



République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et la Recherche
Scientifique



Université Larbi Tébessi. Tébessa
Faculté des Sciences Exactes, des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences de la Terre et de l'Univers

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Master

Domaine : Science de la Terre et l'Univers

Filière : Géologie

Option : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Thème :

**Instabilité rocheux caractérisation et stabilisation
cas de la route entre Hammam Bni Haroun et el
Milia.**

Présenté par :
Bouali Afaf
Zeghdani Aouatef

Devant le jury :

Fahdi chams Eddin	Professeur	Université de Tébessa	Président
Boumezbeur Abderrahmane	Professeur	Université de Tébessa	Rapporteur
Mouici Ridha	M .C . D	Université de Tébessa	Examineur

Date de soutenance: /06/2019

Note: Mention :

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail
A la lumière de ma vie mon père sebeti et ma mère laareffa
A ma tante Aldjiia
A mes sœurs wahiba Nadiya et khawela
A mes frères Mounir Sami Mohammed et Khaled
L'épouse de mon frère Ithem
A ma cousine Salwa
A mes amies wahiba Amina Bassema saousen
A Tous les étudiants (e) masters 2 en géologie de l'ingénieurs*

Afaf

DEDICACE

*C'est avec toute l'ardeur de
Mes sentiments que
je dédie ce modeste travail qui est le fruit de ma
Profonde reconnaissance à :*

*Mes parents, zeghdani Abdelhamid. Zeghdani
chahla et dieu les gardes et les protèges.
Mes chères sœurs et mes belles sœurs.*

SABAH LIKA AMAL

La Famille : Zeghdani.

Ma très chère amie : Khaoula. Haïfa .Bissou.

Safa .Yousra. Zizou Maïssa. Racha

.Hanane. ABla.

Et surtout mon ami : Bakhouche Badis

Et mon ami Ridha triki

Mes enseignants : Dr .Fahdi naoufel

Dr. Dgaichia omor,

et mes amis de l'étude.

Tous ceux que j'aime dans le monde.



Remerciements

Nous remercions DIEU tout puissant, maître des cieux et de terre, qui nous a permis de mener à bien ce travail.

*Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement (**Dr. Boumazber Abderrahmane**) qui nous a permis de bénéficier de son encadrement. Les conseils qu'il nous a prodigués, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.*

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

ملخص

تحدث الاضطرابات الصخرية وسقوط الصخور من وقت لآخر على طول الطريق بين سيدي معروف والميلية. في السنوات الأخيرة ، أثرت العديد من الانهيارات الأرضية على هذه المنطقة ، مما يشكل تهديداً خطيراً لسلامة المستخدمين. في الواقع ، ما لا يقل عن نهاية شهر مارس 2019 حوالي الساعة 4 مساءً ، تم تجنب سقوط كتلة كبيرة من الصخور أو الكوارث بأعجوبة. إذا كانت الممارسات القديمة تتمثل في تثبيت الجسر أو الجرف بعد فشله الأخير ، فإن تحليل الاستقرار إما عن طريق طريقة توازن الحد أو عن طريق الأساليب التجريبية مثل SMR. في هذه الدراسة ، تم توصيف الكتلة الصخرية. لهذا استخدمنا RMR و GSI وهما 40 و 45 على التوالي. الكتلة الصخرية هي من نوعية متوسطة إلى متوسطة جداً. أظهر تحليل الاستقرار أن الجسر غير مستقر في عدة نقاط. يبلغ متوسط قيم SMR 30 ، وهي سمة من السدود التي يمكن أن تظهر من وقت لآخر عدم الاستقرار في الزوايا أو القطع. أظهر تحليل المخاطر لعدم الاستقرار والصخور باستخدام طريقة نظام تقييم مخاطر الروك الجديد (RHRS) أن الخطر متوسط وأن استجابة الحد من المخاطر ليست ملحة. ولكن يُنصح دائماً بإجراء عمليات مراقبة ، لتقليل الخطر ، خاصة قبل وبعد سقوط الامطار الكثيفة .

Abstract

The rocky instabilities and rock falls that occur from time to time along the road section between Sidi Maarouf and El Milia. In recent years, several landslides have affected this area, posing a serious threat to the safety of users. In fact, no less than the end of the month of March 2019 around 4 pm, a fall of a large mass of rock or disaster was miraculously avoided. If the old practices were to stabilize the embankment or the cliff after its recent failure it is the stability analysis either by the method of the limit equilibrium or by the empirical methods such as the SMR.

In this study, a characterization of the rock mass was established. For this we used the RMR and GSI which are respectively 40 and 45 respectively. The rock mass is of average quality to mediocre.

Stability analysis showed that the embankment is potentially unstable at several points. The SMR values are averaging 30, characteristic of an embankment that can from time to time show instability in corners or blocks.

The risk analysis for instability and rockfall using the New Rockfall Hazard Rating System (RHRS) method has shown that the risk is medium and the response to remediation is not urgent. But it is always advisable to make periodic inspections to reduce alea especially before and after heavy showers.

Résumé

Les instabilités rocheuses et les chutes de pierres qui surviennent de temps à autre le long du tronçon routier entre Sidi Maarouf et El Milia. Au cours des dernières années, plusieurs éboulements ont affecté cette zone, représentant une menace sérieuse pour la sécurité des usagers. En réalité, pas moins que la fin du mois de mars 2019 vers 16h de l'après midi, une chute d'une masse importante de roche ou une catastrophe a été évité par miracle. Si les pratiques anciennes étaient de la stabiliser le talus ou la falaise après son échec récemment c'est l'analyse de stabilité soit par la méthode de l'équilibre limite ou par les méthodes empiriques telles que le SMR.

Dans cette étude, une caractérisation de la masse rocheuse a été établie. Pour cela on a utilisé le RMR et GSI qui sont respectivement de 40 et 45 respectivement. La masse rocheuse est donc de qualité moyenne à médiocre.

L'analyse de stabilité a montré que le talus est potentiellement instable en plusieurs points. Les valeurs SMR sont en moyennes de 30, caractéristique d'un talus qui peut d'un temps à autre montrer de l'instabilité en coins ou en blocs.

L'analyse du risque associé aux instabilités et chutes de pierres en utilisant la méthode New Rockfall Hazard Rating System (RHRS) a montré que le risque est moyen et que l'intervention pour la remédiation n'est pas urgente. Mais il est toujours recommandé de faire des inspections périodiques pour réduire l'alea surtout avant et après les fortes averses.

Table de matière

- Dédicace	
- Remerciements	
ملخص	I
- Abstract	II
- Résumé.....	III
- Liste des tableaux.....	IV
- Liste des figures.....	V
- Liste des symboles.....	VI
- Introduction générale	1

Chapitre I

Localisation et Géologie

I-1. Introduction.....	4
I.2. Domaine interne.....	4
I.2.1. Le socle Kabyle.....	4
I.2.2. La dorsale Kabyle.....	5
I.3. Domaine des flyschs.....	5
I.3.1. Les flyschs maurétanien.....	5
I.3.2. Les flyschs massyliens.....	7
I.3.3. Le domaine externe.....	7
I.4. Les séries postérieures à la phase fini-lutétienne.....	7
I.4.1. Le Nummulitique II.	7
I.4.2. L'Oligo-Miocène Kabyle et les Olistostromes.....	7
I.5. Principales phases tectonique.	7
I.5.1. Les phases tectoniques mésozoïques.....	8
I.5.1.1. La phase jurassique supérieur.	8
I.5.1.2. La phase Anté-sénonienne.....	8
I.5.2. Les phases tectoniques tertiaires.....	8
I.5.2.1. La phase priabonienne.....	8
I.5.2.2. La phase Burdigalien.	8
I.5.2.3. La phase tortonienne.....	9
I.6. La tectonique récente.....	9
I.7. Géologie du massif étudié.....	9
I.8. Conclusion.....	12

Chapitre II

Caractérisations des masses rocheux et classification.

II.1 Introduction.....	14
II.1.2. Généralité sur les massifs rocheux.....	14
II.1.2.1. Classification géologique des roches.....	14
II.1.2.2. Les massifs rocheux.....	15
II.1.2.3. Les discontinuités.....	16
II.1.2.4. Types de discontinuités.....	16
II.1.2.4.1 Paramètres géométriques des discontinuités.....	17
II-2. Méthodes de classification des massifs rocheux.....	18
II.2.1. Les classifications géo mécaniques	18
II.2.1.1. Types et buts des systèmes de classification	18
II.2.1.2. Rock Mass Rating (RMR).....	20
II.2.1.3 Le Système Q	24
II.2.1.4 Le Geological Strength Index (GSI)	26
II.2.1.5- Slope Mass Rating (SMR).....	30
II.3. Conclusion.....	32

Chapitre III stabilité des talus rocheux et méthodes d'analyse.

III 1. Introduction.....	34
III . 2. Rôle de la géologie dans la stabilité des talus rocheux.....	34
III. 3 : Facteurs influençant la résistance des roches.....	35
III. 4. Eau souterraine.....	37
III. 4.1 : Le cycle hydrologique.....	37
III. 5. La rupture planaire.....	39
III.6. Conditions mécaniques et géométriques de la rupture plane.....	39
III.6.1 Analyse de la rupture plane	41
III.6.2 Analyse de glissement par la méthode de projection stéréographique	42
III.6.3 Rupture en coin.....	42
III.7. Analyse de la rupture en coin.....	43
III. 8. Rupture circulaire.....	45
III.8.1. Conditions de rupture circulaire et méthodes d'analyse.....	46
III.8.2 Risque de chute de pierres.....	47
III.8.3 Localisation des parties instables sur un talus	48

III.8.4 Évaluation de la fréquence des chutes de pierres.....	50
III.9. Conclusion.....	51

Chapitre IV condition de rupture circulaire et méthodes d analyse

IV.1.Introduction	53
IV.2 Risque de chute de pierres.....	54
IV.3 Localisation des parties instables sur un talus	56
IV.4 Évaluation de la fréquence des chutes de pierres.....	56
IV.5. Estimation de l’alea chute de pierres.....	60
IV.5.1 Le système d’évaluation de l’alea chute de pierres (The rockfall hazard rating system).....	60
IV .5.2 Le système modifié d’évaluation de l’alea chute de pierres (The modified rockfall hazard rating system).....	61
IV .5.2.1 La hauteur du talus.....	61
IV.5.2.2 L’efficacité des fossés.....	61
IV.5.2.3 Le risque moyen lié au véhicule.....	62
IV.5.2.4 La distance de décision.....	62
IV.5.2.5 La largeur de la route (Roadway width).....	63
Conclusion générale.....	65
Bibliographie.	

