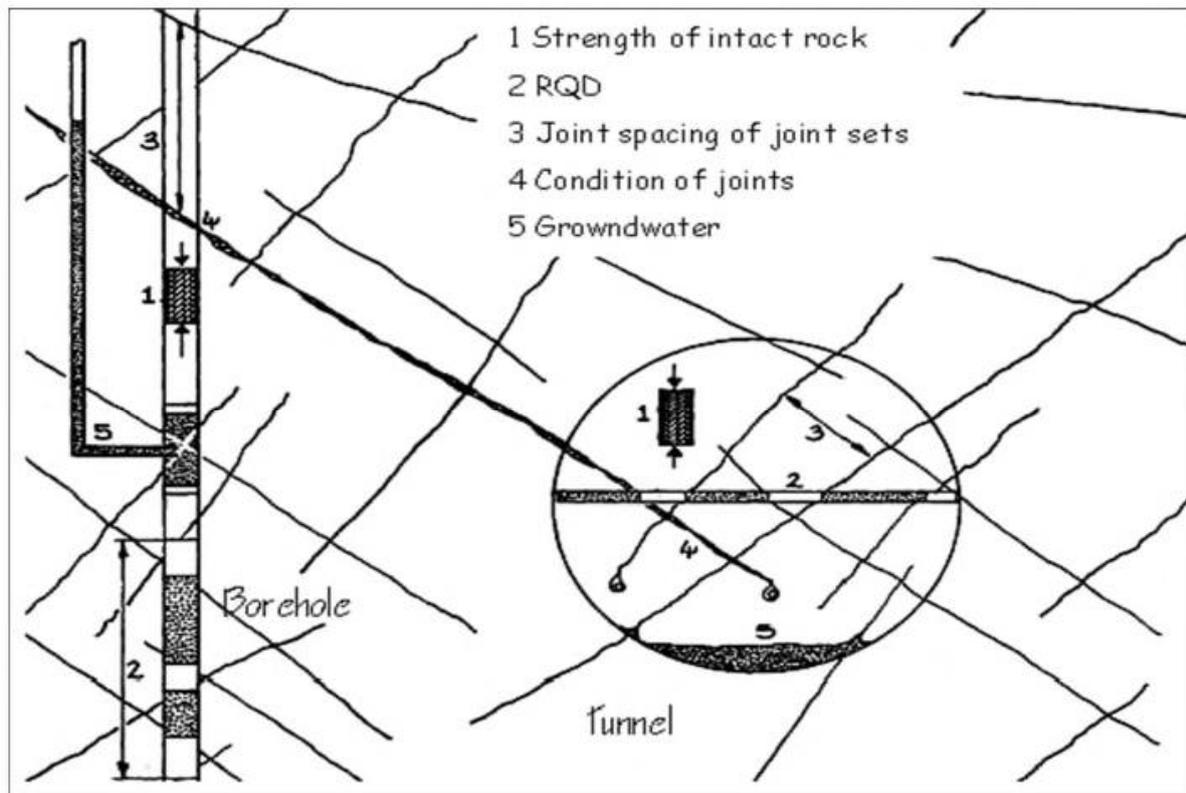


Figure I.21. Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR [3].

La somme de ces notes attribue une valeur comprise entre 0 et 100 au massif. Cette valeur utilise à plus de 70% la fracturation et elle accorde 15% d'influence aux propriétés de la matrice rocheuse et 15% à la présence d'eau [16].

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

- A1 (Strength of intact rock material) : la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse est obtenue, soit par procédure d'écrasement d'un échantillon, soit par procédure de chargement ponctuel (note : de 0 à 15).
- A2 (Rock Quality Designation RQD): il caractérise la qualité des carottes de sondage en calculant le rapport entre la longueur cumulée des carottes supérieures à dix centimètres et la longueur totale considérée (note : de 3 à 20).
- A3 (Spacing of discontinuities) : dans le cas de plusieurs familles de fractures le minimum des notes attribuées à l'espacement des fractures est considéré (note : de 0 à 20).
- A4 (Conditions of discontinuities) : cet indice caractérise l'extension, l'ouverture, la rugosité, le matériau de remplissage et l'altération des épontes des discontinuités (note : de 0 à 30).
- A5 (Groundwater conditions) : Il est en rapport avec les conditions hydrogéologiques et consiste à réaliser des mesures de flux d'eau ou de pressions interstitielles des joints (note : de 0 à 15).

- **B** (Ajustement for joint orientation) : c'est un facteur correctif qui est en rapport avec l'effet de l'azimut et du pendage des familles de discontinuités sur la stabilité de l'ouvrage (note : de -12 à 12 pour les tunnels, de -25 à 0 pour les fondations et de -60 à 0 pour les talus).

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

Le RMR89s'écrit alors :

$$\mathbf{RMR89 = A1+A2+A3+A4+A5+B} \quad (\text{I.5})$$

Chacun des paramètres précédents aura une note, la somme des notes, après avoir été ajustée par une note relative à l'orientation (ANNEXE A):

I.6.1.3. Système Q

L'indice Q est le paramètre central d'une méthode développée par le NGI (Norwegian Géotechnical Institute) en 1974, à partir des données issues de la réalisation de plus de 200 tunnels, majoritairement situés dans le cristallin du bouclier scandinave à contraintes horizontales élevées (Barton et al, 1974). Cette méthode a été réactualisée en 1993 par la prise en compte de plus de 1000 cas de tunnels (Grimstad et Barton, 1993). [20]

La méthode appelée Q-système permet l'estimation quantitative des soutènements nécessaires à la stabilité d'une excavation à partir d'éléments suivants :

- ❖ La dimension principale (diamètre) de l'excavation à réaliser ;
- ❖ L'utilisation projetée de futur ouvrage (implicitement du niveau de risque accepté) ;
- ❖ La valeur de l'indice Q du massif rocheux.

L'indice Q est une note globale variant de 0.001 à 1000 (intervalle théorique réduit entre 0.005 et 50 dans la plupart des cas pratiques) calculer à partir des six paramètres suivants (annexe B) :

- **RQD** : Rock Quality désignation index ;
- **J_n**: Note basée sur le nombre de familles de discontinuités ;
- **J_r** : Note basée sur la rugosité des discontinuités est plus défavorable ;
- **J_a**: Note basée sur le degré d'altération des discontinuités ou leur remplissage (discontinuités les plus altérées) ;
- **J_w**: Facteur prenant en compte les arrivées d'eau potentielles (débit et pression) ;
- **SRF** : Coefficient d'ajustement en fonction des discontinuités ;

L'indice Q de Barton s'exprime par :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{I.6})$$

La valeur de Q est donc le produit de trois coefficients portant sur :

- La taille potentielle des blocs rocheux ;
- La qualité mécanique des contacts entre blocs ;
- L'état initial du massif par rapport à l'eau et aux contraintes ;

Tableau I.2. Comparaison des utilisations du RMR et du Q-system dans le domaine des travaux souterrains. [21]

	RMR	Q-système
Caractérisation globale du massif rocheux	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne pris en compte de l'organisation de la fracturation, sauf pour les massifs rocheux anisotropes (schistes, ardoise...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne pris en compte des propriétés mécanique des discontinuités • Prise en compte des contraintes naturelles
Evaluation des caractéristiques mécanique à l'échelle du massif	<ul style="list-style-type: none"> • Existence de relations empiriques liant RMR aux paramètres de déformabilité et de résistance 	<ul style="list-style-type: none"> • Existence de la relation empirique liant Q et paramètre physiques et mécanique (vitesse des ondes longitudinales, déformabilité)
	<ul style="list-style-type: none"> • utilisation nécessitant une très grande prudence, en particulier pour les paramètres de résistance : proscrire les corrélations en cascade type Q → RMR → (m, s) → (C, φ) 	
Utilisation pour les ouvrages	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte de l'orientation des discontinuités par rapporte à l'ouvrage. • Définition rapide de la longueur de volée. • Définition du temps de tenue sans soutènement (rapproche conservative) • Ne prend pas en compte la méthode d'excavation 	<ul style="list-style-type: none"> • Non prise en compte de l'orientation des discontinuités par rapport à l'ouvrage • Définition rapide des soutènements à mettre en œuvre (voute, parements & intersections) mais fausse impression de précision concernant la longueur des boulons • Utilisation en phase amont (projet) et aval (suivi de creusement) • Prise en compte de l'évolution des techniques de soutènement

Tableau I.3. Classification de massif en fonction de la valeur Q [22].

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

I.6.1.4. Le Géological Strenght Index (GSI):

Introduit par Hoek et al. [1995] puis amélioré par Hoek et Brown [1997], le Geological

Strength Index ne présente pas une classification géomécanique en soi. Cependant, il constitue un lien entre le RMR (Q-system) et la détermination des paramètres de déformabilité et de résistance des massifs rocheux.

Afin d'estimer le GSI, il est nécessaire de calculer le RMR de base et le Q' qui sont des valeurs modifiées de RMR et de Q. Le RMR de base 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).

$$\text{RMR}_{\text{base}} = A1 + A2 + A3 + A4 + 15 \quad (\text{I.7})$$

De même, Q' se calcule en ne tenant pas compte de l'état initial du massif par rapport à l'eau et aux contraintes (Jw/SRF).

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} \quad (\text{I.8})$$

Ayant calculé RMR' et Q' le GSI se détermine comme suit :

$$\text{GSI} = \text{RMR}' - 5 \text{ si } \text{RMR}_{89} > 23 \quad (\text{I.9})$$

$$\text{GSI} = 9 (\log Q' + 44) \text{ si } \text{RMR}_{89} \leq 23 \quad (\text{I.10})$$

L'estimation du GSI s'appuie sur une observation directe de la structure du massif rocheux à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in situ. Cet indice varie entre 5 et 85.

Par définition, les valeurs proches de 5 correspondent à des matériaux de très mauvaise qualité, tandis que les valeurs proches de 85 décrivent des matériaux d'excellente qualité. [23]

Tableau I.4. Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI [3].

Valeur du GSI	76-95	56-75	41-55	21-40	<20
Qualité De massif Rocheux	Très bonne	Bonne	Moyenn e	Mauvaise	Très Mauvaise

I.6.1.5. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)

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. Quoique pouvant prendre des valeurs très élevées (et pouvant donc intervenir de manière prépondérante dans la valeur finale du RMR), ce paramètre n'avait en effet pas fait l'objet d'une définition quantitative de la part de Bieniawski dans ce cas, contrairement à ce qui a été fait, par exemple, pour les tunnels.

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 :

$$SMR = RMR_{basic} + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4 \quad (I.11)$$

Pour chaque paramètre, Romana a donné un tableau d'indices similaires à ceux de Bieniawski, mais il a donné aussi des formules empiriques pour F1 et F2. Voici la signification de ces paramètres selon Romana :

- 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:

$$F1 = (1 - \sin(A))^2 \quad (I.12)$$

Expression dont laquelle 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 :

$$F2 = \tan(\beta_j) \quad (I.13)$$

Où β 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 ;
- Les différentes expressions et les indices attribués à chacun de ces paramètres ainsi que les classes de SMR sont illustrés par les tableaux 3.4 et 3.5. [24]

Tableau I.5: Notes des paramètres SMR (Romana, 1993) [24]

TYPE OF FAILURE		VERY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	UNFAVORABLE	VERY UNFAVORABLE	
P	A	$ \alpha_j - \alpha_s $	$>30^\circ$	30-20°	20-10°	10-5°	$<5^\circ$
T							
W							
P/T/W	F ₁		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/W	B	$ \beta_j \text{ ó } \beta_i $	$<20^\circ$	20-30°	30-35°	35-45°	$>45^\circ$
P/W			0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F ₂		1.00				
P	C	$\beta_j - \beta_s$	$>10^\circ$	10-0°	0°	0-(-10°)	$<(-10^\circ)$
W			$\beta_j - \beta_s$				
T			$\beta_j + \beta_s$	$<110^\circ$	110-120°	$>120^\circ$	-
P/T/W	F ₃		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.6. Description des classes SMR (Romana, 1985)[24].

Description des classes SMR										
Classe	Va	Vb	IVa	IVb	IIIa	IIIb	IIa	IIb	Ia	Ib
Description	Très mauvais		Mauvais		Moyen		Bien		Très bien	
Stabilité	Complètement Instable		Instable		Partiellement Stable		Stable		Complètement stable	
Rupture	Grand plan		n ou grand dièdre		Quelques joints ou beaucoup de Dièdres		quelques blocs		Aucune	
Support	Réexcavation		Importante corrective		Systématique		Occasionnel		Aucun	

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

I.6.1.6. Commentaires sur les systèmes de classification

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

Ces méthodes sont facilement utilisées au stade de l'avant-projet. Cependant elles présentent certaines limites que nous résumons ci-dessous [14] :

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

Dans le domaine minier où le dimensionnement des chantiers et le temps de soutien nécessaire jouent un rôle important, les systèmes de classification classiques se sont avérés

Inaptes principalement dû à leur grande imprécision pour la description du massif rocheux et pour leurs suggestions en support de terrain [22].

I.6.1.7. Les buts des systèmes de classification des massifs rocheux

La classification géomécanique consiste à quantifier un massif rocheux par une note empirique décrivant sa qualité par une série de termes allant d'un très bon rocher à un rocher très médiocre.

Les buts principaux de ces classifications se résument comme suit:

- Estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d'un massif fracturé, en particulier son module de déformation, sa résistance à la compression simple, sa cohésion et son angle de frottement interne.
- Estimer le temps durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement (stand-up time). C'est un indice très essentiel dans la détermination de la portée d'excavation.
- Donner des recommandations de soutènement des ouvrages [14].