Liste des figures

Figure N°	Titre	Page n°
I.1	Extrait de la carte structurale de la chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens (D'après Vila, 1980).	5
I.2	phase tangentielle tortonienne majeure, à vergence Sud. Selon Vila (1980).	9
I.3	Carte montrant le massif étudié. (Extraite de la carte de D. Delga 1955).	10
I.4	Coupe géologique montrant la relation structurale entre le massif étudié (J^o) et les autres unités géologiques.	11
II.1	rock mass and intact rock and stress-strain plot.	15
II.2	Schéma montrant les discontinuités sur la face d'un élément de massif rocheux.	18
II.3	illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR.	20
II.4	notes RMR de la masse rocheuse selon les différentes classes de résistance mécanique exprimée en Rcs.	21
II.5	note RMR selon les valeurs du RQD	21
II.6	note RMR relative au espacement des joints.	21
II.7	note RMR relative aux conditions des joints.	22
II.8	Note RMR relative aux conditions hydraulique	22
II.9	Rating adjustments for discontinuity orientations.	23
II.10	orientation des joints par rapport à l'orientation des joints.	23
II.11	effets de l'orientation de discontinuité dans la construction de tunnels.	23
II.12	Carte générale des estimations GSI à partir de l'observation géologique.	27
II.13	estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse d'après Hoek et Brown 1995.	28
II.14	Force géologique estimations de l'indice pour hétérogènes masses rocheuses telles que Flysch.	29
II.15	correlations entre les différentes méthodes de classification	30
III.1	Diagramme idéalisé montrant la transition de roche intacte à la masse rocheuse articulée avec l'augmentation de la taille de l'échantillon	35
III.2	Parois rocheuses formées par plans de discontinuités persistantes	36

III.3	Rupture circulaire superficielle dans un massif rocheux fortement jointif (basalte peu jointif, légèrement altéré).	37
III.4	Représentation simplifiée d'un cycle hydrologique montrant certaines sources typiques d'eaux souterraines (modifié de Davis et de Wiest (1966)).	38
III.5	Relation entre le niveau de la nappe phréatique et les précipitations (modifiée de Davis et de Wiest (1966)).	39
III.6	Rupture plane sur un joint stratigraphique lisse et persistant (Interstate 40, near Newport, Tennessee).	39
III.7	Conditions de rupture plane	40
III.8	condition de rupture avec une fissure traction.	40
III.9	Schéma montrant le cas stable et instable d'un talus rocheux par la méthode de projection stéréographique.	42
III.10	conditions géométriques pour la rupture d'un coin	43
III.11	schemat montrant l analyse graphique de la repture	44
III.12	Facteur de coin K en fonction de la géométrie du coin.	45
III.13	Rupture circulaire dans des granites fortement altérés (Highway 1, near Devil's Slide, Pacifica, California).	46
IV.1	les paramètres connus par Geological Strength Index (GSI)	57
IV.2	L'état de la roche masse le long de la route	58
IV.3	Les zones sources de chute de pierres	59
IV.4	correlation between Descision sight distance (D_a) and vehicle velocity (v) for different longitudinal slopes (i) (after CNR,1980).	62

Liste des tableaux

Tableaux N°	Titre	Page n°
II.1	Ce tableau énumère les systems de classification des roches pour l'utilisation géotechnique.	19
II.2	Présente les paramètres de la classification du système (Q	25
II.3	présente évaluation de la cote (Q) et la qualité du massif.	26
III.1	summary of rockfall hazard rating system	47
III.2	Classification (romana .1985) .	48
IV.1	summary sheet of rock fall hazard rating system	53
IV.2	SMR classification Romana 1985 .	54
IV.3	position de l'état de stabilité du talus en question dans le tableau de classification SMR (Romana ,1991).	58
IV.4	summary sheet of rock fall Hazard Rating System (after Pierson et al .1990).	60
IV.5	Summary sheet of the modified rock fall Hazard Rating System	61
IV.6	Application example of the modified RHRS methode .	63

Notations

C : La cohésion.

E_{éq}: Module de Young.

F_s : Coefficient de sécurité.

RCS: La résistance à la Compression Uniaxiale.

τ: résistance au cisaillement.

σ_n : Contrainte normal.

φ : Angle de frottement interne.

α_i :Direction .

ψ_i : plongement.



Abréviations

JRC: Joint Roughness Coefficient.

MEF: Méthode des Eléments Finis.

RMR: Rock Mass Rating

RQD: Rock Quality Designation

SMR: Slope Mass Rating

GSI : Geological Strength Index

Introduction générale

Les couloirs de transport notamment dans les régions montagneuses et spécialement ceux passant le long des pieds de falaises sont souvent menacés par les glissements de terrain et les chutes de blocs. Les glissements et les chutes de pierres constituent un risque majeur pour les usagers des routes dans ces régions, ils ont fait des victimes et des dégâts importants à travers le monde. Dans ces conditions, l'estimation du risque et danger découlant de cette aléa est extrêmement complexe. En réalité, les conditions de stabilité requises pour les talus rocheux varient en fonction du type de projet et des conséquences de la rupture. Par exemple, pour les routes à intensité importante de trafic, le long du pied d'une falaise, il faut que le talus global soit stable et qu'il y ait peu ou pas de chutes de pierres qui atteignent les voies de circulation. Car une petite pierre qui se détachant d'une hauteur importante peut induire des dommages importants.

Il devient alors impératif d'établir une évaluation minutieuse des conditions de la masse rocheuse et de la stabilité de chaque élément de la surface du talus. Cela se ramène à faire une analyse de stabilité de l'ensemble du talus de déblais ou de la falaise.

Dans les milieux rocheux, la stabilité est souvent tributaire des conditions de la masse rocheuses, de l'orientations du talus et de certaines conditions non stationnaires telles que les séismes et les fortes pluies. Les facteurs responsables des instabilités sont souvent classés en deux catégories. Les facteurs quasi-statiques, ils sont liés à la géologie et la structure du massif et les facteurs déclencheurs qui sont souvent les séismes et les précipitations le gel et le dégel, la croissance des racines des plantes (Duncan and Norman, 1996). . L'évaluation du risque de chute de pierres est une question difficile pour un certain nombre de facteurs contrôlant la variabilité de l'intensité des glissements de terrain (énergie cinétique) le long de la trajectoire des blocs rocheux. Les discontinuités telles que failles, joints, joints de stratification, plans de schistosités sont tous des plans de faiblesses le long des quelles la résistance de cisaillement est la plus faible Parmi ceux-ci, l'emplacement du décollement initial, la mobilité complexe du bloc rocheux en fonction de l'énergie potentielle gravitationnelle (hauteur et masse relatives des blocs rocheux), la morphologie du sol et ses propriétés mécaniques doivent être pris en compte.

Dans le tronçon routier entre Sidi Maarouf et El Milia, les chutes de pierres et les glissements de terrains dans les falaises rocheuses naturelles ou le long des talus de déblais menacent la sécurité des usagers de la route en longueur d'année. En mois de Mai, 2019 vers 13 h de l'après midi, une masse importante de débris de roches a soudainement tombé sur une partie de la route causant une panique pour les voyageurs. Un véhicule a percuté légèrement cette masse de débris, heureusement, qu'il n'y avait pas grand dommage au véhicule ni aux passagers.

Ce type d'événement n'est pas rare et survient plusieurs fois durant l'année surtout en période de l'hiver.

Dans cette étude, l'approche adoptée consiste à faire un aperçu sommaire sur la géologie et l'histoire des déformations des roches de la région. Il s'agit en réalité d'une région qui a subi plusieurs épisodes de déformation résultant en la genèse de plusieurs familles de discontinuités rendant le massif en question, de point de vue géomécanique moyen à médiocre.

La première phase de l'analyse a consisté en des analyses géologiques, structurales et géomorphologiques détaillées du talus rocheux. Par la suite, des observations géologiques, et des prises de photos sur une bonne partie du talus. L'étude porte principalement sur l'acquisition de paramètres standard pour la masse rocheuse (ISRM, 1978; Priest and Hudson, 1981; Priest, 1993). Le RQD et la résistance à la compression uniaxiale (UCS) ont été estimés. De plus, les discontinuités telles que les failles et les joints ont été prises en compte sur des photos prises sur le talus.

Ensuite le (SMR) Slope Mass Rating est un système de notation prenant en compte à la fois la qualité de la masse rocheuse et la géométrie du talus pour estimer la stabilité du talus et déterminer ainsi les zones susceptibles d'être sources de chute de pierres.

Pour évaluer les dangers et les risques liés aux chutes de pierres, plusieurs approches qualitatives et quantitatives ont été proposées dans la littérature scientifique. Par exemple, le système d'évaluation du risque de chute de pierres, (Rock hazard rating system RHRS) mis au point initialement par Pierson et al. est une approche de notation permettant d'identifier les pentes dangereuses nécessitant des travaux de restauration urgents ou des études complémentaires le long des voies de communication. Ce système de classification et d'évaluation du risque a été appliqué pour notre étude et a donné des résultats que nous jugeons intéressants pour prendre les mesures de remédiation les plus adéquates.

Chapitre I géologie et localisation

I.1 Introduction.

Le nord de l'Algérie, sur le plan géologique, est une partie de la chaîne Alpine du Maghreb qui s'étend depuis le Gibraltar jusqu'à la Calabre (Gelard 1969; Aubouin 1977; Wildi 1983). Transversalement du nord au sud on rencontre une succession de paléo-domaine qui sont le domaine interne, le domaine médiane et le domaine externe. Le domaine interne est essentiellement formé d'un socle métamorphique anté-triasique et sa couverture calcaire mésozoïque (Durand Delga 1969; Raoult 1974; Bouillin 1977; Vila 1980; Mahdjoub 1991). Le domaine median est formé par des flysch du crétacé et Eocène avec un caractère pelitique dominant. (Gelard 1969; Raoult 1969). Le domaine externe ou domaine tellien, est dominé par des carbonates (calcaire et marne) d'âge néocomien – luthétien (fig. 1).

La région entre Beni Haroun et El Milia, située dans la zone la transition entre le domaine interne, représenté par les formations cristallophylliennes du socle kabyle et leur couverture sédimentaire, et le domaine externe, représenté par les formations des flyschs et les formations telliennes se particularisent par un dispositif structural assez complexe. Ce dispositif est marqué par un empilement de nappes, dont la plus importante celle du socle kabyle. En effet, dans la région de Sidi Marouf, le socle kabyle apparaît nettement charrié sur les formations des flyschs, qui eux sont charriés sur les formations telliennes. Cet empilement de nappes est affecté par de grands accidents tectoniques d'ampleur régionale. Ces accidents tectoniques ont largement favorisé la remontée des formations évaporitiques du Trias et le développement d'une intense fracturation des roches, notamment les roches carbonatées. La superposition de plusieurs événements tectoniques a engendré le développement d'une intense fracturation, ce qui a grandement facilité la circulation de fluides hydrothermaux et le dépôt de minéralisations.

I.2. Domaine interne.

Il correspond à la partie septentrionale du sillon Théticien représenté actuellement par le socle et sa couverture sédimentaire. Le socle est constitué des terrains métamorphiques notamment des gneiss intercalés avec des amphibolites à la base surmontés par des phyllades

I.2.1. Le socle Kabyle.

Une grande partie du socle affleure en Petite Kabylie. Il est caractérisé par des terrains métamorphiques de nature variée (Vila, 1980), il comprend à sa base, des gneiss à intercalations de marbres et d'amphibolites, sur lesquels se déposent des phyllades et des porphyroïdes ocellés (Wildi, 1983).

I.2.2. La dorsale Kabyle.

Appelée aussi la chaîne calcaire, elle se situe (Raoult, 1974 ; Bouillin, 1977) au Sud du socle Kabyle formant leur couverture. Elle est caractérisée par ses formations surtout carbonatées dont l'âge allant du permo-trias au lutétien (Bouillin, 1977) et recouvert par des terrains grésomiacés d'âge priabonien à oligocène supérieur.

I.3. Domaine des flyschs.

Par rapport aux zones externes, les flyschs occupent une position allochtone et repose en différents modes sur les zones internes (Vila, 1980). Les travaux de Gélard et Raoult (1969) ont permis de signaler deux grands types de flysch gréseux, respectivement, le flysch maurétanien, et le flysch massylien. A ces deux types de flyschs s'ajoute le flysch Numidien.

I.3.1. Les flyschs maurétanien.

Il est formé par une série allant du Tithonique à l'Oligocène (Bouillin, 1977). Du Tithonique jusqu'à l'Albien moyen, un terme flyschoidé à calcaire fin surmonté par un flysch argilo-gréseux, qui se poursuit par des micro-brèches dures à ciment calcaire, le Sénonien supérieur et le Paléocène comprennent des conglomérats et des calcaires micro-brèchique recouvert au sommet, par des flysch grésomiacés du Priabonien-Oligocène.