I.6.2. Méthodes analytiques

Il est entendu par approches analytiques, les méthodes pouvant analyser la stabilité d'un ouvrage en tentant de représenter les mécanismes pouvant mener à sa rupture, moyennant souvent quelques hypothèses. Par exemple, elles négligent presque toujours les déformations, les contraintes in situ et la rupture dans la roche intacte (Stead et al, 2006). Ainsi, les approches analytiques sont le plus souvent utilisables dans le cas de problèmes simples. En réalité, ces cas sont plutôt rares. Pour des problèmes plus complexes, les simplifications et hypothèses nécessaires à ces approches rendent l'analyse peu fiable. Toutefois, aujourd'hui, plusieurs de ces analyses peuvent être faites à l'aide de logiciels ce qui rend leurs utilisations beaucoup plus rapides et plus accessibles. Il s'agit d'ailleurs de leurs principaux avantages. Parmi les principales approches analytiques utilisées dans l'analyse de stabilité des pentes à ciel ouvert, notons les approches cinématiques utilisant les analyses stéréographiques qui examinent le risque de glissement de blocs rigides et les analyses en équilibre limitent par tranches. [26]

I.6.3. Méthodes numériques

Dans les massifs rocheux, l'utilisation des modèles numériques est souvent nécessaire pour bien prendre en compte des cas plus complexes (majoritairement discontinus, anisotropes, hétérogènes et ont des comportements non linéaires). [27]

Le concept principal des approches numériques est de diviser le domaine et les différentes géométries complexes en plusieurs petits éléments possédant une géométrie simple pour laquelle les déplacements peuvent être facilement calculés.

Les méthodes d'analyses numériques les plus couramment utilisées en mécanique des roches sont les méthodes continues, les méthodes discontinues et les méthodes hybrides des deux précédentes. [28]

I.7. Calcul facteur de sécurité (Fs)

Pour le but d'évaluation de la stabilité d'une pente, l'ingénieur doit choisir entre plusieurs définitions du coefficient de sécurité, ce coefficient peut être un rapport de forces, de moments, de grandeurs par rapport à une grandeur limite. Le principe de calcul consiste à déterminer le facteur de sécurité FS par lequel il faut diviser la résistance de la surface de glissement pour que la masse potentiellement stable soit à la limite de l'équilibre.

$$FS = \frac{\text{somme des forces résistantes ou moments résistants}}{\text{somme des forces motrices ou moments de mouvement}} \quad (I.14)$$

Tableau I.7. Equilibre des talus en fonction des valeurs théoriques du coefficient de sécurité.[14]

Facteur de sécurité (Fs)	Etat de l'ouvrage
$F_s < 1$	Danger
$F_s = 1$	Stabilité limite
$1 \leq F_s \leq 1.25$	Sécurité contestable
$1.25 \leq F_s \leq 1.40$	Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants mais par contre c'est une sécurité contestable pour les talus des carrières à ciel ouvert.
$F_s > 1.4$	Sécurité satisfaisante

A l'issue des expériences, une classification a été proposée par la société internationale de la mécanique des roches qui est la suivante :

Tableau I.8. Equilibre des talus en fonction des valeurs expérimentales du coefficient de sécurité. [29]

$F_s < 1$	talus instable
$1 < F_s < 1,5$	glissement possible
$F_s > 1,5$	généralement stable

I.7.Conclusion

Les massifs rocheux sont présentés comme un milieu discontinu, composé de discontinuités et de la matrice rocheuse. La présence des discontinuités peut avoir une grande influence sur le comportement et la structure du massif. L'étude des massifs rocheux ne sont donc pas seulement basée sur la caractérisation de la roche saine, mais on doit se basé sur la caractérisation géométrique des discontinuités.

L'instabilité du talus et les méthodes d'évaluation de la stabilité à la rupture consistent à considérer l'ensemble des facteurs qui influent sur la stabilité et les forces qui assurent l'équilibre d'un certain volume de sol ou de roche dans le talus. Elles font l'hypothèse que la résistance maximale au cisaillement du sol ou de la roche est mobilisée simultanément tout le long de la surface de rupture. L'état de stabilité du talus est caractérisé par un facteur de sécurité FS qui calculé par différents méthode.

CHAPITRE II

CHAPITRE II: Description des sites et conditions géologiques et minières du gisement de calcaire d'Ain El Kebira

Introduction

L'étude de la stabilité des talus des mines à ciel ouvert tient en compte de la stratigraphie et de la lithologie du site à étudier, la présence d'une nappe d'eau qui traverse le site ainsi que de la tectonique du gisement.

Dans ce présent chapitre, nous avons éclairci toute information relative aux Conditions géologiques, hydrogéologiques et minière du gisement de calcaire d'Ain Kebira.

Présentation de l'entreprise

La société des ciments d'Ain El Kébira est une société par action, filiale du groupe GICA détenteur à 100% de son capital social qui s'élève à 2 200 000 000 DA.

Bâtie sur une superficie de 24 hectares, la cimenterie se trouve à 20 km au nord-est du chef-lieu de wilaya de Sétif et à 07 km au sud de la daïra d'Ain El Kébira, dont les coordonnées géographiques :

- Longitude (Greenwich) 5° 27' E,
- Latitude nord 36° 20'
- Altitude 1040 mètres.

Le siège de la direction générale se trouve dans la ville de Sétif à la cité Boucharda, rue ABACHA Ammar.

Avec une capacité contractuelle (installée) de production de 1 000 000 tonnes de ciment portland (CPA) par an, la société fabrique actuellement :

- Le ciment Portland aux ajouts CPJ : CPJ-CEM II/A 42.5 NA 442
- Le ciment résistant sulfate CRS : CPA-CEM I-42,5 ES NA 443



Figure II-1: photo de l'entreprise

L'étude de la stabilité des talus des mines à ciel ouvert tient en compte de la stratigraphie et de la lithologie du site à étudier, la présence d'une nappe d'eau qui traverse le site ainsi que de la tectonique du gisement.

Dans ce présent chapitre, nous avons éclairci toute information relative aux Conditions géologiques, hydrogéologiques et minière du gisement de calcaire d'Ain Kébira.

II.1 Etude géologiques du gisement

II.1.1 Situation géographique du gisement d'Ain El Kébira

La wilaya de Sétif est située dans la partie Nord-est du pays soit à 300 km d'Alger. Elle EST délimitée:

- Au Nord par la wilaya de Bejaia et Jijel.
- A l'Est par la wilaya de Mila.
- Au Sud par les wilayas de Batna et M'silla.
- A l'Ouest par la wilaya de Bordj Bou Arreridj.



Figure II-2: Situation géographique de la carrière d'Ain kebira

Le périmètre de calcaire « Djebel Medjounes » correspond à la partie Sud et sud-est du djebel Medjounes. Il se situe à 22 km au Nord Est de la wilaya de Sétif, à 6 km de la localité d'Ain El Kébira et à 11 km au Nord-Ouest de Béni Fouda. Administrativement, il est rattaché à la commune de Béni Fouda, daïra de Djemila, wilaya de Sétif. Les coordonnées UTM N.S Fuseau 31 des points limites du périmètre de permis d'exploitation sont consignées dans le tableau II- 1 suivant :[25]

Tableau II-1 : limites du périmètre de permis d'exploitation :

Points limites	Cordonnées UTM	
	X	Y
1	724 900	4022 400
2	725 900	4022 400
3	725 900	4021 300
4	725 800	4021 300
5	725 800	4021 100
6	725 700	4021 100
7	725 700	4021 000
8	725 600	4021 000
9	725 600	4020 900
10	725 500	4020 900
11	725 500	4020 800
12	725 400	4020 800
13	725 400	4020 600
14	725 300	4020 600
15	725 300	4020 500
16	724 100	4020 500
17	724 100	4020 600
18	723 700	4020 600
19	723 700	4021 200
20	724 900	4021 200

Superficie : 243 ha



Figure II-3: vu sur la carrière

II.1.2 Climat de la région

- La Wilaya est caractérisée par un climat de type continental semi-aride avec des étés chauds et des hivers rigoureux.
- Les pluies hivernales sont torrentielles et responsables d'une importante érosion.
- En été les précipitations sont pratiquement nulles et les chaleurs sont très importantes et responsables de nombreux incendies.
- Partout les pluies sont irrégulières d'une année à l'autre inégalement réparties.
- La région montagneuse reçoit environ 700 mm de précipitations en moyenne annuellement.
- La région des hautes plaines reçoit 400 mm de précipitations.

La moyenne annuelle des pluies est de l'ordre de 300 mm dans la lisière Sud et Sud-Est.

Tableau II-2: Précipitation annuelle année 2020. [25]

Mois	Fan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Moy (mm)	47.0	44.0	32.6	40.0	39.9	20.1	3.7	23.4	20.0	30.0	21.0	55.9

La Wilaya est moyennement ou peu gélifiée ; néanmoins, la zone montagneuse est la plus gélifiée de la Wilaya.

Durant la saison froide, la Wilaya enregistre des chutes de neige bénéfiques aux sols, l'altitude élevée maintient les neiges jusqu'au mois de Mars et même Avril de certaines années.

Au cours de la saison printanière, les gelées blanches font des ravages sur les hautes plaines et influent négativement sur la production agricole.

Les températures sont élevées au cours de la saison estivale, en particulier les mois de Juillet et août, par contre elles sont basses pendant l'hiver notamment au mois de Décembre et Janvier.

- **Températures :**

Tableau II-3: Températures année 2020. [25]

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Moy T (C°)	4.9	5.0	8.4	12.0	15.7	22.4	26.2	24.4	20.4	14.7	9.9	5.6

- **Humidité de l'air :**

Tableau II-4 : Humidité de l'air 2017. [25]

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Moy	75.4	79.6	75.5	67.2	63	47.1	36.1	46.1	57.9	68.5	77.4	82.7

II.1.3 Stratigraphie de la région du Djebel Medjounes:

Le bassin de Sétif et ses encadrements se composent presque exclusivement des roches sédimentaires qui datent de l'ère secondaire, du tertiaire et du quaternaire.

Dans toute l'ère secondaire, dans l'Eocène et dans le Miocène, les roches sont d'origine marine et lagunaire.

Les sédiments continentaux se trouvent dans l'Oligocène, dans le pliocène et dans le Quaternaire.

La litho stratigraphie de la région se présente comme suit :

- **Quaternaire** : Alluvions, éboulis.
- **Pliocène** : Conglomérats, poudingues, argiles gypseuses, *amas* de galets et argiles.
- **Miocène** : Marnes bleues et grises très fossilifères.
- **Eocène** : Marnes noires, brunes ou grises, calcaires massifs et marnes schisteuse noires.
- **Crétacé** : Calcaires, marnes sombres et grises, argiles et gypses.
- **Trias** : Mélange de gypse et d'argile [25]

II.1.4 Stratigraphie et paléogéographie

La région d'étude se caractérise par deux nappes nettement prononcées, constituées des roches du crétacé et du paléogène. Ainsi du Nord au Sud on peut distinguer :

- ✓ L'unité tellienne.
- ✓ La nappe de Djemila.

L'unité tellienne est peu développée en surface. On y retrouve les signes caractéristiques tels que la schistosité et la semelle du trias gypseux.

La nappe de Djemila couvre une grande étendue. Y sont observés des plis couchés de la barre calcaire faisant aboutir à la vaste structure anticlinale du Djebel Medjounes.

La région a connu de forts mouvements et d'importants chevauchements des structures telliennes qui se sont produits vers le sud au miocène.

La période du trias au luthétien a connu l'existence du bassin marin qui a donné naissance à de puissantes assises avec prédominance de roches de composition carbonatée-argileuse.

L'éocène et l'oligocène correspondent à la période de régression marine générale.

Au burdigalien, la transgression marine a envahi une étroite bande dans la région de Béni Aziz par la suite la mer s'est définitivement retirée.

II.1.5 Géologie du gisement

La stratigraphie du massif du Djebel Medjounes et de son voisinage se caractérise par la présence de membres stratigraphiques Triasique, Crétacé, Tertiaire et Quaternaire.

Les différents facies constituant le gisement étudié sont en majeure partie du crétacé supérieur.

On observe plusieurs variétés de faciès révélés par les travaux de sondage qui sont représentées par :

- Une série calcaire qui présente une texture finement cristalline, de couleur variant du gris au gris brunâtre, intercalée parfois par des lits de roches marneux à faiblement marneux de 1 à 4m de puissance. L'épaisseur de cette série calcaire est légèrement supérieure à 10 m. Elle est observable dans la partie Sud-ouest et Nord du gisement et elle est recoupé par les sondages S18 (7.20 à 18), 520 (3.80 à 10.70m), S 21. 531, 530 (5.0 à 13).
- Une série de calcaire présentant une texture souvent compacte à rares joints contournés bitumineuse, de couleur gris noirâtre, très dur avec une très faible teneur en marne. Des nodules de pyrite, visible à l'oeil nu ont été observés sur les carottes de sondage. Ces calcaires sont recoupés pratiquement par tous les sondages sur une puissance variant faiblement entre 20 et 25m alors qu'elle est plus grande dans la partie Nord du gisement.
- Une série qui se compose en premier lieu de roches marneuses fortement calcaires en alternance avec des calcaires fortement marneux et de roches marneuses faiblement calcaires.

De couleur gris sombre, à joints contournés bitumineux. L'épaisseur moyenne de cette couche est de 20m. Elle peut atteindre les 60m dans certains sondages dans la partie Est du gisement Des karsts de 0,70 à 5 m vides et parfois remplis d'argile ont été quelquefois recoupés par quelques sondages. Des fractures remplies d'argile et de calcite ont été observées sur les carottes de sondage.

La couverture est constituée de terre végétale brun noirâtre et présente une épaisseur moyenne de 50cm. [25]

II.1.6 Tectonique du gisement

La position des roches ainsi que leur répartition régionale sont déterminées par une tectonique complexe. Le bassin constitue dans son ensemble une partie d'un vaste synclinarium à direction W-E. et renferme de nombreuses failles directionnelles ou diagonales ainsi que des effondrements, des soulèvements et des chevauchements. Les roches plus anciennes, jusqu'à la base du Miocène, ont subi un plissement intense. Le plissement dominant est en direction Sud.

Les axes principaux de plissement prennent approximativement la direction E-W. Ils sont souvent superposés, d'un plissement transversal prononcé dont l'orientation est diagonale aux axes principaux comme on peut voir très nettement au djebel Medjounes où les axes de plissement transversaux se dirigent en sens N-S et en sens SW-NE.

II.1.7 discontinuité de la carrière



. **Figure II-4:** quelques photos de discontinuité de la carrière

Durant notre stage on a vu des différents types de discontinuité au niveau des fronts de taille du gisement et cela peut influencer négativement sur la stabilité des talus de la carrière

II.2 Conditions minières

II.2.1 Régime de fonctionnement de la carrière

D'après la recommandation des responsables des matières premières, le but est d'arriver à extraire

3 000 000 tonnes en fonction des paramètres suivants :

- Nombre de jours ouvrables par an : 365 jours
- Nombre de jours ouvrables par mois : 30 jours
- Nombre de jours ouvrables par semaine : 07 jours
- Nombre de postes de travail par jour : 01 poste
- Nombre d'heures de travail par poste : 11 heures

Tableau II-5 : capacité de production de calcaire [25]

Matière	Annuel		Mensuelle		Journalière (poste)	
	Tonne	m^3	Tonne	m^3	Tonne	m^3
Calcaire	3 000 000	1 158 301	250 000	96 525	8 333	3 218

- Les résultats sont arrondis ;
- La masse volumique du calcaire est de **2.59 t/m³**.

II.2.2 Système d'exploitation

L'exploitation du gisement de calcaire « DJEBEL MEDJOUNES 2 » se fait à ciel ouvert par la méthode du tir à l'explosif sur les niveaux successifs : +1323 m, +1308 m, 1293 m, 1278 m, +1263 m, +1248 m, 1233 m, +1218 m, +1203 m, +1188 m, +1173 m ses paramètres d'extraction sont comme suit :

- Hauteur des gradins : 15 m
- Angles des talus : 80 °
- Largeur de la plateforme de travail : 40 m

II.2.3 Etat actuel des travaux d'exploitation

La piste principale (2.8 km de longueur) a été réalisé dans l'objectif de relier l'ancien carrière « **Djebel Medjounes** » avec le niveau sommital +1325m de « **Djebel Medjounes 2** », et d'être le point de démarrage et d'ouverture presque de tous les niveaux d'exploitation.

Actuellement, Les deux niveaux supérieurs (+1325 & +1310) sont en état d'avancement des travaux d'exploitation (en production), alors que le troisième niveau (+1295) est en phase d'ouverture à partir de la piste de roulage dans la partie Nord Est de la carrière.

II.2.4 Travaux d'abattage:

Les travaux d'abattage du calcaire se font à l'aide d'explosifs ce qui permet d'avoir une bonne et régulière fragmentation de la roche.

II.2.5 Foration :

- La foration des trous de mines se fera par trois chariots de foration dotés d'un taillant de diamètre (110 mm).
- Dans les conditions des calcaires de «**Dj. Medjounes 2**», les quatre sondeuses de foration (trois Sondeuses DCR20 et une Sondeuse PCR 200DTH) avec le diamètre indiqué précédemment sont jugées suffisantes vue la cadence et le rendement de foration prévue par la SCAEK.
- La volée d'abattage, lieu d'implantation des trous de mine, doit faire l'objet de préparation et de nivellement par Bulldozer pour permettre le déplacement en aisance des machines de foration.

II.2.6 Les principaux paramètres du tir pour une volée :

Géométrie :

- Hauteur des gradins : 15 m ; Diamètre des trous : 110 mm ;
- Inclinaison des trous : 10° ;
- Nombre de rangée : 02 rangées ;
- Nombre total de trous : 36 trous.

Maille :

- Largeur de la banquette : 4 m ;
- Espacement des trous: 5 m.

Explosif de pied :

- MARMANIT III : 37.5 Kg/trou.

Explosif de colonne :

- ANFOMIL : 62.5 Kg/trou.

Charge explosifs :

- Quantité totale d'explosif par trou : 100 Kg ;
- Charge d'explosif instantanée : 300 Kg.

II.2.7 Chargement :

Le tout venant extrait au tir est chargé sur camion par chargeuses. Les caractéristiques du matériel de chargement disponible dans la carrière sont données dans le tableau II -6 suivant :

Tableau II-6 caractéristiques du matériel de chargement

Type de chargeuse	Nombre	Capacité de godet (m3)
• Kumatsu W A 700	02	7 à 8
• Caterpillar 990 k	06	8

II.2.8 Transport :

Le transport est l'un des processus principaux et le plus important dans l'exploitation des carrières ou mines à ciel ouvert.

Le matériau abattu est transporté vers la trémie de réception. La distance maximale de transport atteint 9 km. Les caractéristiques des moyens de transport disponibles en Carrière sont données dans le tableau II-7 ci-dessous :

Tableau II-7: Caractéristiques du matériel de transport utilisé dans la carrière.

Type	Nombre	Capacité (tonne)
• Hitachi E H 1100	13	65
• Caterpillar 773 G	05	60

Conclusion

La cimenterie d'Ain El kebira, groupe GICA, est alimenté par la carrière de calcaire « Djebel Medjounes ». Par sa production annuelle de 2 000 000 t/an, la carrière « **Djebel Medjounes** » est l'une des grandes carrières au niveau national. La stratégie du groupe GICA vise à augmenter la production jusqu'au 5 000 000 t/an. La cimenterie ouverte la nouvelle carrière de calcaire «**Djebel Medjounes 2**» Alors, une étude de stabilité est nécessaire pour assurer la production dans les bonnes conditions.

Les deux conclusions principales qu'on peut tirer après avoir présenté ce chapitre sont les

Suivantes:

- Le gisement de calcaire de Djebel Medjounès 2 est constitué de deux couches Principales de calcaire, intercalé par une couche de marne.
- Il n'existe pas une nappe d'eau qui règne au-dessus de la limite inférieure du gisement.

CHAPITRE III

Chapitre III- Caractérisation, classification et stabilité du massif de la carrière de Ain el kebira

Introduction

L'étude de la stabilité d'une mine (ou carrière) permet d'analyser l'état de stabilité afin d'assurer un milieu sécurisé pour les travailleurs et une exploitation optimale. Le control et la surveillance permettent de suivre l'évolution des travaux et d'assurer leur progression dans les meilleures conditions préalablement établies.

L'analyse de la stabilité des talus à ciel ouvert demande la compréhension de la géologie, l'hydrogéologie, la séismologie et de la géotechnique du site en plus de connaissances sur les méthodes analytiques et numériques (Rathod et al, 2012). Aujourd'hui de nombreux logiciels permettent d'analyser la stabilité des pentes sont basés sur des méthodes et des hypothèses de calculs et fournissent des informations différentes, selon la base de leur calcul ce qui rend leurs utilisations beaucoup plus rapides et plus accessibles.

L'objectif de cette partie est d'étudier la stabilité de la carrière de la carrière d'ain elkebira djebel medjounes 2. Notre étude suivra l'ordre chronologique suivant:

- d'abord, un travail de terrain permettra l'acquisition des données, le long du front de taille de la carrière d'Ain el kebira Djebel Medjounes 2 dans les différents niveaux. La structure du massif de la carrière est abordée de façon à déterminer les orientations des différentes familles de discontinuités et leurs espacements.
- Ensuite, une classification empiriques (ou géomécanique) de notre site, par l'application des différents systèmes, soit RQD (Rock Quality Design), le RMR (Rock Mass Rating), GSI (Geological Strength Index) et le SMR (Slope Mass Rating) des différentes couches qui le constituent ce qui nous a permis d'avoir une connaissance sur la qualité des massifs rocheux.
- Enfin, une analyse de stabilité sera effectuée par la méthode d'équilibre limite par logiciel SLIDE pour confirmer les résultats trouvés.

III.1.Collecte et traitement des données structurales de la carrière

La première étape est consacrée à un travail de terrain. Elle permet l'acquisition des données, le long du front de taille de la carrière. La structure du massif de la carrière de AIN EL KEBIRA DJEBEL MEDJOUNES 2 est abordée de façon à déterminer d'une part les orientations des différentes familles de discontinuités et d'une autre part leurs espacements. Les discontinuités ont été mesurées systématiquement à partir de plusieurs lignes implantées sur chaque gradin affleurent à la surface du front de taille des différentes niveaux (vue que le massif rocheux de la carrière est très fracturés). Pour les paramètres géologiques (rugosité et altération), elles sont estimées en comparant l'apparence de la surface de la discontinuité avec des profils standards publiés par (Barton, 1974). La distinction des discontinuités naturelles des discontinuités artificielles crée par des activités de forage, de tirs ou d'excavation est l'une des étapes les plus difficiles dans le cadre de réalisation de cette étude.

Les différentes formations rocheuses rencontrées à travers le front de taille de la carrière sont : Calcaire C1 (Calcaire finement cristalline), Calcaire C2 (Calcaire dur) et intercalation de couche de Marne.

Tableau III.1. Orientation des familles de discontinuités les plus importantes dans la carrière.

	Calcaire C1				Calcaire C2		Marne	
	G1		G2		G3		G2	
	Pendage (°)	Direction de pendage (°)	Pendage (°)	Direction de pendage (°)	Pendage (°)	Direction de pendage (°)	Pendage (°)	Direction de pendage (°)
Famille 1	79	288	68	140	73	240	70	245
Famille 2	77	135	78	180	68	125	65	150
Famille 3	62	206	78	265	75	195	/	/
<i>Famille</i> 4	78	145	/	/	/	/	/	/

III.2. Classifications du massif de la carrière d'Ain el kebira djebel medjounes 2

Dans cette section, nous avons pris compte des échantillons représentatifs de notre terrain d'étude sur les différentes formations rocheuses rencontrées dans les gradins qui affleurés à la surface terrestre et en cours d'exploitations les données collectées sont donnée par un doctorant de l'école des mines de Annaba qui a travaillé parallèlement lors dans notre stage dans le même site d'étude (djebel medjounes 2) de la carrière Ain el kebira. Ces échantillons sont soumis à des essais au laboratoire (Laboratoire des Mines, Métallurgie et des Matériaux, Annaba) pour la détermination des propriétés physico-mécaniques des roches. La compilation de ces données a permis de classier le massif rocheux à l'aide des différents systèmes, soit le RQD (Rock Quality Design), RMR (Rock Mass Rating), GSI (Geological Strength Index) et le SMR (Slope Mass Rating).

III.2.1. Calcul RQD (*Rock Quality Design*) du massif rocheux de la carrière

Le RQD est défini comme le pourcentage des parties intactes de plus de 10 cm de longueur par rapport à la longueur totales des carottes extraites du forage. Dans la carrière de Chouf Amar les carottes n'existent plus. Dans ce cas, lorsque les carottes ne sont pas disponibles mais les discontinuités sont visibles à la surface d'exposition (face libre du gradin), le RQD peut être estimé à partir du nombre de discontinuités par relevé linéaire (Priest et Hudson, 1976). La méthode consiste à placer manuellement une traverse (en pratique c'est décimètre en ruban) représenter par ligne rouge (figure III.1) à l'horizontale sur la paroi rocheuse. Soit L la longueur de la traverse de long d'une ligne de mesure, N est le nombre de fractures. Le RQD s'écrit comme suite :

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

Ou : λ : fréquence linéique de discontinuité,
 $\lambda=N/L$ (Fissure/mètre),

Tableau III.2 nombre de fissure dans 10m pour chaque couche.

	Calcaire C1	Calcaire C2	Marne
Nombre de fissures	120	70	200
La distance (m)	10	10	10

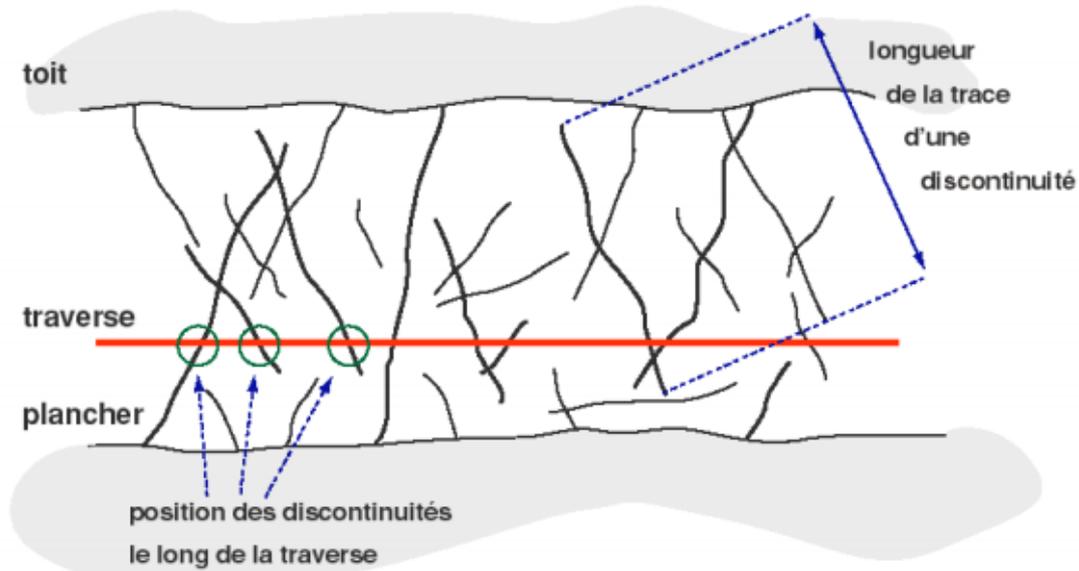


Figure III.1. Relevée structurale linéaire (Wyllie et Mah, 2004).