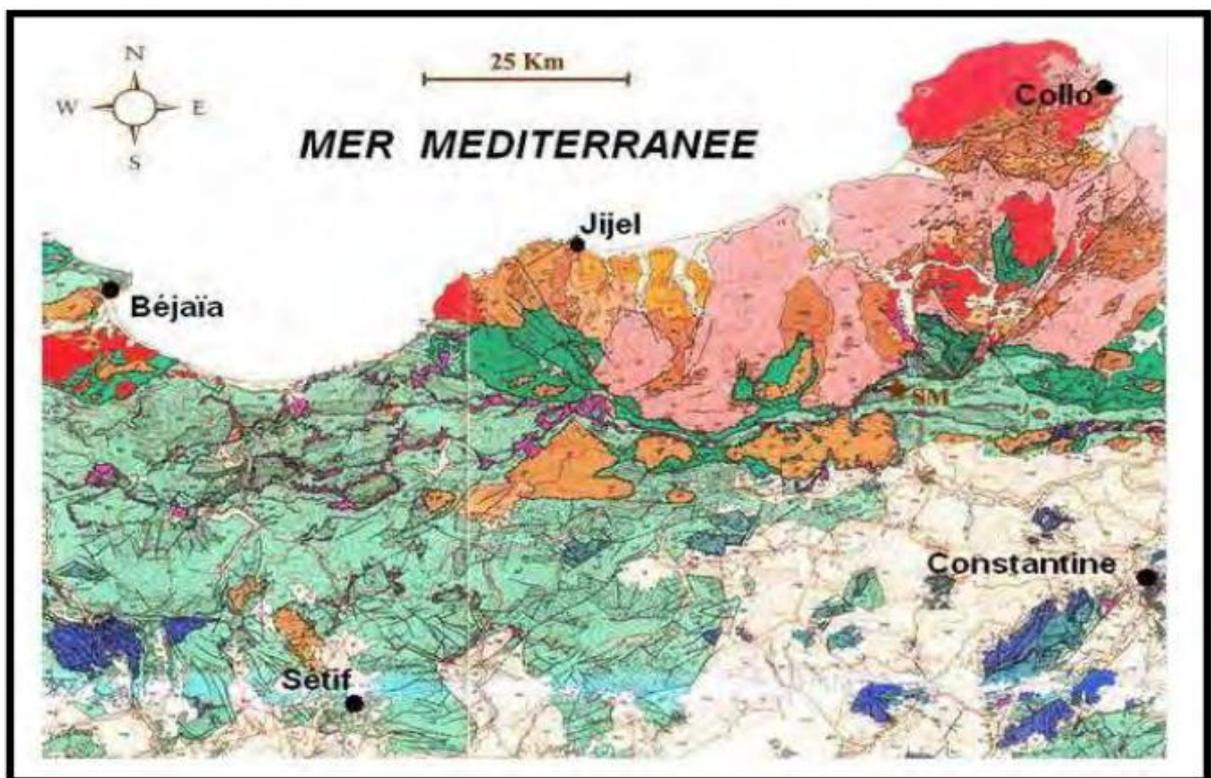


Figure I.1: Extrait de la carte structurale de la chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens (D'après Vila, 1980).

Roches récentes et cycles postérieurs au Burdigalien inférieur

- Quaternaire indifférencié (Villafranchien à actuel)
- Pliocène marin des zones côtières
- Mio-pliocène continental
- Burdigalien supérieur- Langhien de la marge littorale
- Miocène marin transgressif indifférencié des nappes telliennes et de leur avant- pays allochtone, paraautochtone ou autochtone

Roches éruptives récentes

- Granites, grano- diorites, microgranites, dolérites et rhyolites
- 0: Complexe stratifié de Yaddène et roches effusives de la région d'Hamman Meskoutine(β)

Cas de séries des Achaïch (série médiane) :
 1- Crétacé 2- Jurassique
 3- Permo-Trias et Carbonifère

Unité Sendouah-Tabellout à substratum basique

Flyschs massiliens

Séries typiques à phanites ou à brèches vertes et rouges

Cas de la série de Dj.Filfila :
 1- Crétacé 2- Jurassique.

Unités de type : A- Adissa (Eocène) et F- Sénonien marneux à microbrèches ou à blocs

Nappe numidienne

- Formation de Babouche (Aquitano- Burdigalien)
- Grès numidiens et séries mixtes
- Principaux affleurements d'argiles de base à Tubotomaculum

Nappes telliennes

- Oligocène marneux, argileux ou gréseux
- Priabonien à blocs

Nappe ultra-tellienne

- Séries types (Néocomien Lutétien sup) marneuses et marno-calcaires à Crétacé clair
- Série de Dj.Edough : CE : couverture Secondaire sédimentaire épimétamorphique SE : socle du Dj.Edough.
- Série inf du Dj.Safia : 1-Sénonien à biomicrites et conglomérats 2-Crétacé inf marneux et marno-calcaire 3-Jurassique

Socle kabyle, chaîne calcaire

- O.M.K, olistostromes à flyschs resédimentés (y compris le numidien) et flyschs en position Nord- kabyles (F')
- Olistostromes superposés à L'O.M.K; OT: olistolites tellien de la région d'El Milia
- Chaîne calcaire : Paléozoïque à Lutétien sup. des zones internes, médiane et externes
- Socle kabyle: SBA-Paléozoïque de Beni Afeur SK- métamorphique de petite kabylie et du Bou- Hatem SB- basique du Cap Bougaroun

Nappes de flyschs kabyles

- Flyschs maurétaniens
- Séries internes
 - Séries médianes
 - Séries externes

Nappes telliennes s.s

-  1-Yprésien à Priabonien basal (?)
-  2-Crétacé moyen à Paléocène
-  3-Crétacé inférieur
-  4-Jurassique

Nappe péni-tellienne et unités méridionales à nummulites

Nappe péni-tellienne

-  1-Crétacé à Sénonien
-  2-Crétacé inférieur
-  3-Jurassique du Dj.Akhal

Unités méridionales à nummulites

-  1-Yprésien à Lutétien supérieur
-  2-Crétacé supérieur et Paléocène

Ensemble allochtone Sud-Sétifien

-  1-Eocène à Thersitésés et à galets des écaillés méridionales
-  2-Crétacé moyen et supérieur.
-  3-Crétacé inférieur
-  4-Jurassique carbonaté

Nappe néritique constantinoise

- Séries entièrement carbonatées à Sénonien transgressif réduit :
 1-Cénomaniens, Turonien et Sénonien transgressif 2-Crétacé inf (Néocomien à Albien) 3-Jurassique et Trias de la station du Nador

Trias exotique ou extrusif

- Argiles, gypses broyés et glaçons calcaire-dolomitiques
- Trias resédimenté
- ★ La mine de Sidi Marouf

I.3.2. Les flyschs massyliens.

Ils sont représentés par une alternance d'argile et de quartzite en bancs décimétriques du Crétacé inférieur (Bouillin, 1977), suivie par des calcaires fins et niveaux de phtanites noirs du Cénomaniens (Djellit, 1987). Au sommet, un ensemble du Crétacé supérieur (Vila, 1980) caractérisé par une alternance d'argile et de micro-brèche tendre en petits bancs. A Sidi Marouf et à Kef Boulehmane, les flysch massyliens affleurent en contact anormal avec les formations telliennes.

I.3.3. Le domaine externe.

Ce sont des formations définies par Vila (1980) comme étant des séries épaisses à dominante marneuse issues du sillon tellien. Les phases tectoniques tertiaires (Wildi, 1983) ont fractionné les séries telliennes en trois grandes entités, agencées du Nord vers le Sud (Vila, 1980) comme suite

1. Les séries ultra-telliennes.

Elles comportent un crétacé marneux et micritique clair, sur lesquels se dépose l'éocène à trois termes : marnes sombres à boules jaunes, calcaires à silex noirs et des marnes sombres.

2. Les séries telliennes

Elles comprennent globalement, un Jurassique essentiellement carbonaté, suivi par des marnes pélitiques gréseuses d'âge Crétacé inférieur, qui, deviennent exclusivement marneuses et marno-calcaires jusqu'à l'Eocène supérieur.

3. Les séries péni-telliennes.

Le terme péni-tellien a été créé pour désigner une série allochtone du versant nord du Djebel Zouaoui, dans le massif du Chettaba, près de Constantine (Vila, 1980). Les séries présentent (Wildi, 1983), du Lias au Sénonien supérieur, des alternances de faciès telliens typiques et de faciès rappelant ceux des domaines néritiques sétifiens ou constantinois.

I.4. Les séries postérieures à la phase fini-lutétienne.

I.4.1. Le Nummulitique II.

Il s'agit (Bouillin, 1977) de formations grés-micacées, d'âge Priabonien à Oligocène supérieur qui constituent la couverture des séries de la chaîne calcaire et des flyschs maurétaniens.

I.4.2. L'Oligo-Miocène Kabyle et les Olistostromes.

L'Oligo-Miocène Kabyle ou OMK, constitue (Bouillin, 1977) la couverture stratigraphique transgressive et discordante du socle kabyle. Elle est formée de grés micacés, admettant des conglomérats à leur base d'âge Oligocène supérieur, et des silexites d'âge

Aquitanien, à leur sommet. A cet Oligo-Miocène kabyle succèdent des Olistostromes, formations tectono-sédimentaires à débris de flyshs, dont l'âge est essentiellement Aquitanien et Burdigalien supérieur.

I.5. Principales phases tectonique.

La chaîne des maghrébides a connu durant sa formation une intense activité tectonique. La succession des événements tectoniques sont à l'origine de la structuration de cette chaîne, notamment durant le tertiaire. Selon la littérature géologique, les principales phases tectoniques qui ont marquée cette chaîne peuvent être résumées comme suite :

I.5.1. Les phases tectoniques mésozoïques.

I.5.1.1. La phase jurassique supérieur.

Cette phase souligne la fin d'une période distensive et subsidente. Dans les zones telliennes, les structures associées sont avérées par des discordances angulaires marquant la base du crétacé inférieur (Wildi, 1983).

I.5.1.2. La phase Anté-sénonienne.

Elle correspond à une phase de compression a engendré des plissements orientés EstOuest, ainsi qu'une forte schistosité de fracture (Wildi, 1983).

I.5.2. Les phases tectoniques tertiaires.

I.5.2.1. La phase priabonienne.

Appelée aussi la phase fini-lutétienne ou encore la phase atlasique (Raoult, 1974), d'âge priabonien (Eocène supérieur). D'après Vila (1980), la tectonique priabonienne marque un grand cycle sédimentaire commencé avec le trias supérieur et dont l'organisation n'a pas été perturbée malgré des manifestations compressives fortes mais locales.

I.5.2.2. La phase Burdigalien.