Toutes les discontinuités qui viennent intercepter cette traverse sont caractérisées par leur « pendage / direction de pendage », leur longueur, leur rugosité, leur espacement, leur ouverture et leur altération. L'inconvénient le plus important de cette méthode tient au fait que l'orientation de la traverse ne permet pas d'échantillonner les joints subhorizontaux et les joints qui ont une direction de pendage sub-perpendiculaire à la direction de la traverse. Mais cette méthode reste encore la plus utilisée, car elle est pratique et nécessite peu d'équipement.

Les résultats de RQD de différentes formations rocheuses sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.3. Résultats de RQD de différentes couches

Couches	Fréquence moyenne	Espacement moyenne	RQD	Qualité
Calcaire C1	12	0.083	66.26	moyenne
Calcaire C2	7	0.14	84.42	Bonne
Marne	20	0.05	40.60	médiocre

D'après l'analyse des paramètres RQD on constate que le massif est formé principalement par deux couches de calcaire et une intercalation marneuse dont la qualité varie de bonne, moyenne et médiocre.

III.2.2. Classification RMR du massif (*Rock Mass Rating*) du massif rocheux de la carrière

La classification de Bieniawski prévoit l'évaluation de différents paramètres pour chacun desquels un coefficient numérique. La somme de ces coefficients détermine la valeur du RMR, qui peut varier entre 0 et 100. Cette valeur est divisée en cinq classes qui décrivent la qualité du massif rocheux. D'un extrême à l'autre, on passe de la classe 1, pour un RMR compris entre 81 et 100, qui est décrite comme une roche de très bonne qualité à la classe 5 pour un RMR inférieur à 20 et qui correspond à une roche de très mauvaise qualité.

Le tableau suivant détaille l'évaluation de la classification géomécanique RMR pour les différentes formations rocheuses de la carrière :

Tableau III.4. Classification RMR de différentes couches de la carrière

	Notes des paramètres					
	Résistance à la compression, (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints	Hydrogéologie	RMRbase
Calcaire C1	7	13	20	8	15	63
Calcaire C2	7	17	25	8	15	72
Marne	4	8	10	5	10	37

D'après les résultats du RMRbase, on déduit que les couches C1 et C2 ont une bonne qualité. En revanche Celle du marne est de qualité moyenne.

III.2.3. Classification GSI (*Geological Strength Index*) du massif rocheux de la carrière

L'indice GSI sert à estimer la réduction de résistance du massif rocheux pour différentes conditions géologiques.

$$GSI = RMR_{base} - 5 \text{ si } RMR_{base} > 23 \quad (III.2)$$

$$RMR_{base} = A1 + A2 + A3 + A4 + 15 \quad (III.3)$$

Les résultats de classification par le GSI du massif rocheux dans la carrière de Ain el kebira djebel medjounes 2 sont présentés dans le tableau III.5 avec les classes correspondantes.

Tableau III.5. Classification GSI de différentes couches de la carrière

Couche	RMR'	GSI	Qualité
Calcaire C2	63	58	Bonne
Calcaire C2	72	67	Bonne
Marne	37	32	Mauvaise

Les résultats des classifications par GSI nous indiquent que le massif rocheux de la carrière est constitué de formation des différentes qualités de bonne à mauvaise

III.2.4. Classification SMR (Slope Mass Rating)

Cette approche est basée sur l'indice d'évaluation de la stabilité appelé SMR obtenu à partir de la classification RMR en ajoutant un facteur d'ajustement factoriel et un autre facteur de correction en fonction de la méthode d'excavation.

$$\text{SMR} = \text{RMR basic} + (F1. F2. F3) + F4 \quad (\text{III.4})$$

Pour faciliter les calculs, (Riquelme et al, 2014) ont publié un format d'accès ouvert, une calculatrice programmée dans MS Excel pour le calcul des coefficients F1, F2 et F3 à partir des vecteurs de direction de la pente (azimut et pendage) et la discontinuité (ou la ligne d'intersection des plans dans le cas de rupture en coin) appelé SMRTool (Fig. IV.4). Cette règle calcule automatiquement les angles auxiliaires A, B et C, ainsi que le type de rupture (planaire ou basculement) compatible avec la géométrie de l'étude de cas et fournit les valeurs de SMR de (Romana M, 1985) et de (Tomás et al, 2007), y compris également la description de la classe, la stabilité, les modes de ruptures et le système de soutènement recommandé par (Romana, 1993).

Basic RMR		63	< ■ >	
Slope	α_s	317°	< ■ >	
	β_s	80°	< ■ >	
Discontinuity	α_j or α_i	288°	< ■ >	
	β_j or β_i	79°	< ■ >	
Auxiliar angles (degrees)	A	29°		
	B	79°		
	C	-1°		
Failure Type	Wedge/Planar			
Authors→ Coefficients ↓	Romana (1993)	Tomás et al (2007)		
	Discrete values	Continuous values		
	F_1	0,40	0,34	
	F_2	1,00	0,99	
	F_3	-50,00	-45,00	
$F_1 \times F_2 \times F_3$	-20	-15		
Excavation method	Smooth blasting			
F_4	8			
	Discrete	Continuous		
SMR	51	55		
Class	III	III		
	Discrete	Continuous		
Description	Normal	Normal		
Stability	Partially stable	Partially stable		
Failures	Some joints or many wedges	Some joints or many wedges		
Suport	Systematic	Systematic		

Figure III.2. Exemple d'affichage de l'application SMRTool.[30]

Les résultats de calcul sont récapitulés dans les tableaux suivants.

Tableau III.6 Classification SMR de différentes couches de la carrière (ROMANA 1995)

Couche	Familles	Direction de Pendage	Note SMR	Stabilité	Rupture
C1 G1	Famille 1	288	51	Partiellement stable	Quelques joints ou beaucoup de dièdres
	Famille 2	135	46	Partiellement stable	Quelques joints ou beaucoup de dièdres
	Famille 3	206	67	Stable	Quelques blocs
	Famille 4	145	50	Partiellement stable	Quelques joints ou beaucoup de dièdres
C1 G2	Famille 1	140	62	Stable	Quelques blocs
	Famille 2	180	63	Stable	Quelques blocs
	Famille 3	265	63	Stable	Quelques blocs
C2 G3	Famille 1	240	72	Stable	Quelques blocs
	Famille 2	125	59	Partiellement stable	Quelques joints ou beaucoup de dièdres
	Famille 3	195	76	Stable	Quelques blocs
M G2	Famille 1	245	30	Instable	Plan ou grand dièdre
	Famille 2	150	30	Instable	Plan ou grand dièdre

Tableau III.7 Classification SMR de différentes couches de la carrière (TOMAS et al, 2007)

Couche	Familles	Direction de Pendage	Note SMR	Stabilité	Rupture
C1 G1	Famille 1	288	56	Partiellement stable	Quelques joints ou beaucoup de dièdres
	Famille 2	135	46	Partiellement stable	Quelques joints ou beaucoup de dièdres
	Famille 3	206	67	Stable	Quelques blocs
	Famille 4	145	48	Partiellement stable	Quelques joints ou beaucoup de dièdres
C1 G2	Famille 1	140	62	Stable	Quelques blocs
	Famille 2	180	57	Partiellement stable	Quelques blocs
	Famille 3	265	61	Stable	Quelques blocs
C2 G3	Famille 1	240	70	Stable	Quelques blocs
	Famille 2	125	56	Partiellement stable	Quelques joints ou beaucoup de dièdres
	Famille 3	195	76	Stable	Quelques blocs
M G2	Famille 1	245	20	Complètement instable	Grand plan ou rupture circulaire
	Famille 2	150	29	Instable	Plan ou grand dièdre

III.3. Caractéristiques géotechniques du massif:

III.3.1. Résistance à la compression Rc (MPa)

Pour les résultats de RC et RT à cause du manque de matériels et de temps pour effectuer les essais au laboratoire, les échantillons sont transférés vers laboratoire d'Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie d' Annaba.

Principe

L'essai est effectué au moyen d'une machine de compression directe d'un l'échantillon cylindrique du calcaire ($D = 54\text{mm}$) soumis à un effort de compression simple.

Mode opératoire

- ✓ Préparer les échantillons de roche sous forme de carotte extraite de roches appartenant au talus étudié dimensionnée selon les normes (Longueur de la carotte = $2 * \text{Diamètre}$)
- ✓ Polissage des faces de la carotte afin de la préparer pour la machine de compression

- ✓ Mise en place et centrage de l'échantillon entre les plateaux d'une presse de la machine.
- ✓ Appliquer une force axiale sur les échantillons et l'augmenter progressivement jusqu'à la rupture de l'échantillon.



Figure.III.3:échantillon du calcaire

- ✓ Le carottage des échantillons, a été effectué au sein du laboratoire de l'école supérieure des mines et métallurgie d'Annaba à l'aide d'une carotteuse de diamètre 54 mm puis le découpage des carottes et le polissage des faces.



Figure III.4: photo de l'échantillon écrasé

La valeur maximale de cette force représente la force à laquelle la rupture de l'échantillon se produit et donc permet de déterminer sa résistance à la compression suivant la relation suivante:

$$RC = \frac{F_{max}}{S} ; N/m^2 \quad (III.5)$$

- F_{max} : la charge à la rupture.
- S : surface sur laquelle la charge est appliquée 2290 mm²

Les résultats des essais ont été reportés sur le tableau III-8 et III-9 suivant :

Tableau III.8: Les résultats des essais de compression uniaxiale pour le calcaire C1

	Echantillon 01	Echantillon 02	Echantillon 03	Moyenne
Résistance à la compression(MPA)	48.38	59.8	53.8	54

RC=54 MPA

Tableau.III.9: Les résultats des essais de compression uniaxiale pour le calcaire C2

	Echantillon 01	Echantillon 02	Echantillon 03	Moyenne
Résistance à la compression(MPA)	50.2	62.8	55.7	56.23

RC=56.23 MPA

III.3.2.Résistance à la traction :

La résistance à la traction est définie par la relation suivante :

$$RT = \frac{T_{max}}{S} ; \text{MPA} \quad (\text{III.6})$$

Tmax :l'effort maximal de traction

S : surface de l'éprouvette sur laquelle est appliqué l'effort de traction qui produit la d'échantillon de roche.

Tableau III.10: résultats des essais au laboratoire de traction en labo sur des échantillons du calcaire C1

	Echantillon 01	Echantillon 02	Echantillon 03	Moyenne
Résistance à la traction (Mpa)	7.1	8.1	7.3	7.5

RT=7.5 MPA

Tableau III.11: résultats des essais au laboratoire de traction en labo sur des échantillons du calcaire C2

	Echantillon 01	Echantillon 02	Echantillon 03	Moyenne
Résistance à la traction (Mpa)	8.2	9.5	8.9	8.86

$$RT=8.86 \text{ MPA}$$

III.3.3.Cohésion

Pour déterminer la cohésion d'un échantillon on utilise la relation suivante :

$$Cech = \frac{Rc * Rt}{2\sqrt{Rc * Rt - 3Rt^2}} ; \text{MPA} \quad (\text{III.7})$$

Les valeurs obtenues de(*Cech*) sont indiquées dans le tableau III.11

Tableau III.12 : Valeurs obtenues de(*Cech*) pour le calcaireC1

	Résistance à la compression(MPA)	Résistance à la traction (Mpa)	Cech (Mpa)
Moyenne	54	7.5	13.175

$$Cech=13.175 \text{ MPA}$$

Tableau III.13 : Valeurs obtenues de(*Cech*) pour le calcaireC2

	Résistance à la compression(MPA)	Résistance à la traction (Mpa)	Cech (Mpa)
Moyenne	56.23	8.86	15.369

$$Cech=15.369 \text{ MPA}$$

III.3.4. Angle de frottement

Pour déterminer l'angle de frottement interne d'un échantillon on utilise la relation suivante :

$$\varphi_{ech} = \arcsin \frac{R_c - 4R_t}{R_c - 2R_t} ; (\text{degree}) \quad (\text{III.8})$$

Les valeurs obtenues de (φ_{ech}) sont indiquées dans les tableaux III.13

Tableau III.14 : Valeurs obtenues de (φ_{ech}) pour le calcaire C1

Résistance à la compression(MPA)	Résistance à la traction (Mpa)	φ_{ech} (°)
54	7.5	37.95

Tableau III.15 : Valeurs obtenues de (φ_{ech}) pour le calcaire C2

Résistance à la compression(MPA)	Résistance à la traction (Mpa)	φ_{ech} (°)
56.23	8.86	32.68

III.4. Etude de stabilité par la méthode d'équilibre limite par logiciel SLIDE

Le gisement de calcaire d'Ain El Kebira djebel medjounes 2 est composé de deux couches principales en alternance. La figure III.5 nous montre la disposition des couches du gisement que nous avons réalisé à l'aide de la coupe géologique (figure III.4) du gisement en utilisant le logiciel Auto CAD.

Le logiciel Slide de Rocscience est utilisé pour cette modélisation. Ce logiciel est conçu pour ce type d'analyse de pentes excavées dans les massifs rocheux (bien adaptés aux problèmes des deux catégories de glissement soit circulaire et non circulaire). Il permet d'utiliser le critère de rupture de Mohr-Coulomb. Ainsi, les propriétés physico-mécaniques déterminées au laboratoire utilisées.

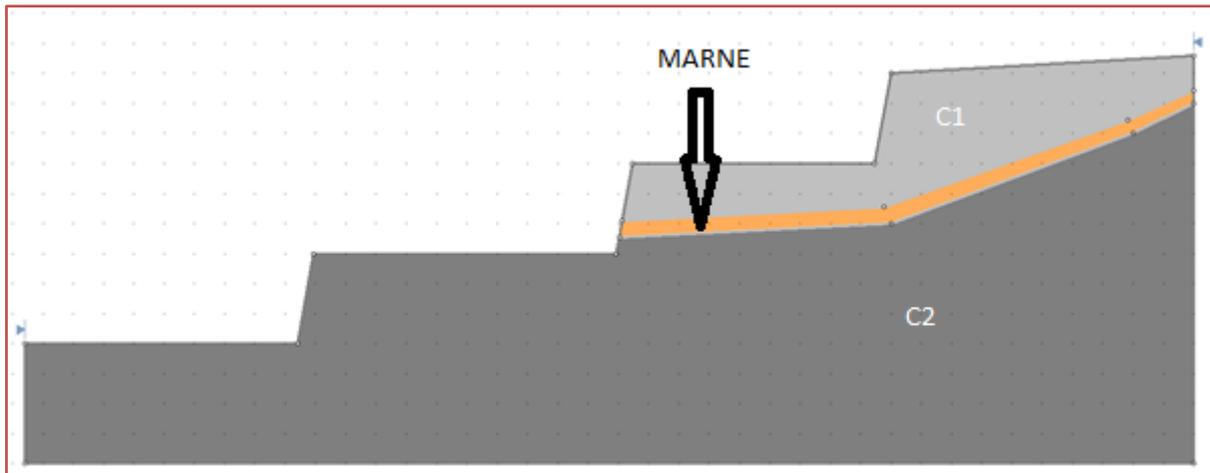


Figure III.5 : Disposition des couches du gisement d'Ain El Kebira djebel medjounes 2

III.4.1. Calcul du coefficient de sécurité F_s avec Side dans l'état statique :

A. L'approche de Bishop simplifiée.

Le coefficient de sécurité obtenu avec la méthode de Bishop simplifiée est de l'ordre De $F_s=2.113$; comme le montre la figure suivante :

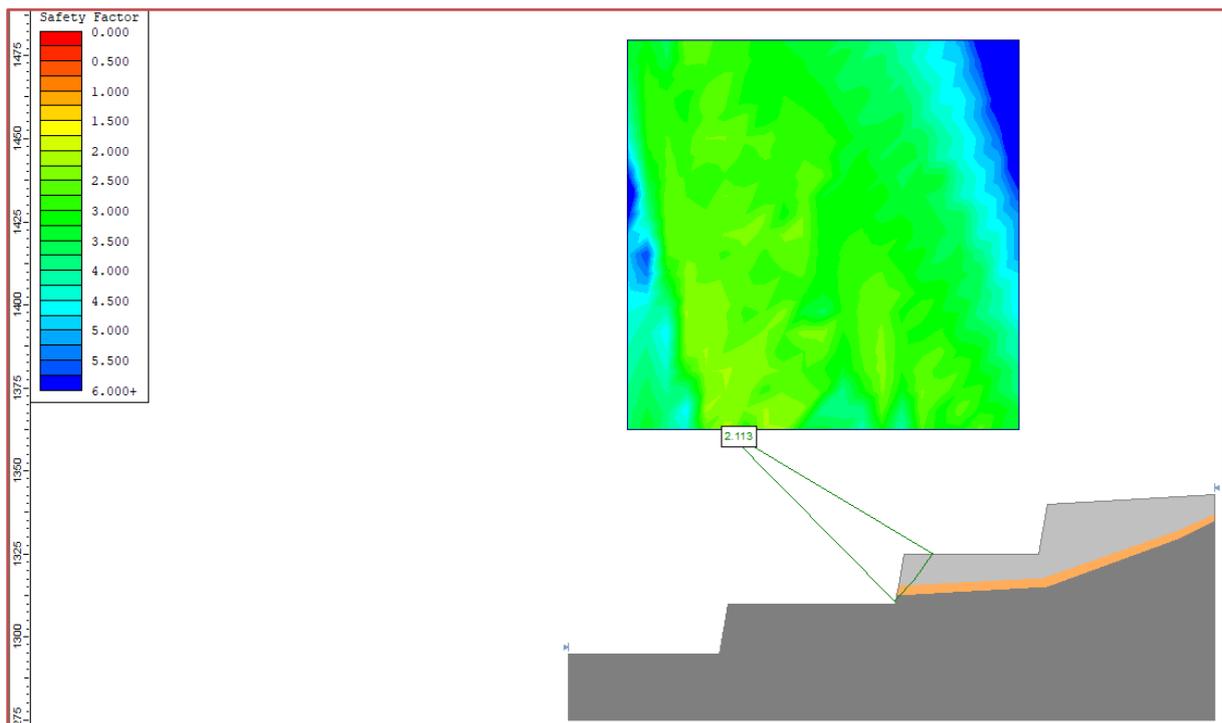


Figure III.6. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de Bishop.

B. L'approche de Janbu simplifiée.

Le coefficient de sécurité obtenu avec la méthode de Bishop simplifiée est de l'ordre de $F_s=2.174$; comme le montre la figure suivante :

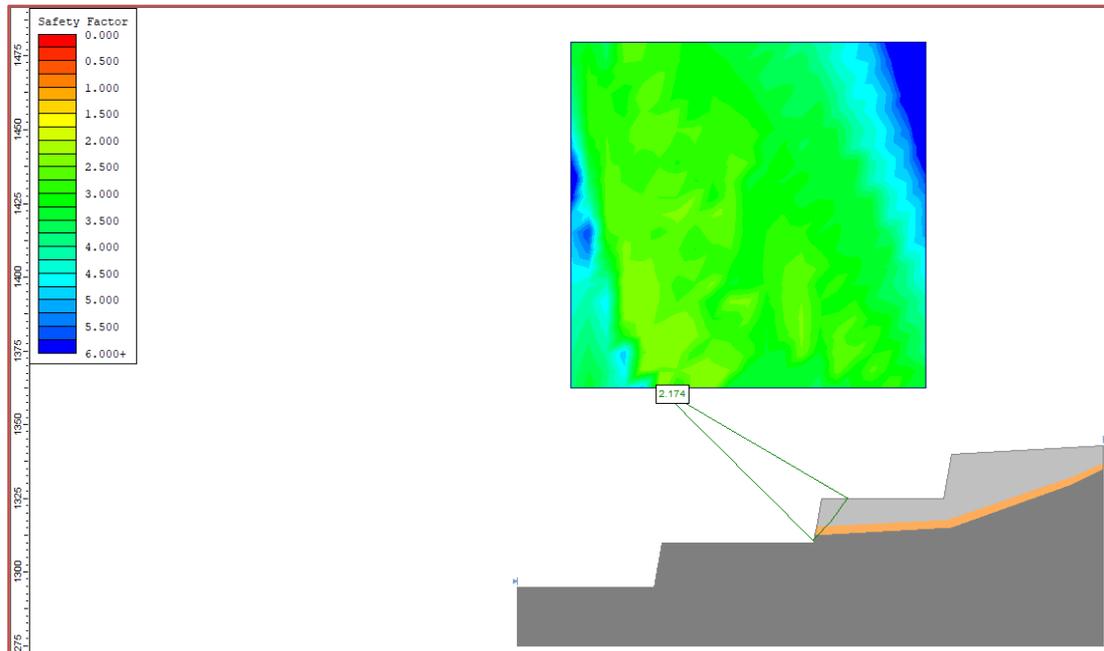


Figure III.7. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de Janbu simplifiée

C. L'approche de spencer.

Le coefficient de sécurité obtenu avec la méthode de spencerest de l'ordre de $F_s=2.157$; comme le montre la figure suivante :

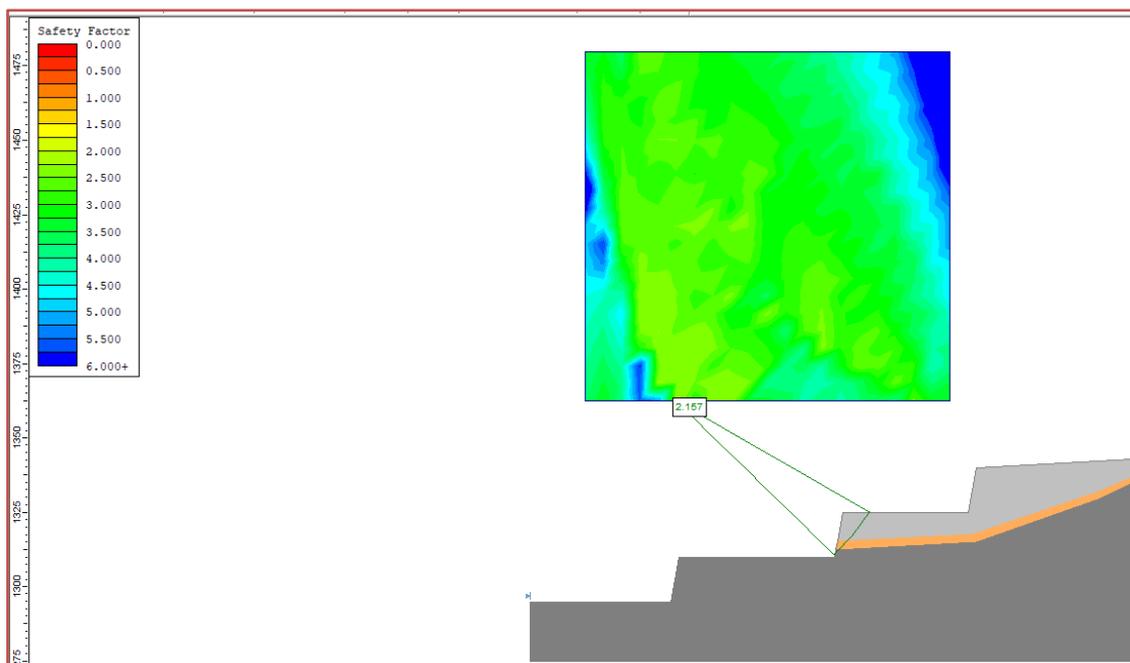


Figure III.8. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de spencer.

D. L'approche GLE /Morgenstern Price

Le coefficient de sécurité obtenu avec la méthode de GLE /Morgenstern Price est de l'ordre de $F_s=2.164$; comme le montre la figure suivante :

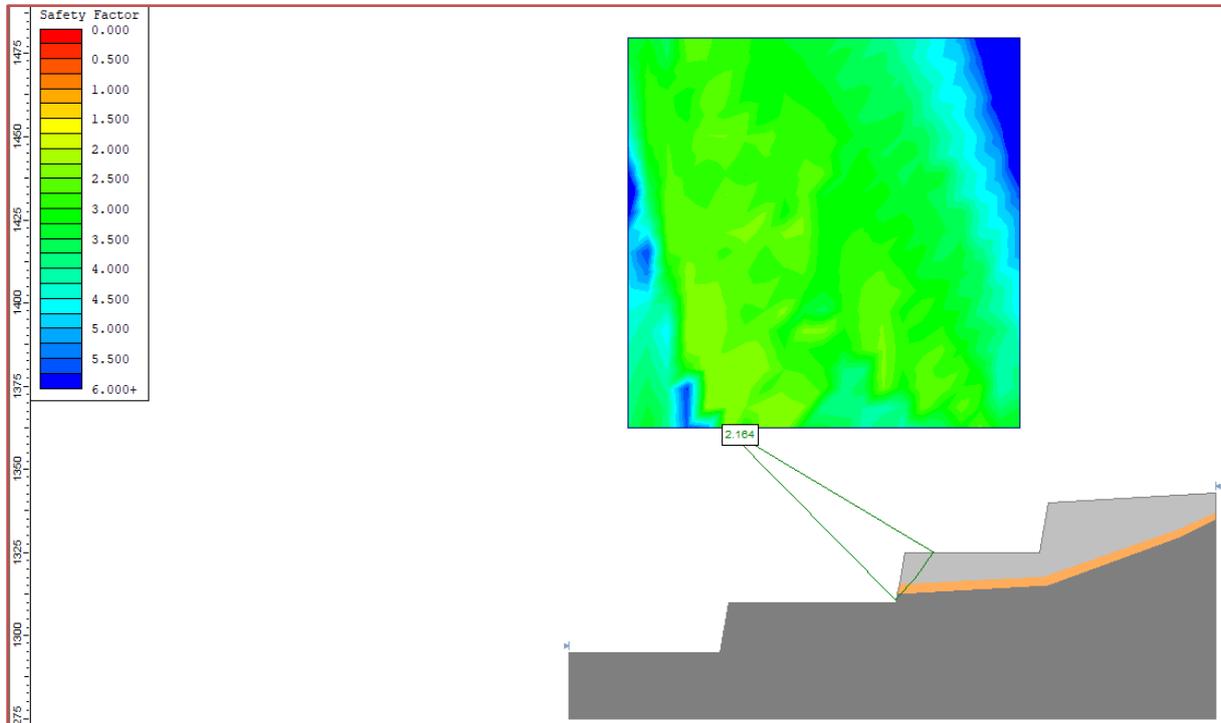


Figure III.9. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de GLE /Morgenstern Price.

Les résultats obtenus des différentes méthodes de calcul sont résumés dans le tableau III.16

Tableau III.16: Résultat de calcul de facteur de sécurité F_s par différentes méthodes (statique).

Méthodes	F_s
Bishop simplifiée.	2.113
Janbu simplifiée.	2.174
spencer.	2.157
GLE /Morgenstern Price	2.164

III.4.2. Calcul du coefficient de sécurité F_s par Side dans l'état dynamique :

Dans la carrière d'Ain el kebira, l'abattage à l'explosif est largement utilisé. Les vibrations créées par les tirs d'explosifs ont deux champs d'action sur les massifs rocheux. D'une part, ils affectent l'intégrité des roches ou leurs paramètres de résistance à la compression et, d'autre part, peuvent provoquer un effondrement de la paroi ou de la pente lorsque des actions de déstabilisation sont introduites. Ces vibrations sont le résultat de la propagation de l'onde de choc dans le massif rocheux. Dans ce contexte, les tirs de production réalisés d'une manière répétitive peuvent contribuer à aggraver la stabilité de la carrière.