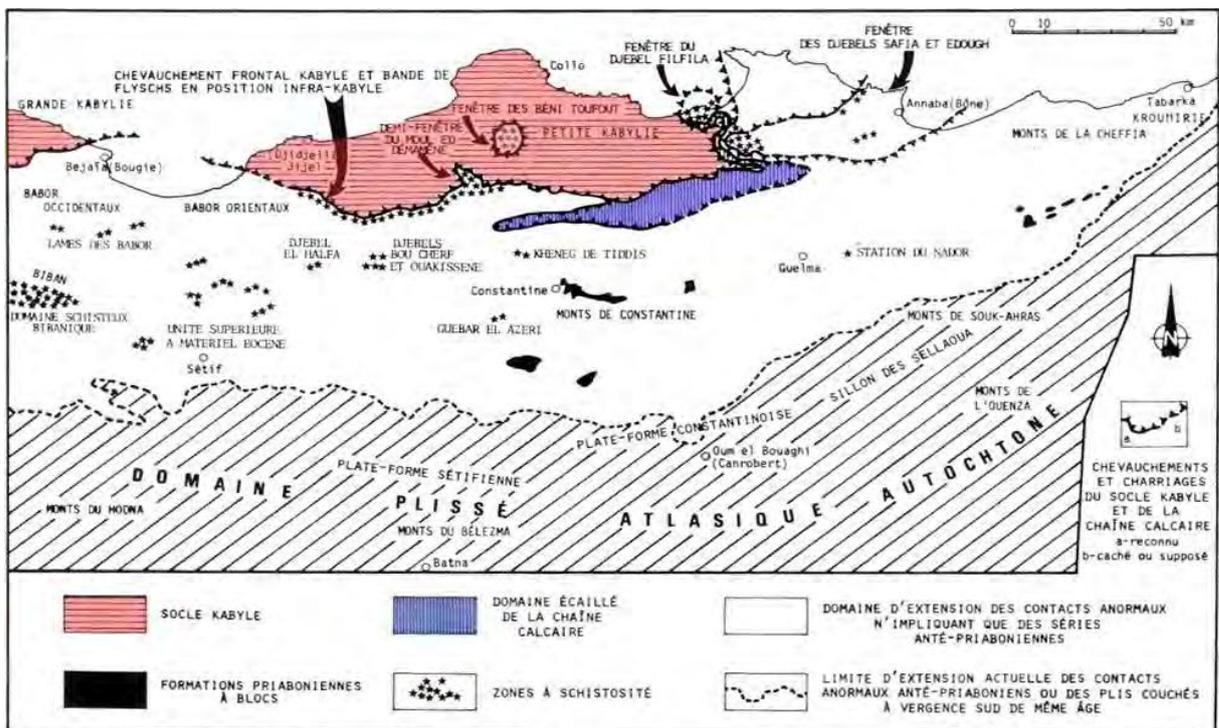
C'est la phase tectonique compressive burdigalienne à vergence Nord. Elle se manifeste (Vila, 1980) par la gènesè:

- Des olistostromes kabyles et de la nappe numidienne résultant de la formation d'une dépression septentrionale préfigurant la Méditerranée;
- D'un bombement à l'aplomb du bord kabyle méridional où s'étaient antérieurement ampilés les unités de flyshs sur les nappes telliennes au Priabonien;
- Des structures plissées, au Sud du domaine kabyle.

I.5.2.3. La phase tortonienne.

C'est la phase tangentielle tortonienne majeure, à vergence Sud. Selon Vila (1980), elle a affecté l'édifice structural, du Nord au Sud et de haut en bas :

- Un bloc kabyle septentrional à Burdigalien-Langhien peu ou pas déformé.
- Une zone intermédiaire à Burdigalien-Langhien, écaillée ou fortement plissée.
- Une zone nappée méridionale, où se manifestent de vastes mouvements anormaux, impliquant les formations postérieures au Burdigalien, élevées.



I.6. La tectonique récente.

Cette phase tectonique post-nappes (Guellal S. et al. in Benabbas, 2006) est responsable de l'orographie actuelle. Elle a induit le comblement des bassins mio-pliocènes, alimentés par la destruction des reliefs environnants.

I.7. Géologie du massif étudié

Le massif étudié correspond à des calcaires du tithonique (Durand Delga 1955). Il s'agit de calcaire d'épaisseur allant de 100 à 300 m. Il débute par une dizaine de mètres de bancs calcaire à silex d'épaisseur de 20 à 40 cm qui s'alternent avec de mince couches de marnes parfois sous forme de joints stratigraphiques. Ces calcaires sont durs montrant de la calcite

microcristalline avec de rares minuscules de grains de quartz et de pigments ferrugineux, les lits siliceux sont parfois de véritables radiolarites.

A l’affleurement ces calcaires sont très fracturés avec parfois de légers plissements. Ils présentent une coloration grise foncée et parfois même marron problèmes c’est l’effet de l’oxydation du fer.

La fracturation est intense et au moins trois familles de joints sont bien observables. On note aussi la présence de failles et de décrochement avec des zones de broyage de quelques mètres. D’un point de vue structurale et d’après la coupe (fig. I 3) Durand Delga (1955), ces calcaires sont chevauchés par le socle a quelques dizaines de mètres au nord de cet affleurement (fig. I 4).

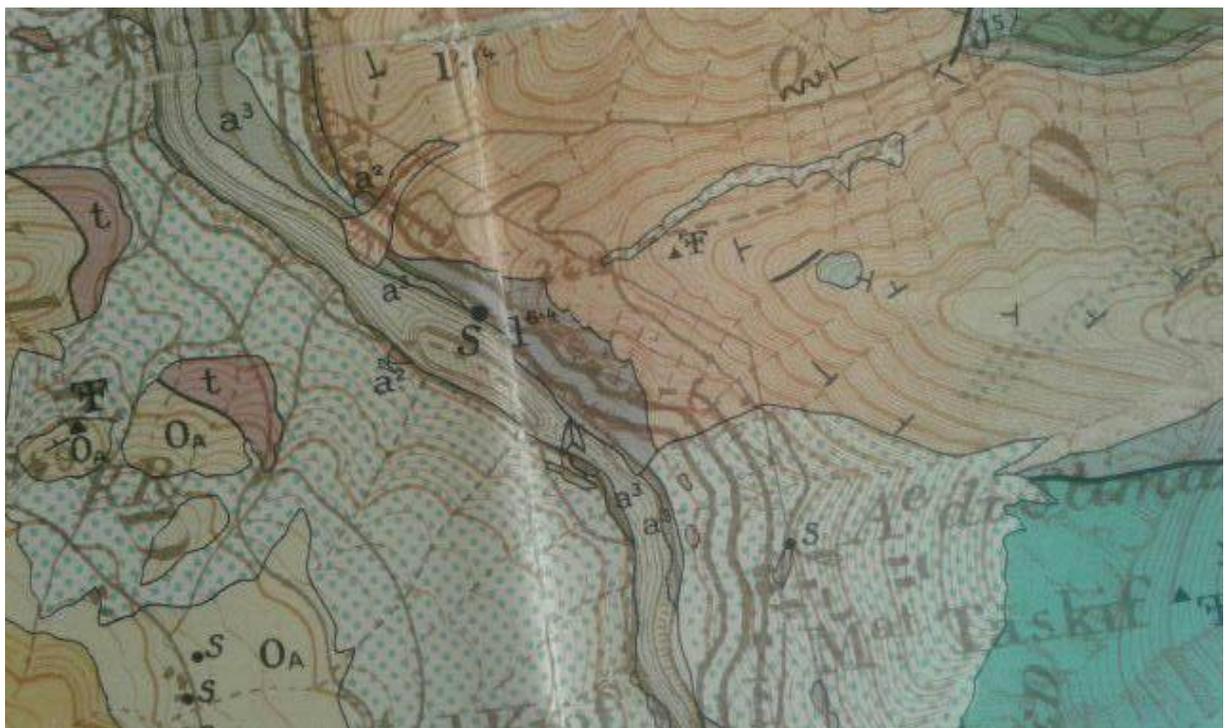


Figure I.3. Carte montrant le massif étudié. (Extraite de la carte de D. Delga 1955)

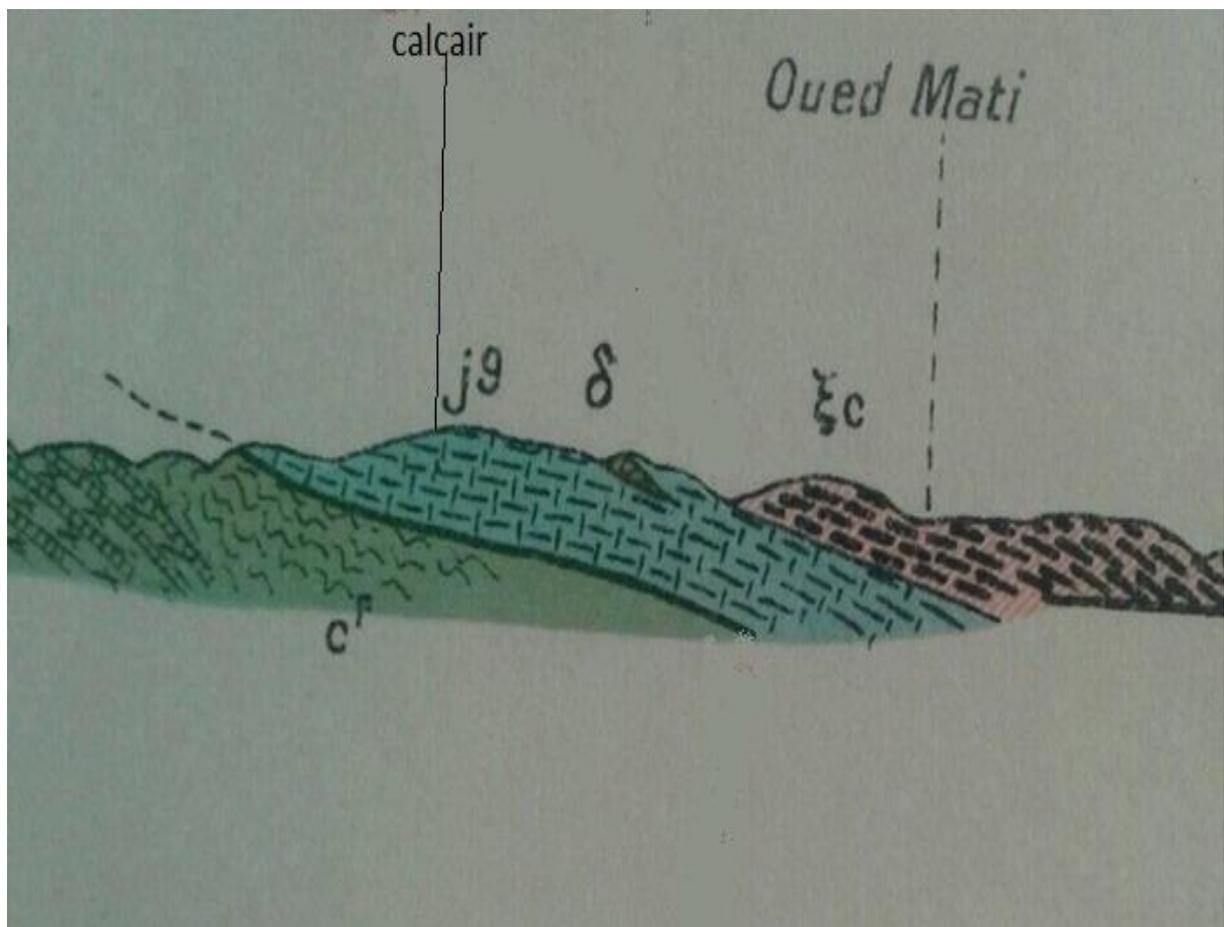


Figure I 4. Coupe géologique montrant la relation structurale entre le massif étudié (J^9) et les autres unités géologiques

I.8. Conclusion.

La chaîne des Maghrébides, constitue un tronçon de la chaîne Alpine d'Afrique du Nord. Elle s'est différenciée en plusieurs domaines paléogéographiques qui sont actuellement en partie superposés. Du Nord vers le Sud, se situe :

Les zones internes, formées de terrains cristallophylliens constituent le socle kabyle (élément le plus ancien de la chaîne) et des terrains essentiellement carbonatés apparaissent sous forme des affleurements rectilignes et discontinus, dits chaîne calcaire ou encore dorsale kabyle et qui forme la couverture sédimentaire du socle.

Le domaine des flyschs, constitué par différents types de flyschs, occupant une position allochtone et reposant en différents modes sur les zones externes.

Plus au Sud, se situent les zones externes. Elles sont définies comme étant des séries épaisses à dominante marneuse issues du sillon tellien.

Les phases tectoniques successives ont modelé, violemment et en différents modes la structure et la disposition de la chaîne des Maghrébides.

Chapitre II

Caractérisations des masses rocheux et classification.

II.1 Introduction

Les roches sont souvent considérées comme matériaux indéformables sous les sollicitations des structures génie civil. En réalité la résistance de la roche est largement supérieure aux contraintes imposées par les structures mais la présence de discontinuités diminue considérablement cette résistance. La masse rocheuse, contrairement à la roche intacte, est constituée de la roche intacte et des discontinuités. Donc l'étude de la masse rocheuse concerne la structure géométrique des discontinuités, leur comportement mécanique ainsi que celui de la matrice rocheuse. Ce chapitre présente une matière bibliographique bien utile pour la définition :

- Des familles de fractures pour lesquelles l'application de la méthode de classification est pertinente.
- Des propriétés élastoplastique définissant les lois de comportement d'une matrice rocheuse ainsi que de leur ordre de grandeur pour différents types de roche.
- Des caractéristiques géométriques des fractures ainsi que de leur plage de variation.
- Des paramètres caractérisant le comportement élastoplastique des discontinuités ainsi que de leur ordre de grandeur. Une analyse des différents sujets cités ci-dessus est établie. Nous nous servons de cette analyse pour appuyer le choix des divers paramètres géométriques et mécaniques de la roche et des discontinuités que nous ferons au un autre chapitre pour établir la base de données de notre classification numérique.

II.1.2. Généralité sur les massifs rocheux.

II.1.2.1. Classification géologique des roches.

En géologie les roches sont classées en trois catégories ; les roches sédimentaires, les roches magmatiques et les roches métamorphiques.

Les roches magmatiques: Les roches magmatiques sont issues de la solidification de magmas siliceux en profondeur ou en surface. 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, existe une variété continue de magmas, diversifiés selon leur teneur relative en silice et silicates ferromagnésiens.

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...).

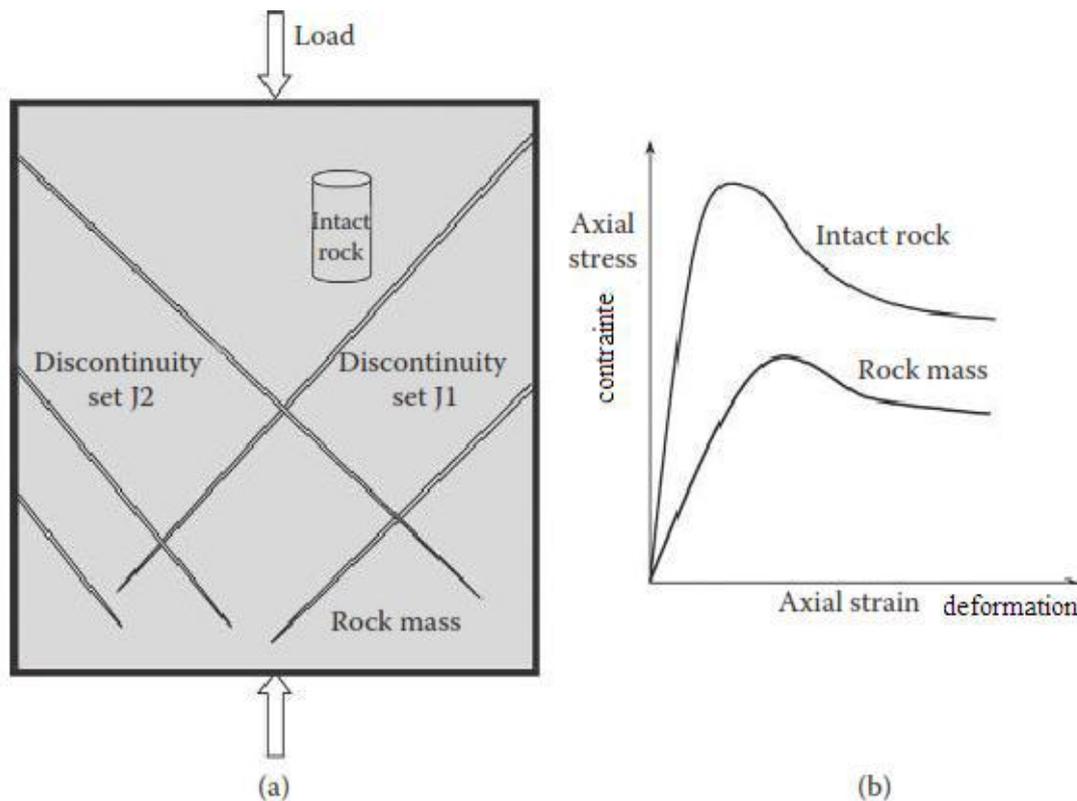
Les roches métamorphiques : Les roches métamorphiques sont issues de roches magmatiques et /ou sédimentaires retournées en profondeur par l'effet de la tectonique des plaques, recristallisées sans fusion selon la température et /ou la pression atteintes et revenues à la surface par érosion. Leur minéraux principaux sont les mêmes que ceux des roches magmatiques, mais leurs structures et leurs textures sont différentes. La plupart ont une structure schisteuse et une texture foliées en raison de l'orientation commune des minéraux qui les composent et de leur répartition en lits.

II.1.2.2. Les massifs rocheux.

Les massifs rocheux sont des milieux essentiellement discontinus. Ils consistent en un assemblage de matériaux rocheux, de même nature ou de natures différentes, divisées en blocs de formes plus ou moins variées par des discontinuités diverses. On les définit également comme étant un assemblage de blocs appelés matrices rocheuses lesquels sont délimités par des discontinuités constituées de fissures, de fractures ou de failles ou encore de joints stratigraphiques

En règle générale, on considère que les massifs rocheux sont constitués de :

- **Roches intactes** : Se sont des blocs de roches non affectés par les discontinuités. Il s'agit d'un assemblage de minéraux non-affectés de discontinuités.



(a) Rock mass and intact rock and (b) stress–strain plot.

Figure II.1 rock mass and intact rock and stress-strain plot.

II.1.2.3. Les discontinuités.

Une discontinuité est définie comme étant toute cassure ou fracture ayant une résistance transversale négligeable en traction (Priest, 1993). Il est important de distinguer entre les discontinuités naturelles, qui ont une origine géologique et les discontinuités artificielles qui sont créées par des activités humaines comme l'excavation d'un massif rocheux. Bien que les discontinuités aient souvent une géométrie irrégulière ou ondulée, il y a généralement une échelle à laquelle la surface totale ou une partie de cette surface est suffisamment plane pour qu'elle soit représentée par une seule valeur d'orientation.

II.1.2.4. Types de discontinuités:

- **Joints de stratification.**

L'assimilation de la stratification à des surfaces planes est acceptable dans les flancs de plis à grande longueur d'onde, ou dans les zones peu tectonisées.

- **Failles et diaclases.**

Dans l'étude structurale des massifs rocheux une distinction s'impose entre déformation fragile et déformation ductile. Les failles sont le résultat de la déformation fragile. Une famille de failles caractérise une localisation de la déformation uniquement sur les plans de cisaillement (souvent plans et d'espacement régulier) dont la fréquence est facilement mesurable. Les diaclases sont des discontinuités **sans déplacement relatif**, d'extension métrique à décamétrique, d'espacement métrique et d'ouverture variable. Le réseau de diaclases est souvent à peu près perpendiculaire aux strates des roches sédimentaires.

- **La Schistosité.**

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

II.1.2.4.1 Paramètres géométriques des discontinuités.

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. Une première hypothèse simplificatrice sur la géométrie des discontinuités consiste à supposer que ces surfaces sont des plans. La représentation d'un plan dans l'espace se fait de diverses manières à partir du vecteur pendage ou de la normale orientée La

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

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 ou longueur d'un segment dans un plan). Cette dimension n'est pas accessible directement. Cependant un moyen simple pour la déterminer indirectement se présente en observant les traces des fractures sur l'affleurement. À noter que les diamètres obéissent souvent une loi exponentielle décroissante ou log-normale.

c) Espacement :

C'est la distance moyenne qui sépare deux intersections successives d'une ligne droite, appelée également ligne d'échantillonnage, avec les traces des 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 plus longues ont plus de chance d'être intersectées par la ligne de levé et semblent être plus rapprochées.

d) Densité:

Cette grandeur est en relation directe avec l'espacement et le nombre de fractures dans un volume fini. Souvent exprimée par une loi uniforme, la position dans l'espace des discontinuités est décrite en localisant un point représentatif du modèle géométrique considéré, par exemple, le centre d'un disque ou d'un segment. Dans ce cas là, 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.

e) Ouverture:

Ce paramètre affecte largement la perméabilité des discontinuités et par suite leur comportement hydromécanique. Il est défini comme étant la distance entre les deux épontes d'une discontinuité mesurée perpendiculairement à son plan moyen et obéit 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.

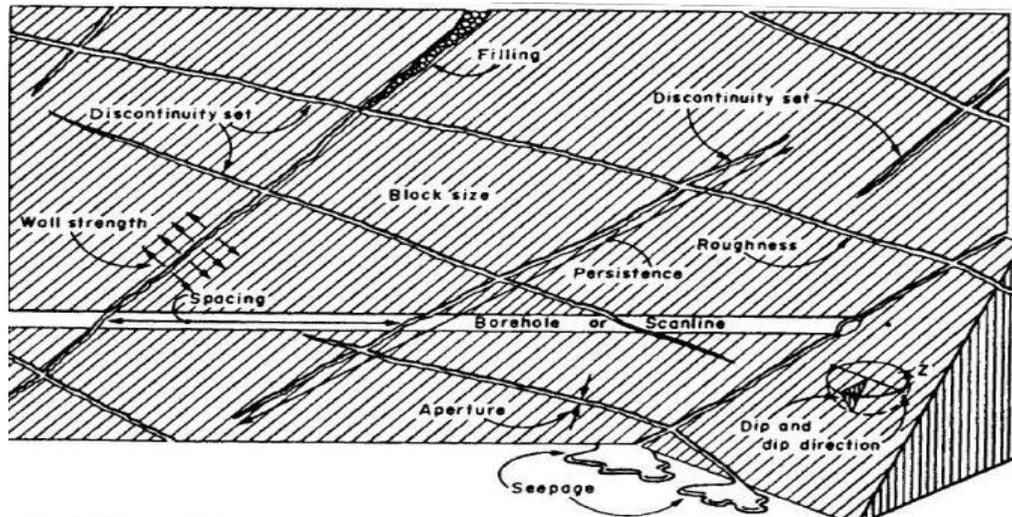


Figure II.2 Schéma montrant les discontinuités sur la face d'un élément de massif rocheux.

II-2. Méthodes de classification des massifs rocheux.

II.2.1. Les classifications géo mécaniques :

II.2.1.1. Types et buts des systèmes de classification :

Les classifications des massifs rocheux fracturés continuent à évoluer depuis plus d'un siècle. Leur utilisation a un intérêt considérable lors de l'étude de la faisabilité et de dimensionnement préliminaire d'un projet, surtout quand les informations mécaniques, hydrologiques et l'état de contrainte in-situ du massif rocheux ne sont pas disponibles. Les systèmes de classification prennent en considération plusieurs facteurs affectant la stabilité des massifs rocheux. Ces facteurs sont reliés notamment à la résistance de la matrice rocheuse, la présence de l'eau et la description des discontinuités (nombre de familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage...). On s'intéresse, dans ce qui suit, aux systèmes de classifications géo-mécaniques. Le but principal de ces classifications se résume comme suit :

- Estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d'un massif fracturé, en particulier sa résistance et sa déformabilité.
- Estimer le temps durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement (stand up time). C'est un indice essentiel dans la détermination de la portée d'excavation.
- Donner des recommandations de soutènement des ouvrages (Beniawski 19). D'après Singh et Goel [1999], la popularité des classifications quantitatives dérivent de plusieurs facteurs :
- Elles représentent un langage commun entre les géologues, les ingénieurs, les Concepteurs et les entrepreneurs.
- Moyennant ces classifications, l'observation, l'expérience et le jugement des ingénieurs sont mieux corrélés.