Pour vérifier l'influence des paramètres pseudo-statique liés aux travaux d'abattage on retiendra les valeurs mesurés au niveau de la carrière par sismographe (2021) (CETIM): pour les deux composantes accélérations horizontale et verticale $A_h = 0.05$ et $A_v = 0.01$.

Dans cette étude d'évaluation la méthode d'analyse sera celle de l'équilibre limite (Logiciel Slide). En tenant en compte l'influence des travaux d'abattage.(l'influence de méthode d'excavation dans SMR Tools F4 (Facteur d'ajustement pour la méthode d'excavation: Smooth blasting))

Les résultats de calcul des facteurs de sécurité sont illustrés dans les figures suivantes :

A. L'approche de Bishop simplifiée.

Le coefficient de sécurité obtenu avec la méthode de Bishop simplifiée est de l'ordre De $F_s=2.003$; comme le montre la figure suivante :

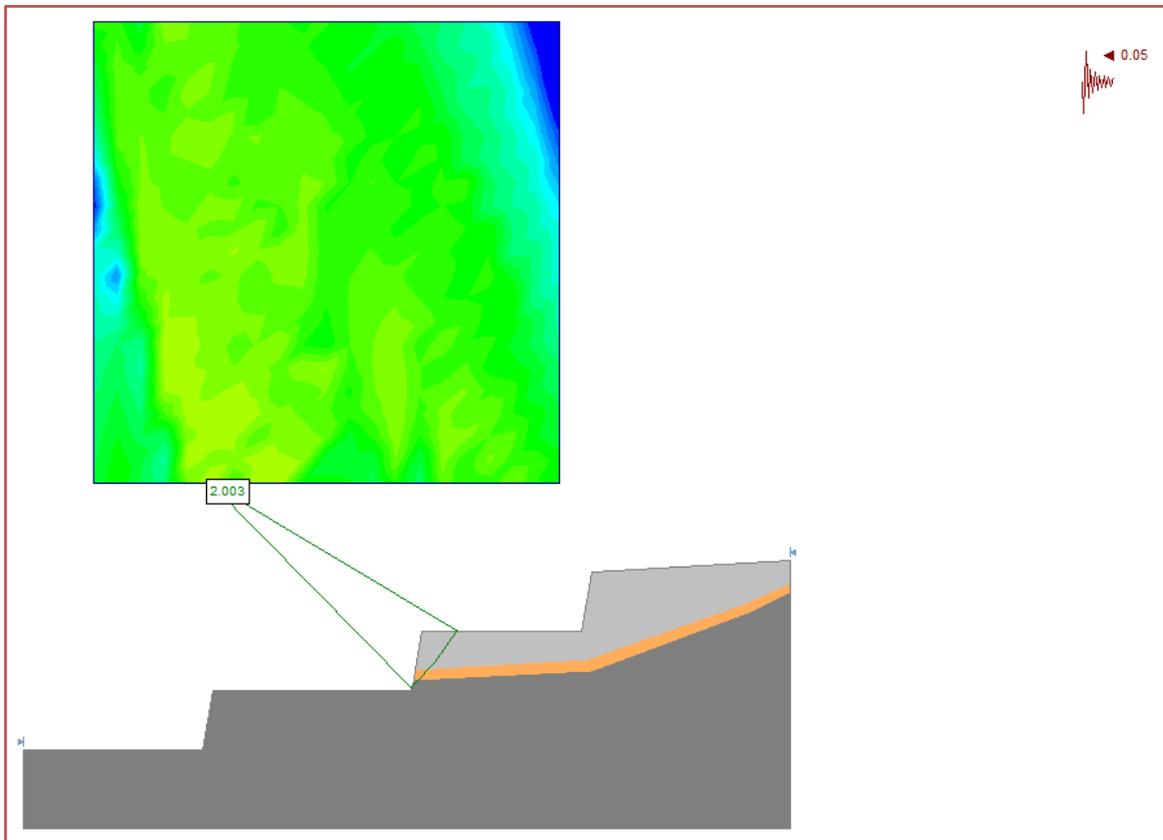
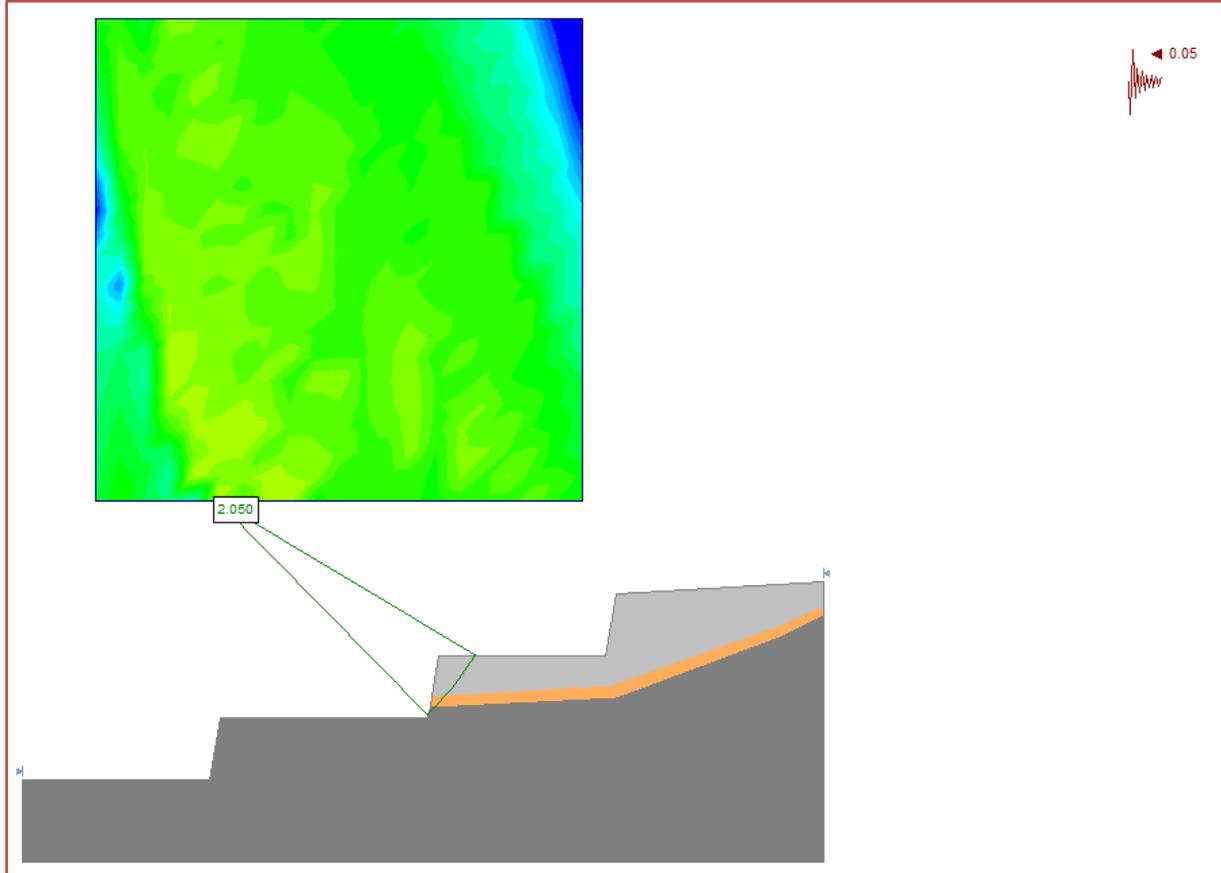


Figure III.10. Calcul le facteur de sécurité par la méthode de Bishop

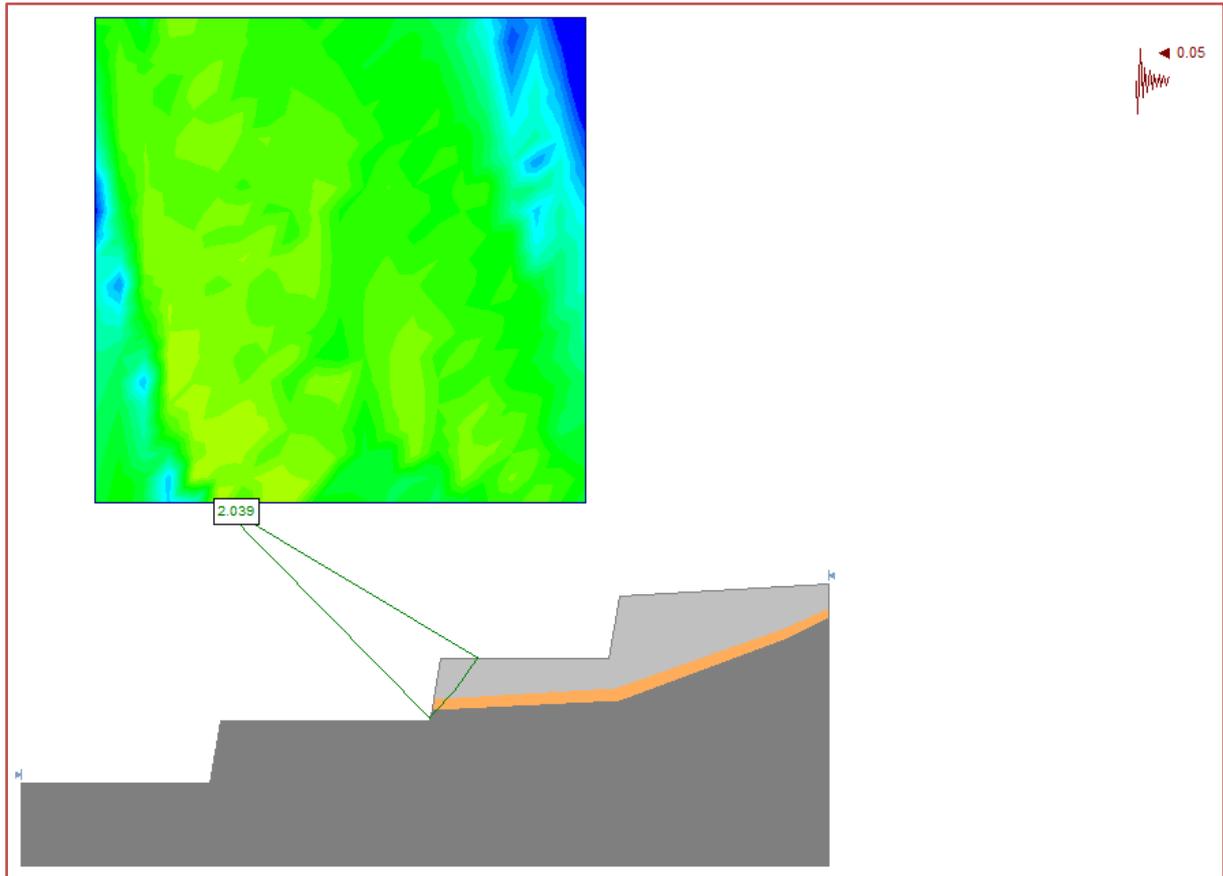
B. L'approche de Janbu simplifiée.

Le coefficient de sécurité obtenu avec la méthode de Bishop simplifiée est de l'ordre De $F_s=2.050$; comme le montre la figure suivante :



C. L'approche de spencer.

Le coefficient de sécurité obtenu avec la méthode de spencer est de l'ordre de $F_s=2.039$; comme le montre la figure suivante :



D. L'approche GLE /Morgenstern Price

Le coefficient de sécurité obtenu avec la méthode de GLE /Morgenstern Price est de l'ordre de $F_s=2.044$; comme le montre la figure suivante :

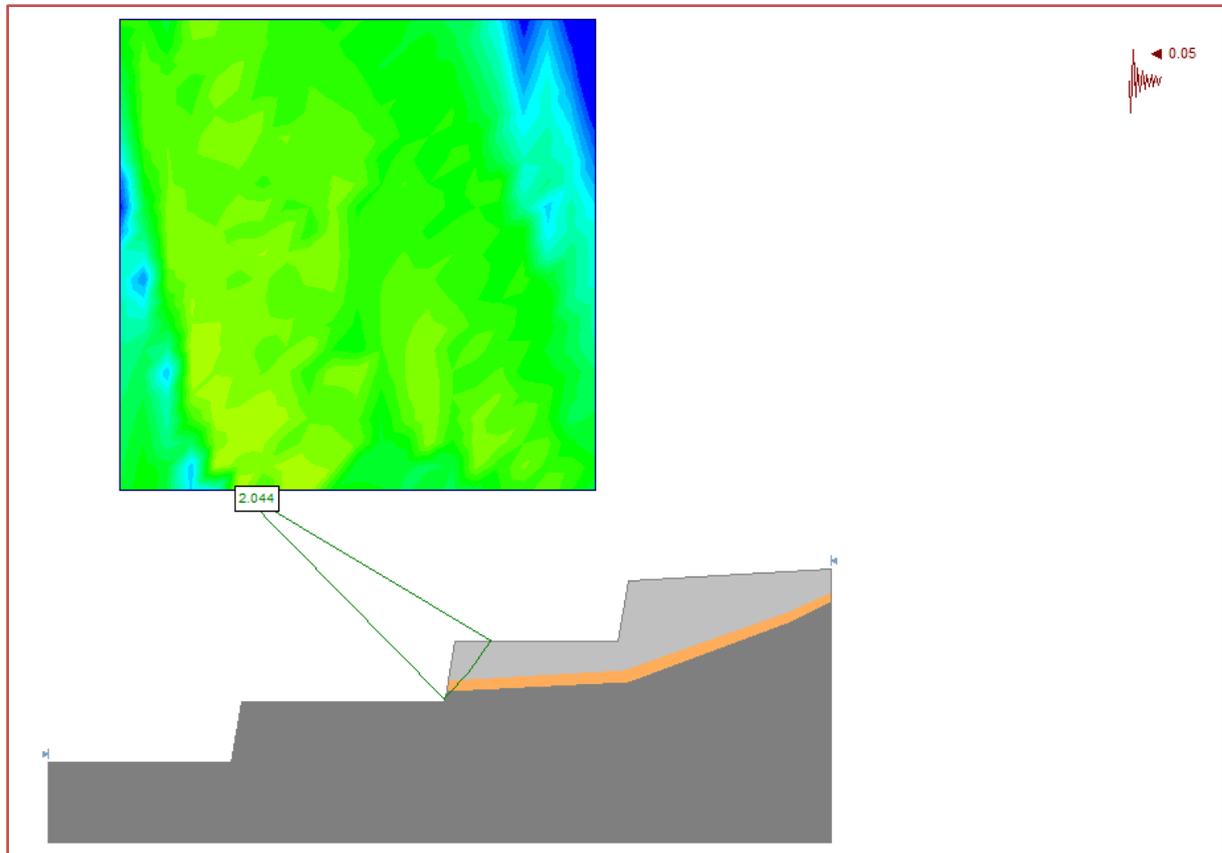


Figure III.13. Calcul le facteur de sécurité par la méthode GLE /Morgenstern Price

Les résultats obtenus des différentes méthodes de calcul sont présentés dans le tableau III.17

Tableau III.17: Résultats de calcul de facteur de sécurité F_s par différentes méthodes (dynamique).