- Ces systèmes de classification ont été développés en utilisant plusieurs cas d'études ce qui fait éviter au ingénieur de commettre des erreurs.

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

Système de classification	Référence	Pays d'origine	Applications
Rock Loads	Terzaghi, 1946	É.-U.A	Tunnels avec support en acier
Stand-up time	Lauffer, 1958	Autriche	Tunnels
New Austrian tunnelling method (NATM)	Rabcewicz, 1964/1965, 1975	Autriche	Tunnels
Rock Quality Designation	Deere, 1968	É.-U.A.	Carottes de forage, tunnels
Rock Strength Rating (RSR)	Wickham et al. 1972	É.-U.A.	Tunnels
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973,1974, 1976,1979 Bieniawski, 1989	Afrique du Sud É.-U.A.	Tunnels, mines, SLOPES, fondations

Extensions du système RMR	Laubscher 1977 ; 1984 Ghose and Raju, 1981 Kendorski et al. 1983 Serafim and Pereira, 1983 Gonzales de Vallejo, 1983 Unal, 1983 Romana, 1985 Newman et Bieniawski, 1985	Norvège	Mines Mines de charbon Mines en roche dure Fondations Tunnels Support du toit/charbon Stabilité des pentes Mines de charbon
Rock Mass Quality	Barton et al. 1974	Canada	Tunnels, chambres
Strength-Size	Franklin, 1975	-	Tunnels
Basic geotechnical description	ISRM, 1981a	Canada	Communication générale
Geological strength index (GSI)	Hoek et al. 1995		Mines

Tableau II.1 : Ce tableau énumère les systèmes de classification des roches pour l'utilisation géotechnique.

II.2.1.2. Rock Mass Rating (RMR):

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 (de A_1 à A_5) et d'une note A_6 dite d'ajustement. Ces paramètres sont illustrés sur la figure. II.3.

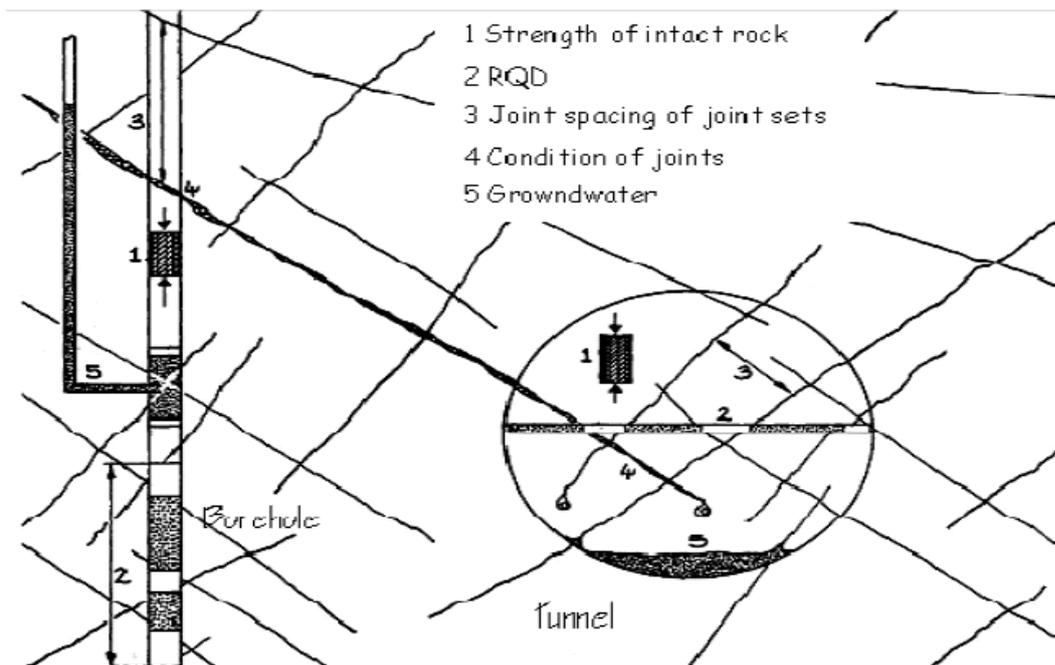


Figure II.3 illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR.

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. La signification des indices du RMR sont définis comme suit :

- A_1 (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).

Notes RMR de la masse rocheuse selon les différentes classes de résistance mécanique exprimée en Rcs

Rating increments for uniaxial compressive strength

Point load strength index, $I_{s(50)}$ (MPa)	UCS (MPa)	Rating
Not applicable; use UCS only	<1	0
	1–5	1
	5–25	2
1–2	25–50	4
2–4	50–100	7
4–10	100–250	12
>10	>250	15

Source: Bieniawski, Z.T., *Engineering Rock Mass Classification*, Wiley Interscience, New York, p. 251, 1989.

Figure II.4 notes RMR de la masse rocheuse selon les différentes classes de résistance mécanique exprimée en Rcs.

- A2 (Rock Quality Designation RQD, Deer [1964]): 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).

Rating increments for RQD		Notes RMR selon les valeurs du RQD			
RQD (%)	<25	25–50	50–75	75–90	90–100
Rating	3	8	13	17	20

Source: Bieniawski, Z.T., *Engineering Rock Mass Classification*, Wiley Interscience, New York, p. 251, 1989.

Figure II.5 note RMR selon les valeurs du RQD.

- A3 (Spacing of discontinuities) : dans le cas de plusieurs familles de fractures le minimum des notes attribuées à l'espacement des fractures est considéré (note : de 5 à 20).

Rating increments for joint spacing		Les Notes RMR relative à l'espacement des joints			
Spacing (mm)	<60	60–200	200–600	600–2000	>2000
Rating	5	8	10	15	20

Source: Bieniawski, Z.T., *Engineering Rock Mass Classification*, Wiley Interscience, New York, p. 251, 1989.

Figure II.6. note RMR relative à l'espacement des joints

- 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).

Notes RMR relative aux conditions des joints (la famille qui a le plus d'influence)

Rating increments for the joint condition

Condition of joint	Rating
Open joint infilled with soft gouge >5 mm thickness OR separation >5 mm, and continuous extending several metres	0
Smooth surfaces OR 1–5 mm gouge infilling OR 1–5 mm aperture, and continuous joint extending several metres	10
Slightly rough surfaces, aperture <1 mm, and highly weathered walls	20
Slightly rough surfaces, <1 mm separation, slightly weathered walls	25
Very rough surfaces, not continuous joints, no separation, unweathered wall	30

Source: Bieniawski, Z.T., *Engineering Rock Mass Classification*, Wiley Interscience, New York, p. 251, 1989.

Guidelines for classifying the condition of discontinuity *conditions des joints d'une manière plus rigoureuse*

	<1	1–3	3–10	10–20	>20
Persistence (m)	<1	1–3	3–10	10–20	>20
Rating	6	4	2	1	0
Aperture (mm)	None	<0.1	0.1–1.0	1–5	>5
Rating	6	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
Rating	6	5	3	1	0
Infilling (gouge)	None	Hard filling <5 mm	Hard filling >5 mm	Soft filling <5 mm	Soft filling >5 mm
Rating	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed
Rating	6	5	3	1	0

Source: Bieniawski, Z.T., *Engineering Rock Mass Classification*, Wiley Interscience, New York, p. 251, 1989.

Source: Hoek, E., et al., *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, A.A. Balkema, Rotterdam 1988

Figure. II.7 note RMR relative aux conditions des joints.

• 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).

Increments of Rock Mass Rating

Due to Groundwater Condition

Inflow per 10 m Tunnel Length (L/min)	Joint Water Pressure Divided		General Condition	Rating
	OR	OR		
None		by Major Principal Stress	Completely dry	15
<10		0.0–0.1	Damp	10
10–25		0.1–0.2	Wet	7
25–125		0.2–0.5	Dripping	4
>125		>0.5	Flowing	0

Notes RMR relatives aux conditions hydraulique

Figure. II.8 : Note RMR relative aux conditions hydraulique.

- A_6 (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).

Rating adjustments for discontinuity orientations

Orientation of joints with respect to the project	Rating increments		
	Tunnels and mines	Foundations	Slopes
Very unfavourable	-12	-25	-60
Unfavourable	-10	-15	-50
Fair	-5	-7	-25
Favourable	-2	-2	-5
Very favourable	0	0	0

Figure. II.9 : Rating adjustments for discontinuity orientations.

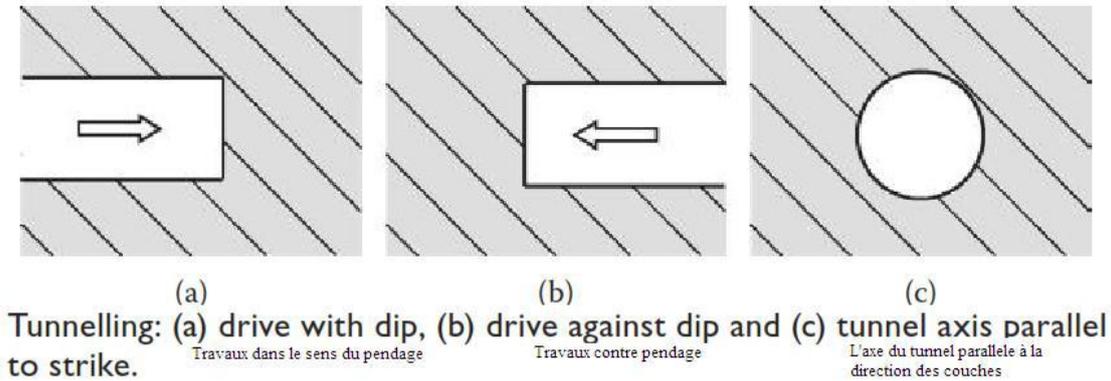


Figure .II.10 : orientation des joints par rapport à orientation des joints.

Les sommes des cinq premiers indices caractérisent le RMR de base. Quand aux travaux souterrains, il faut ajouter l'effet du facteur correctif :

Effects of discontinuity orientation in tunnelling						
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis		Dip 0-20° irrespective of strike
Drive with dip		Drive against dip				
Dip 45-90°	Dip 20-45°	Dip 45-90°	Dip 20-45°	Dip 45-90°	Dip 20-45°	Fair
Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable	Fair	

Figure. II.11 effets de l'orientation de discontinuité dans la construction de tunnels.

II.2.1.3 Le Système Q :

Le *Tunnelling Quality Index* (*NGI rock mass classification*), ou Q , a été introduit par Barton, Lien et Lunde en 1974. Sur la base d'analyses d'un grand nombre de cas d'excavations souterraines, cet indice permet de rendre compte de la qualité de surface des discontinuités, afin d'en déduire le comportement mécanique de la masse rocheuse. Les valeurs numériques de l'indice Q varient sur une base logarithmique de 0,001 à 1 000, d'après la formule suivante:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

- où RQD est le *Rock Quality Designation index*,
 J_n est un nombre caractérisant l'ensemble formé par les familles de joints,
 J_r caractérise la rugosité des joints,
 J_a caractérise l'altération des joints,
 J_w est le facteur de réduction hydraulique des joints,
 SRF est le facteur de réduction des contraintes (*Stress Reduction Factor*)

Chacun de ces paramètres peut être estimé à partir des Tableaux D-1, D-2 et D-3.

- ✓ RQD/J_n représente la structure globale du massif, ce qui constitue une mesure approximative de la taille des blocs rocheux (éléments dissemblables);
- ✓ J_r/J_a représente la résistance au cisaillement des discontinuités (les plus défavorables ou argileuses) séparant les blocs rocheux;
- ✓ J_w/SRF consiste le paramètre de réduction due à la présence d'eau J_w à un effet néfaste sur la résistance au cisaillement et indirectement quant à l'évaluation de l'état général des contraintes SRF . La note Q permet d'évaluer qualitativement la masse rocheuse selon neuf catégories de qualité pour la construction de tunnels. Le Tableau II.2 présente cette qualification:

DESCRIPTION	VALUE	NOTES	
1. ROCK QUALITY DESIGNATION	RQD		
A. Very poor	0 – 25	1. Where <i>RQD</i> is reported or measured as ≤ 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate <i>Q</i> . 2. <i>RQD</i> intervals of 5, i.e. 100, 95, 90, etc. are sufficiently accurate	
B. Poor	25 – 50		
C. Fair	50 – 75		
D. Good	75 – 90		
E. Excellent	90 – 100		
2. JOINT SET NUMBER	J_n		
A. Massive, no or few joints	0.5 – 1.0	1. For intersections use $(3.0 \times J_n)$ 2. For portals use $(2.0 \times J_n)$	
B. One joint set	2		
C. One joint set plus random	3		
D. Two joint sets	4		
E. Two joint sets plus random	6		
F. Three joint sets	9		
G. Three joint sets plus random	12		
H. Four or more joint sets, random, heavily jointed, 'sugar cube', etc.	15		
J. Crushed rock, earthlike	20		
3. JOINT ROUGHNESS NUMBER	J_r		
a. Rock wall contact			
b. Rock wall contact before 10 cm shear			
A. Discontinuous joints	4	1. Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m 2. $J_r = 0.5$ can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided that the lineations are oriented for minimum strength	
B. Rough and irregular, undulating	3		
C. Smooth undulating	2		
D. Slickensided undulating	1.5		
E. Rough or irregular, planar	1.5		
F. Smooth, planar	1.0		
G. Slickensided, planar	0.5		
c. No rock wall contact when sheared			
H. Zones containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)		
J. Sandy, gravely or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)		
4. JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	ϕ_r	
a. Rock wall contact			
A. Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling	0.75	1. Values of ϕ_r , the residual friction angle, are intended as an appropriate guide to the mineralogical properties of the alteration products, if present	
B. Unaltered joint walls, surface staining only	1.0		25 – 35
C. Slightly altered joint walls, non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	2.0		25 – 30
D. Silty-, or sandy-clay coatings, small clay-fraction (non-softening)	3.0		20 – 25
E. Softening or low-friction clay mineral coatings, i.e. kaolinite, mica. Also chlorite, talc, gypsum and graphite, etc., and small quantities of swelling clays. (Discontinuous coatings, 1 – 2 mm or less)	4.0		8 – 16

Tableau II.2 : Présente les paramètres de la classification du système (Q).

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 - 1	Exceptionnellement bonne

Tableau II.3 : présente évaluation de la cote (Q) et la qualité du massif.

II.2.1.4 Le Geological Strength Index (GSI) :

Hoek et Brown ont reconnu qu'un critère de rupture de la masse rocheuse n'aurait aucune valeur pratique s'il ne pouvait être lié aux observations géologiques faites rapidement et facilement par un géologue ingénieur ou un géologue sur le terrain.

Le cœur de la classification GSI est une description géologique essentiellement qualitative de la masse rocheuse car il a été estimé que les chiffres associés aux systèmes RMR et Q étaient largement sans signification pour les masses rocheuses hétérogènes et de qualité médiocre.

Cet indice est basé sur une évaluation de la lithologie, de la structure et de l'état des surfaces de discontinuité dans la masse rocheuse et est estimé par examen visuel de la masse rocheuse exposée dans les affleurements, dans les excavations superficielles telles que les tranchées de routes et dans les faces des tunnels et des forages. . Le GSI, en combinant les deux paramètres fondamentaux du processus géologique, le blocage de la masse et les conditions de discontinuités, respecte les principales contraintes géologiques qui régissent une formation et constitue donc un indice géologiquement fiable et simple à appliquer sur le terrain.

Une fois qu'un «nombre» de GSI a été choisi, ce nombre est entré dans un ensemble d'équations développées de manière empirique pour estimer les propriétés de la masse rocheuse et peut ensuite être utilisé comme entrée dans une certaine forme de calcul numérique.

analyse ou solution sous forme fermée. L'index est utilisé dans en conjonction avec des valeurs appropriées pour le non confiné résistance à la compression de la roche intacte et de la constante pétrographique m_i , pour calculer la propriétés d'une masse rocheuse, en particulier la compression la force de la masse rocheuse et sa déformation module (E). Les valeurs mises à jour de m_i , peuvent être trouvées dans Marinos et Hoek (2000) ou dans le programme RocLab.

Les procédures de base sont expliquées dans Hoek et Brown ,(1997)mais un raffinement plus récent de la théorie empirique équations et la relation entre le Hoek – Brown et les critères de Mohr – Coulomb ont été traités par Hoek et al. (2002) pour des plages de stress appropriées rencontrés dans les tunnels et les pentes.

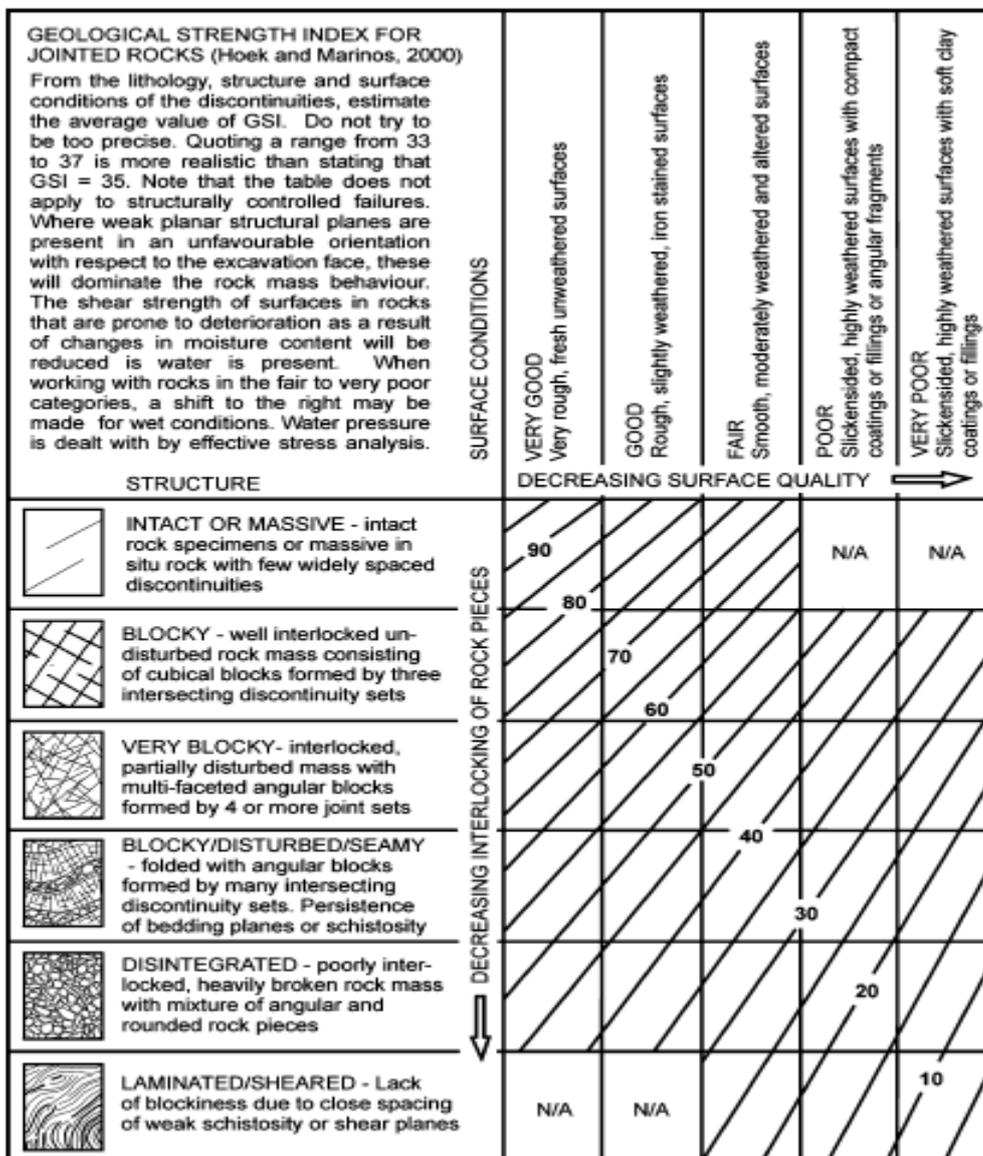


Figure.II.12 Carte générale des estimation GSI à partir de l'observation géologique.

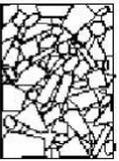
<p>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE</p> <p>A partir de l'apparence de la roche, choisir la catégorie qui donne, selon vous, la meilleure description des conditions moyennes de structure in situ. [...] Le critère de Hoek-Brown devrait uniquement être appliqué à des masses rocheuses dont la taille des blocs individuels est petite devant celle de l'excavation.</p>		<p>CONDITIONS DE SURFACE</p> <p>TRES BONNES Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p>BONNES Surfaces couleur de fer, rugueuses et légèrement altérées</p> <p>MOYENNES Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p>PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p>TRES PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique</p>				
STRUCTURE	<p>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DECREISSANT →</p> <p>QUALITÉ DECREISSANTE →</p>					
 <p>FRACTURÉE – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	80	70	60	50	40	
 <p>TRÈS FRACTURÉE – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre familles de discontinuités orthogonales</p>		60	50	40	30	
 <p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles</p>			40	30	20	
 <p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>				20	10	

Figure II.13 estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse d'après Hoek et Brown 1995.

6 Corrélations entre les différentes méthodes de classification

Des relations empiriques existent entre ces différents indices. Bieniawski propose de relier le *RMR* et le *Tunnelling Quality Index Q* de Barton :

$$RMR = 9 \log Q + 44 \quad (D- 5)$$

Pour des roches de bonne qualité ($GSI > 25$), la valeur de *GSI* peut également être estimée directement à partir de la version 1976 du *RMR* de Bieniawski :

$$GSI = RMR_{76}^* \quad (D- 6)$$

* avec un *groundwater rating* de 10 (humide) et un ajustement pour l'orientation des discontinuités égal à 0 (très favorable) (Tableau D-4).

De même, si la version 1989 de la classification *RMR* de Bieniawski est utilisée, alors on peut estimer un *GSI* correspondant :

$$GSI = RMR_{89} - 5^* \quad (D- 7)$$

* avec un *groundwater rating* de 15 (sec) et un ajustement pour l'orientation des discontinuités égal à 0.

Figure.II.15 corrélations entre les différentes méthodes de classification.

II.2.1.5- Slope Mass Rating (SMR):

Pour évaluer la stabilité des pentes rocheuses, Romana (1985) a proposé un système de classification appelé Slope Mass Rating (SMR). Il est obtenu à partir de RMR_{basique} en lui rajoutant un terme tel que montré par la formule suivante :

$$SMR = RMR_{\text{Base}} + (F1 * F2 * F3) + F4 \quad (II.10)$$

Où RMR de base est évaluée selon Bieniawski (1979, 1989) $F1$, $F2$, $F3$ sont des facteurs d'ajustement liés à l'orientation des joints par rapport à l'orientation des pentes, et $F4$ est le facteur de correction.