Méthodes	F_s
Bishop simplifiée.	2.003
Janbu simplifiée.	2.05
spencer.	2.039
GLE /Morgenstern Price	2.044

III.4.2. Interprétation des résultats

Les valeurs de Fs obtenus suite à l'application de l'outil numérique slide 6.0 montrent que les talus sont stables (dans l'état statique et dynamique).

Conclusion

Dans ce chapitre, l'évaluation de la stabilité de la carrière d'Ain el kebira « gisement de calcaire nouvelle extension » a été faite par des différentes approches empiriques et analytiques.

La caractérisation nous a permis de faire les constatations suivantes :

- Les valeurs du RQD (*Rock Quality Designation*), varient entre 40.60% et 84.42% en fonction des facies constituant le massif, estimant que la qualité est médiocre pour la couche de marnes, moyenne pour les calcaires C1 et bonne pour le calcaire C2.
- La méthode de classification RMR (*Rock Mass Rating*) classe le massif comme étant celui formé de roche de on déduit que les couches C1 et C2 ont une bonne qualité. En revanche la du marne est de qualité moyenne.
- La classification GSI (*Geological Strength Index*) a montré que la qualité du massif varié de mauvaise pour la couche de marne, bonne qualité pour les couches C1 et C2.
- La méthode de SMR (*Slope Mass Rating*) a confirmé les constatations des autres classifications concernant la qualité du massif et généralement stable.

D'une manière générale, la méthode empirique SMR reste un outil d'analyse rapide qui peut donner une idée générale sur les pentes des talus stables en se basant sur des paramètres qualitatifs. Par contre, cette méthode ne peut pas garantir des résultats fiables. Il faut analyser chaque type de rupture (planaire, dièdre, basculement...) à l'aide des outils qui tiennent compte de tous les paramètres qui influencent la stabilité notamment le facteur de sécurité

Les résultats d'analyse par la méthode d'équilibre limite à travers le logiciel Slide montrent bien que la carrière est stable.

Les résultats obtenus à partir de l'approche empirique à savoir RMR, SMR et GSI correspondent bien aux résultats obtenus analytiquement par la méthode d'équilibre limite.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Avant de parler de la stabilité des talus de la carrière d'Ain El Kebira « gisement de calcaire nouvelle extension », on doit d'abord procéder à la connaissance de diverses informations, telles que la structure des massifs rocheux, les différents types de mouvements de terrains, les conditions géologiques, hydrogéologiques et minières de la carrière et aussi les différentes méthodes de calcul de la stabilité. Pour cela, nous avons essayé dans cet humble travail de donner le maximum de renseignements possibles sur les points précédents.

- Le gisement de calcaire de Djebel Medjounès 2 est constitué de deux couches principales. Il n'existe pas une nappe d'eau qui règne au-dessus de la limite inférieure du gisement.
- Les valeurs du RQD (*Rock Quality Designation*), varient entre 40.60% et 84.42% en fonction des facies constituant le massif, estimant que la qualité est médiocre pour la couche de marnes, moyenne pour les calcaires C1 et bonne pour le calcaire C2.
- La méthode de classification RMR (*Rock Mass Rating*) classe le massif comme étant celui formé de roche de on déduit que les couches C1 et C2 ont une bonne qualité. En revanche la du marne est de qualité moyenne.
- La classification GSI (*Geological Strength Index*) a montré que la qualité du massif varié de mauvaise pour la couche de marne, bonne qualité pour les couches C1 et C2.
- La méthode de SMR (*Slope Mass Rating*) a confirmé les constatations des autres classifications concernant la qualité du massif et généralement stable.
- Les résultats d'analyse par la méthode d'équilibre limite à travers le logiciel Slide montrent bien que la carrière est stable dans des différents cas dévaluation statique et dynamique et on peut exploité dans les bonne condition .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Pierre, Martin. "Géologie appliquée au BTP".P 16 – 23. 2010.

[2] Comité Français de Mécanique des Roches (2000). "Manuel de mécanique des roches".
Tome 1 : Fondements. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, coordonné par F. Homand
et P. Duffaut, 265 pages.

[03] 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.

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

[05] Zhao J., [2007], « Roches et massifs rocheux», part 1, cours de mécanique des roches,
L'école polytechnique fédérale de Lausanne.

[06] Sanat A.et Zidani N., [2015], «Etude de stabilité des talus de la carrière d'Ain El Kebira
(Wilaya de Sétif) vis -à-vis un glissement circulaire », Mémoire de fin d'étude en vue de
l'obtention du diplôme de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa.

[07] Elkhair Ahmed et Yahiaoui Kafia, [2012], « Etude numérique et confortement d'un
glissement de terrain », Projet de fin d'étude, Ecole national polytechnique.

[08] G. Philipponat et Bertrand Hubert [2003], « Fondation et ouvrages en terre », édition
Eyrolles.

[09] M'zoughem.K et Chenafa.W, [2006], « Etude géotechnique de la stabilité des talus dans
la carrière d'Ain El Kebira », Mémoire de fin d'étude, Université D'Annaba.

[10] Lebbad Salah Eddine, [2010], « Etude d'un glissement de terrain sur la RN 24
PK 113+500, Wilaya de Boumerdes », Projet de fin d'étude, Ecole national supérieure des
travaux public.

[11] Astrid, Leutwiler, [2009], « Processus de glissement de terrain », Office fédéral de
l'environnement (OFEV), Confédération suisse.

Facteurs influant sur la stabilité des talus dans le domaine minier

- [12] Y.Malécot, S. Levasseur, M. Boulon, and E. Flavigny ;(2004); « Inverse analysis on in situ geotechnical measurements using a genetic algorithm.Proceedings of the 9th Int. Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Ottawa, Canada ».
- [13] N.R.Morgenstern and V.E. Price ;(1965); « The analysis of stability of general slip surface. Géotechnique, Vol. 15».
- [14] Collin.F, Fox.R, Maquil, R, Schroeder, Ch ;2010 . Stabilité des Parois Rocheuses : Eboulement de la carrière RN 27 Michel au » ; Journée Technique, administration des ponts et chaussés de Luxembourg.
- [15] Zhao J., [2008], « Propriétés des discontinuités », part 3, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [16] Deere, D. U. A. J. Hendron, et al. Design of surface and near surface constructions in rock. Proc. 8 Th U.S. Symp. Rock Mechanics. C. Fairhurst, New York: AIME: 237-302. 1967.
- [17] Priest, S. D. and J. A. Hudson. "Discontinuity spacings in rock". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 13(5): 135-148. 1976.
- [18] Edelbro, C.Rock. "mass strength - a review. Technical Report", Lulea University of Technology: 130. 2003.
- [19] Palmstrom, A. "The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of jointing". Proceedings of the 4th International Congress IAEG. New Delhi, India. 5: 221-228. 1982.
- [20] Barton [1973]. «Review of a new shear strength criterion for rock joints». Engineering Geology. Elsevier, 7 pp. 287-332.
- [21] Michel Chalhoub, [2010], « massifs rocheux Homogénéisation et classification numériques.», Edition paris Tech Les Presses.
- [22] Maciej A., [2012], « Modification des classifications mécaniques pour les massifs rocheux schisteux », Thèse de maîtrise des sciences appliquées de l'université de Montréal, spécialité génie minier, 163 pages.

- [23] Hoek, E. and E. T. Brown. "Underground Excavations in Rock", London: Instn. Min. Metall. 1980
- [24] Schroeder Ch., [2010], « Etude de stabilité des parois rocheuses», Revenue de société Belge de géologie de l'ingénieur et de mécanique des roches (SBGIMR), 90 pages.
- [25] Rapport géologique actualise djebel medjounes -02 -2020.
- [26] Stead, D., Eberhardt, E., & Coggan, J. S. 2006. Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical model ling techniques. *Engineering Geology*, 83 217-235.
- [27] Jing, L. 2003. A review of techniques advances and outstanding issues in numerical model ling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40 283–353.
- [28] Jing, L., & Hudson, J. A. 2002. Numerical methods in rock mechanics. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39 409–427.
- [29] DURVILLE, J, L. HÉRAUD, H. “ Description des roches et des massifs rocheux “. *Technique de l'ingénieur, traité construction*, C352, pages13. (2001).
- [30] Adrián J. Riquelme Guill University of Alicante, SPAIN (2019)

ANNEXES

ANNEXE A

RQD (Rock Quality Designation)

Très médiocre	RQD = 0-25%
Médiocre	
Moyen	25-50
Bonn	50-75
excellent	75-90
90-100	
Note :	
(i) quand la valeur du RQD est <10 (y compris 0), on utilise une valeur nominale de 10 pour évaluer Q	
(ii) les intervalles RQD de 5, i.e. 100, 95, 90 , etc...sont suffisamment précis	

Jn (indice des familles de joints)

Roche massif, joints rares ou absents	Jn = 0.5 - 1
Une famille de joint	
Une famille + joints erratique	2
Deux familles	3
Deux familles + joints erratique	4
Trois familles	6
Trois familles + joints erratique	9
Quatre familles ou plus, joints erratique	12
Roche broyé, meuble	15
20	
Notes : (i) pour les intersections du tunnel, utiliser (3.0xJn), (ii) pour les tétés d'accès, utiliser (2.0xJn)	

Jr (indice de rugosité des joints)

a) Epontes en contact		c) Epontes hors contacte après cisaillement	
b) Epontes en contact après cisaillement de – de 10 cm			
Joint discontinus	Jr = 4	Zone argileuse d'épaisseur suffisent pou empêcher le contact Zone sableuse, graveleuse ou broyée d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact	Jr = 10
Joint ondulés, rugueux ou irrégulier			
Joint ondulés, lisses	3		
Joint ondulés, striés (lisses, luisants, polis)	2		
Joint plans, rugueux ou irréguliers	1.5		
Joint plans, lisses	1.5		
Joint plans, striés	1.0		
	0.5		
Note : (i) les descriptions se réfèrent à des éléments de petites ou moyennes dimensions, dans cet ordre		Note : (i) ajouter 1.0 si l'espacement moyen des joints est supérieur à 3 m. (ii) Jr=0,5 si les joints plans et striés comportent des aliénations et que celle-ci sont orientées de telle sorte qu'elles peuvent amorcer une rupture.	

Ja (indice d'altération de joints)

Epontes en contact	Caractère du joint		Condition	Epontes
	Joint propre	Joint serré, recimenté	Remplissage de quarz, épidote, etc.	Ja = 0.75
		Epontes non altérées	Pas d'enduit, taches superficielles	1
		Epontes légèrement altérées	Enduit minéral non radoucissant, grains sans argile	2
	Enduits ou remplissage	Enduits à frottement	Sable, silt, calcite, etc. (non radoucissant)	3
		Enduits à cohésion	Argile, chlorite, talc, etc. (radoucissant)	4
Epontes en ou hors contact	Remplissage	type	Epontes à contact remplissage léger (<5 mm)	Epontes hors contact remplissage épais
	Matériaux frottant	Sable, silt, calcite, etc.	Ja = 4	Ja = 8
	Remplissage fortement surconsolidé	Remplissage compact d'argile, chlorite, talc, etc.	6	5 - 10
	Remplissage légèrement surconsolidé	Surconsolidation légère ou moyenne d'argile, de chlorite, talc, etc.	8	12
	Remplissage d'argiles gonflantes	Matériaux gonflants (ex montmorillonite)	8 - 12	13- 20

Jw (influence de l'eau en charge)

Excavation à sec ou faibles venues d'eau (<5 l/min localement)	Pw < 1 kg/cm³	Jw = 1
Venues d'eau ou pression faibles, débouillage occasionnel au droit d'un joint	1- 2.5	0.66
Fortes venues d'eau ou pression importante dans du rocher à joint sans remplissage	2.5 – 10	0.5
Forte venues d'eau ou pression importante, débouillages fréquents	2.5 – 10	0.3
Très forte venues d'eau lors des tirs, diminuant ensuite avec le temps	> 10	0.2 – 0.1
Très forte venues d'eau lors ou pressions très importantes sans réduction notable avec le temps	> 10	0.1 – 0.05
Notes : (i) les 4 derniers indices sont des estimations grossières. Augmenter la valeur de Jw en cas de mise en place d'un dispositif de drainage. (ii) les problèmes particuliers liés à la formation de glace ne sont pas pris en compte		

SRF (stress Reduction Factor)

Ouvrage recoupant des zones de faiblesse provoquant la décompression du rocher lors du percement	Zones de faiblesse fréquentes, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement, rocher environnant très décomprimé (toutes profondeurs)	SRFT = 10
	Zone de faiblesse individuelle, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement (prof de l'excavation > 50 m)	5
	Zone de faiblesse individuelle, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement (prof. De l'excavation > 50 m)	2.5
	Nombreuses zones de cisaillement individuelle en rocher sain, sans argile (toutes profondeurs)	7.5
	Zones de cisaillement individuelle en rocher sains, sans argile (prof. de l'excavation < 50 m)	5
	Zones de cisaillement individuelle en rocher rigide, sons argile (prof. de l'excavation > 50 m)	2.5
	Joint ouverte, rocher très fracturé et décomprimé, « morceaux de sucre », etc... (toutes profondeurs)	5

Note : (i) réduire l'indice SRF de 25 à 50% si les zones de cisaillement influent sur l'excavation mais ne la traversent pas.

		σ_c / σ_1	σ_q / σ_c	SRF
Rocher sain, problème de contrainte in situ	Contraintes faibles, excavation peu profonde	>200	<0.01	2.5
	Contraintes moyennes	200-10	0.01-0.3	1
	Contraintes importante, structure très serrée (condition normalement favorable a la stabilité mais peut être défavorable à la tenue des piedroits)	10-5	0.3-0.4	0.5-2
	Mouvement de toit modéré (rocher massif)	5-3	0.5-0.65	5-50
	Quelques "chutes de toit " (rocher massif)	3-2	0.65-1	50-200
	"chutes de toit "importantes (rocher massif)	< 2	>1	200-400

Notes : (ii) si l'état de contraintes initiales est fortement anisotrope (si mesuré) : pour $5 < \sigma_1 / \sigma_3 < 10$, réduire σ_c à $0.75 \sigma_c$. Pour $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, réduire σ_c à $0.5 \sigma_c$.

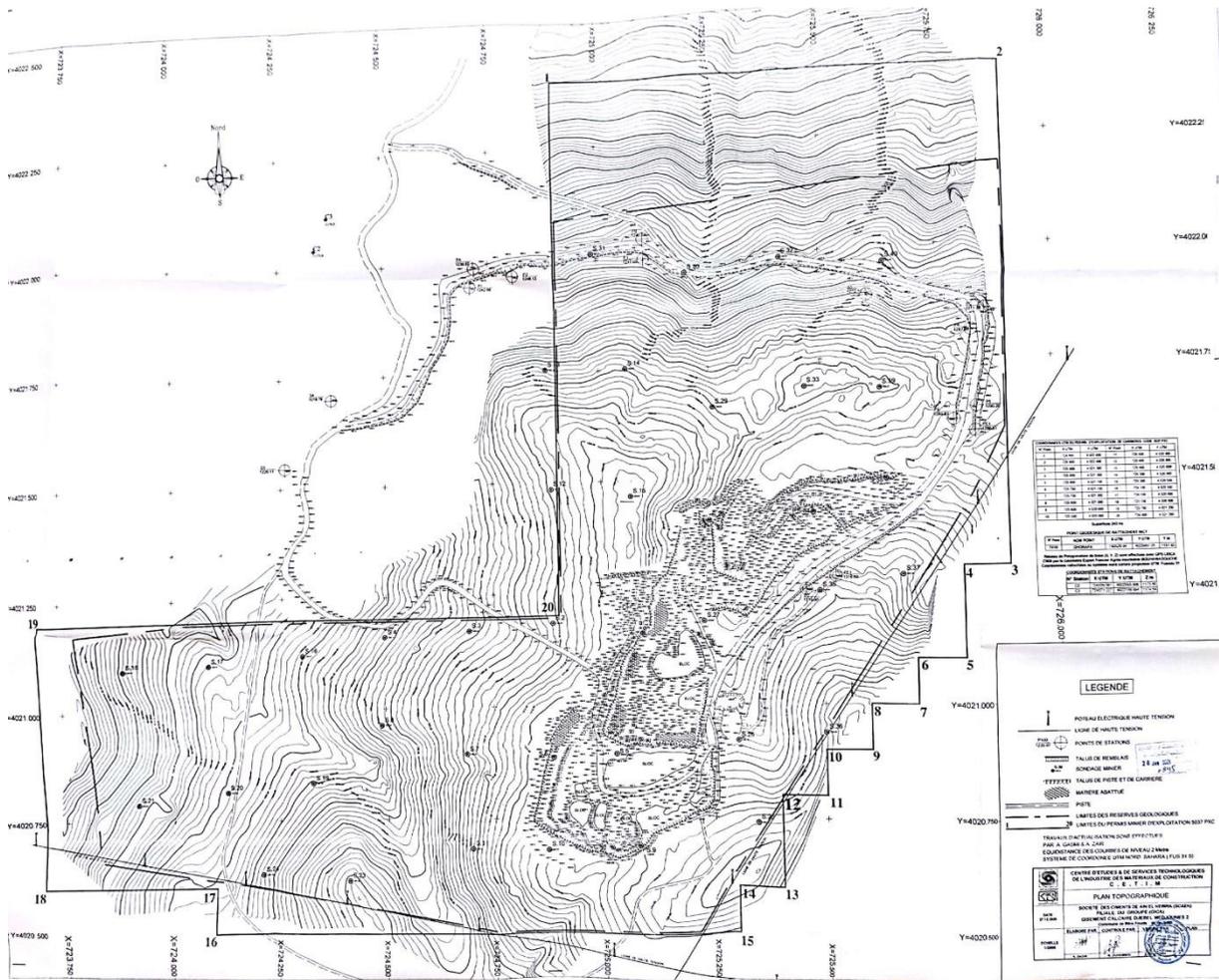
(iii) il est rare que la hauteur de couverture au-dessus du toit soit plus faible que la largeur de l'ouvrage. Si c'est le cas, il est suggéré de porter l'indice SRF de 2.5 à 5

			σ_0 / σ_c	SRF
Rocher "poussant"	Déformation plastique du rocher sous l'action de fortes contraintes naturelle	Moyenne pression	1-5	5-10
		Forte pression	>5	10-20
Rocher "gonflant"	Action chimique en fonction de la présence d'eau	Moyenne pression		5-10
		Forte pression		10-15

ANNEXE B

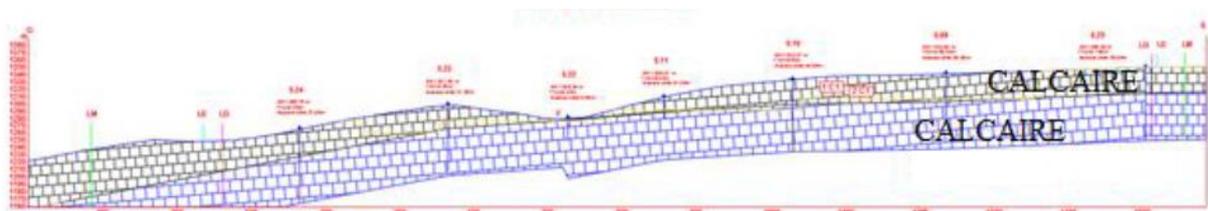
Définition de RMR d'après BIENIAWISKI (1989).

Paramètres			Plages de valeurs					
1	Résistance de la roche intacte	Indice Francelin Is	>10 MPa	4-10 MPa	1-2 MPa	Pour les faibles valeurs de Is utilise la résistance en compression uniaxiale		
		Résist. compr. uniax. σ_c	>250 MPa	100-250 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
		Notation	15	12	7	4	2	0
2	RQD		90 % - 100%	75% -90%	50%- 75%	25% -50%		< 25%
	Notation		20	17	13	8		3
3	Espacement		>2 m	0,6 m -2 m	200mm -600mm	60mm – 200mm		<60mm
	Notation		20	15	10	8		5
4	Nature des discontinuités		Surfaces très rugueuse non continues épontes en contact épontes non altérées	Surfaces légèrement rugueuses épaisseur < 1mm épontes non altérées	Surfaces légèrement rugueuses épaisseur < 1mm Epontes fortement altérées	Surface lustrées ou remplissage < 5mm ou épaisseur de 1 à 5mm joint continu		Remplissage mou < 5mm ou épaisseur > 5mm joint continu
	Notation		30	25	20	10		0
5	Eau	Débit sur 10 m de longueur de tunnel (l/min)	Aucun	< 10 l/min	10 à 20 l/min	25 à 125 l/min		>125 l/min
		Ratio pression pression eau /contr. princ σ_1	0	<0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5		>0,5
		Condition générale	Complètement sec	Humide	Mouillé	Suintant		débitant
		Notation	15	10	7	4		0
RMR = somme des notations des paramètres 1 à 5								
B. AJUSTEMENT DE LA VALEURE DE RMR EN FONCTION DE L'ORIENTATION DES DISCONTINUITES								
Direction de pendage			Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable	
Notation	Tunnel		0	-2	-5	-10	-12	
	Fondation		0	-2	-7	-15	-25	
	talus		0	-5	-25	-50	-60	
C. CLASSES DE MASSIF ROCHEUX DETERMINEES PAR RMR								
Valeur du RMR			100 - 80	80 – 61	60 - 41	21 - 40		< 20
Classe			I	II	III	IV		V
Description			Très bon rocher	Bon rocher	Roche moyen	Roche médiocre		Rocher très médiocre
D. PROPRIETES GLOBALES ATTRIBUEES AU MASSIF ROCHEUX EN FONCTION DES CLASSES								
Classe			I	II	III	IV		V
Temps de tenue sans soutènement			20 ans pour une portée de 15 m	1 an pour une portée de 10 m	1 semaine pour une portée de 5 m	10 h pour une portée de 2,5		30 min pour une portée de 1 m
Cohésion du massif rocheux (KPa)			>400 kPa	300 à 400 kPa	200 à 300 kPa	100 à 200 KPa		< 100 kPa
Angle de frottement du massif rocheux (°)			>45°	35° à 45°	25° à 35°	15° à 25°		< 15°



PLAN TOPOGRAPHIQUE

ANNEX D



:Coupe géologique du gisement calcaire de Djebel Medjounes

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier la stabilité des talus de la carrière d'Ain El Kebira (gisement de calcaire nouvelle extension -Sétif). Nous avons utilisés deux approches :les systèmes de classification de méthode empirique (RQD, RMR, GSI, SMR) et pour confirmer les résultats obtenu par ces derniers on a utilisé la méthode analytique (Méthode équilibre limite)à l'aide d'un logiciel de calcul de stabilité bien adapté aux problèmes de stabilité (Slide).A l'aide de ce dernier, il a été construit un modèle du gisement en se servant des caractéristiques physico-mécaniques des roches constitutifs ainsi que de la coupe géologique du gisement. Les méthodes de calcul utilisées sont : méthode de Bishop simplifiée, Janbu simplifié, spencer et GLE /Morgenstern Price.

Les résultats obtenus des systèmes de classification indiquent que le massif constituant les gradins de la carrière est stable. Les résultats trouvés confirmés par logiciel de calcul de stabilité (slide) étant donné que les massifs rocheux de la carrière sont stables.

Mots Clefs : Massifs rocheux -Stabilité des talus –Coefficient de sécurité –Calcaire –Carrière d'Ain El Kebira.

Abstract

The objective of this work is to study the stability of the slopes of the Ain El Kebira quarry "New extension limestone deposit" (Sétif). We used the empirical method classification systems (RQD, RMR, GSI, SMR) and to confirm the results obtained by them we used the analytical method (Limit equilibrium method) using a stability calculation software well suited to stability problems (Slide), to understand the failure mechanism. Using the latter, a model of the deposit was constructed using the physico-mechanical characteristics of the constituent lands as well as the geological section of the deposit. The calculation methods used are: simplified Bishop's method, simplified Junbu, spencer and GLE / Morgenstern Price.

The results obtained from the classification systems indicate that the massif constituting the steps of the quarry is stable. The results found confirmed by stability calculation software (slide) given that the rock massifs of the quarry are stable.

Keywords: Rock massifs -Stability of slopes –Safety factor –Limestone–Ain El Kebira quarry.

المخلص

الهدف من هذا العمل هو دراسة ثبات منحدرات مقلع عين الكبيرة "الامتداد الجديد للحجر الجيري" (سطيف) ، وقد استخدمنا أنظمة التصنيف بالطريقة التجريبية (RQD ، RMR ، GSI ، SMR) وتأكيد النتائج. تم الحصول عليها بواسطةهم ، استخدمنا الطريقة التحليلية (طريقة التوازن المحدود) باستخدام برنامج حساب الاستقرار المناسب تمامًا لمشاكل الاستقرار (Slide) ، لفهم آلية الفشل. باستخدام الأخير، تم إنشاء نموذج للودائع باستخدام الخصائص الفيزيائية الميكانيكية للأراضي المكونة وكذلك القسم الجيولوجي للودائع. طرق الحساب المستخدمة هي: طريقة Bishop المبسطة و Junbu و Spencer و GLE / Morgenstern Price.

تشير النتائج التي تم الحصول عليها من أنظمة التصنيف إلى أن الكتلة المكونة لتدرجات المحجر مستقرة ، وقد تم تأكيد النتائج بواسطة برنامج حساب الثبات (شريحة) مع العلم أن كتل الصخور في المحجر مستقرة.

كلمات مفتاحية : كتل صخرية - استقرار المنحدرات - معامل الأمان - الحجر الجيري - محجر عين الكبيرة.