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

$$F1 = (1 - \sin A) \quad (I.18)$$

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

- $F2 = \text{tg} 2B \quad (I.19)$

F2 : Dépend du pendage des joints pour le mode de rupture plan. Les valeurs varient de 1 (pour les joints de plus de 45° de pendage) à 0,15 (pour les joints de moins de 20° de pendage). Dans le cas du renversement ou de basculement, le facteur reste égal à 1.

Où B : est le pendage des joints.

- F3 : est lié à la relation entre la pente du talus et le pendage des joints. Pour ce paramètre, il y a également lieu de faire la différence entre une rupture plane et une rupture par renversement ou de basculement. Les valeurs d'ajustement de Bieniawski ont été conservées.
- F4 prend en compte la méthode d'excavation. Il est fixé empiriquement sur les bases suivantes :
 - Les talus sont plus stables à cause de l'érosion à long terme et des protections naturelles telles la végétation.
 - La roche prédécoupée augmente également la stabilité.
 - L'abattage à l'explosif augmente, ne change pas ou diminue la stabilité du talus qu'il est léger, normal ou déficient (trop d'explosifs par exemple).
 - L'excavation mécanique par arrachage dans les roches très fracturées n'augmente, ni ne diminue la stabilité du talus.
 - Une valeur de SMR est calculée pour chaque système de discontinuités et finalement la plus petite est retenue pour quantifier la globalité du talus.

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

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, il a été souligné l'importance des propriétés physiques et mécaniques des massifs rocheux leurs systèmes de classification qui demeurent indispensables pour la reconnaissance géotechnique du site étudié.

Chapitre III
stabilité des
Talus rocheux
et méthodes
d'analyse.

III 1. Introduction

Une variété d'activités d'ingénierie telles que les systèmes de transport autoroutes, voies ferrées et barrages nécessite souvent et surtout dans les régions montagneuses des excavations dans la masse rocheuse. Il va de même pour les mines notamment à ciel ouvert où la stabilité des talus représente un facteur clé dans l'exploitation (sécurité et économie).

En analysant la stabilité d'une pente rocheuse, le facteur le plus important à considérer est la géométrie de la masse rocheuse. Il s'agit de la relation entre l'orientation des discontinuités et la face du talus. L'intersection des discontinuités et de la face de talus détermine les blocs de la masse rocheuse qui sont libres de glisser ou de basculer. Après la structure géologique, le facteur le plus important régissant la stabilité est la résistance au cisaillement de la surface de glissement potentielle.

III . 2. Rôle de la géologie dans la stabilité des talus rocheux.

La stabilité des pentes rocheuses est souvent considérablement influencée par la géologie structurale de la formation géologique concernée. On vise dans ce contexte les discontinuités naturelles telles que les plans de stratifications, les joints et les failles. Les propriétés des discontinuités par rapport à la stabilité comprennent l'orientation, la persistance, la rugosité et le remplissage. L'importance des discontinuités est qu'elles sont des plans de faiblesse (cohésion nulle). Les discontinuités peuvent influencer directement sur la stabilité telle que montré sur la figure 2.1. Dans la figure 2.1 (a), la face du talus est formée par des couches continues sur toute la hauteur de l'excavation et la rupture potentielle est planaire. Si la rupture de pente est conditionnée par l'intersection de deux discontinuités derrière la face de l'excavation (figure 2.1 (b)) elle est appelée rupture coin (wedge failure).



(a)



(b)

Figure III. 1 : Parois rocheuses formées par plans de discontinuités persistantes .

a) Rupture planaire conditionnée par les plans de discontinuités sub-verticales

(b) Rupture plane formée par l'intersection deux plans sécants de discontinuités, joints tectonique et de stratification La surface de glissement dans la masse rocheuse peut être un seul plan continu ou une surface complexe composée de deux ou plus de discontinuités et de fractures.

III. 3 : Facteurs influençant la résistance des roches.

La détermination des valeurs fiables de résistance au cisaillement est une partie essentielle dans la conception du talus, car, un petit changement de la résistance au cisaillement peut entraîner des changements importants dans la hauteur ou l'angle de sécurité du talus. Le choix des valeurs appropriées de résistance au cisaillement ne dépendent pas seulement sur la disponibilité des données de test, mais aussi sur une interprétation attentive de ces données à la lumière du comportement de la masse rocheuse. Par exemple, il peut être possible d'utiliser les résultats d'un ou de quelques essais de cisaillement sur un joint pour la conception d'un talus. Mais, le problème réside dans la représentativité de ces essais et le problème d'échelle. Ce qui rend l'expérience et le bon sens de l'ingénieur d'une valeur capitale.

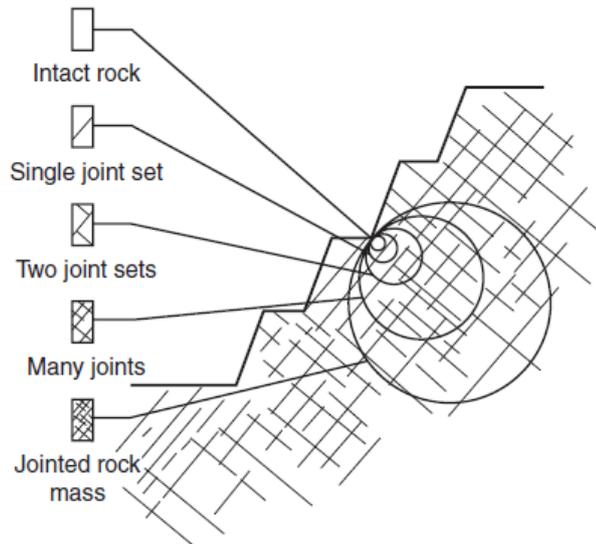


Figure III . 2 : Diagramme idéalisé montrant la transition de roche intacte à la masse rocheuse articulée avec l'augmentation de la taille de l'échantillon.

Par exemple, dans le talus de la mine à ciel ouvert illustrée à la figure 4.1, les dimensions de la pente globale est beaucoup plus grande que la longueur des discontinuités individuelle et de ce fait la résistance au cisaillement appropriée de la roche n'est pas celle de la discontinuité.

1. Les discontinuités

Les propriétés des discontinuités qui influencent la résistance au cisaillement incluent la forme, la rugosité des surfaces, l'altération et la nature des matériaux de remplissage qui peuvent être de faible.

2. Masse rocheuse –

Les facteurs qui influencent la résistance au cisaillement d'une masse rocheuse comprennent la résistance à la compression, l'angle de frottement interne de la roche intacte, et l'espacement des discontinuités et l'état de leurs surfaces.

3. Roche intacte –

Un facteur à prendre en compte pour mesurer la force de la roche intacte est que la résistance mécanique pourrait diminuer au cours du service suite à l'altération.

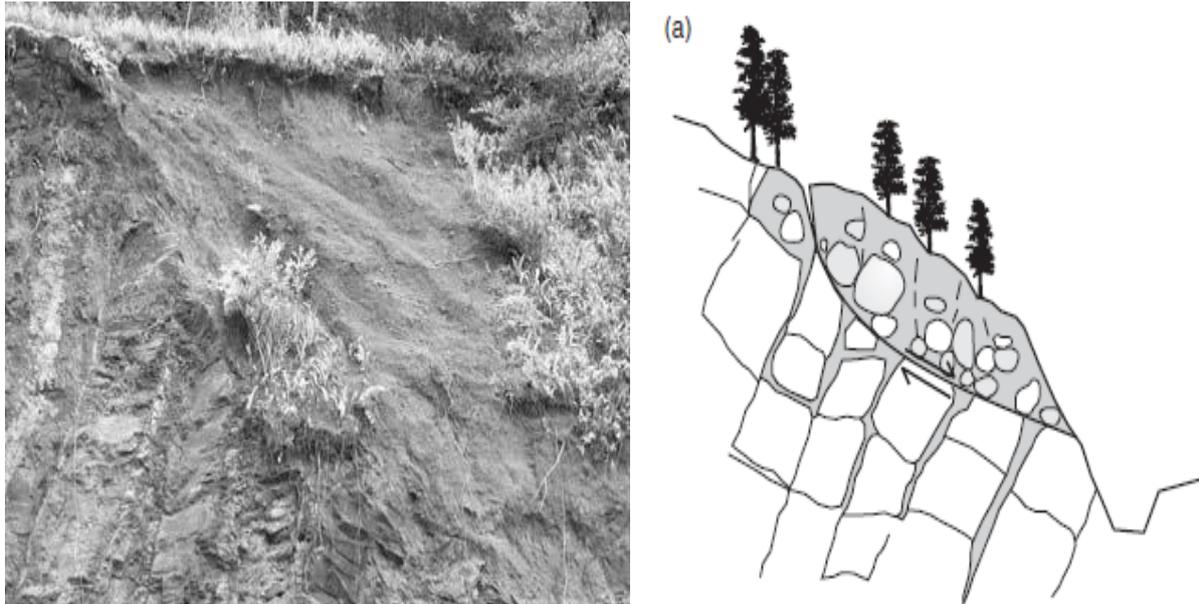


Figure III.3 Rupture circulaire superficielle dans un massif rocheux fortement jointif (basalte peu jointif, légèrement altéré).

III. 4. Eau souterraine.

III. 4.1 : Le cycle hydrologique

Un cycle hydrologique simplifié illustré dans La figure 5.1 montre quelques sources de sol typiques l'eau, et souligne que l'eau souterraine peut parcourir des distances considérables à travers un rocher Masse. Il est donc important de considérer la géologie régionale d'une région lors du démarrage d'un rocher programme de conception des pistes. En général, les eaux souterraines flux des zones d'alimentation vers les zones de décharge. UNE La zone de recharge est celle dans laquelle le filet saturé l'écoulement des eaux souterraines est dirigé loin de la nappe phréatique, tandis que dans une zone de décharge le filet saturé le débit est dirigé vers la nappe phréatique. Dans Figure 5.1, les zones de décharge se trouvent à la coupe du roc, barrage à résidus et mine à ciel ouvert, et il y a une recharge zone de l'océan à la fosse. Il est clair que les précipitations dans le bassin versant est la source d'eau souterraine la plus importante, et la figure 5.2 illustre la relation typique entre les précipitations et les eaux souterraines niveaux dans trois régions climatiques. En tropical et climats désertiques la nappe phréatique est généralement plus prévisible et cohérent que tempéré climats où les niveaux de précipitations sont plus variable. En évaluant la relation entre le climat et les niveaux d'eau souterraine dans la pente, à la fois les précipitations moyennes et les pics d'activité devrait être considéré parce que les événements de pointe sont ceux qui causent généralement une instabilité. Exemples d'événements de précipitations maximales qui peuvent conduire à un forte les taux d'infiltration incluent les typhons, les fortes pluies et fonte des neiges rapide. Si ces climatiques conditions existent sur le site, il est conseillé d'utiliser les pressions d'eau correspondantes dans la conception, ou pour

concevoir le drainage de grande capacité systèmes. Sources d'eau souterraine en plus de les précipitations peuvent inclure une recharge de rivières, barrages de résidus, réservoirs ou océan comme le montre la figure 5.1. Il y a plusieurs cas de carrières importantes et ouvertes mines à ciel ouvert (par exemple, Dutra Minerals en Californie, et Granisle Copper et Island Copper au Canada) qui a fonctionné avec succès ci-dessous, et à proximité de, des masses d'eau substantielles. Cependant, dans ces opérations d'infiltration importantes peuvent se développer dans la fosse, ainsi que l'instabilité résultant des fortes pressions d'eau.

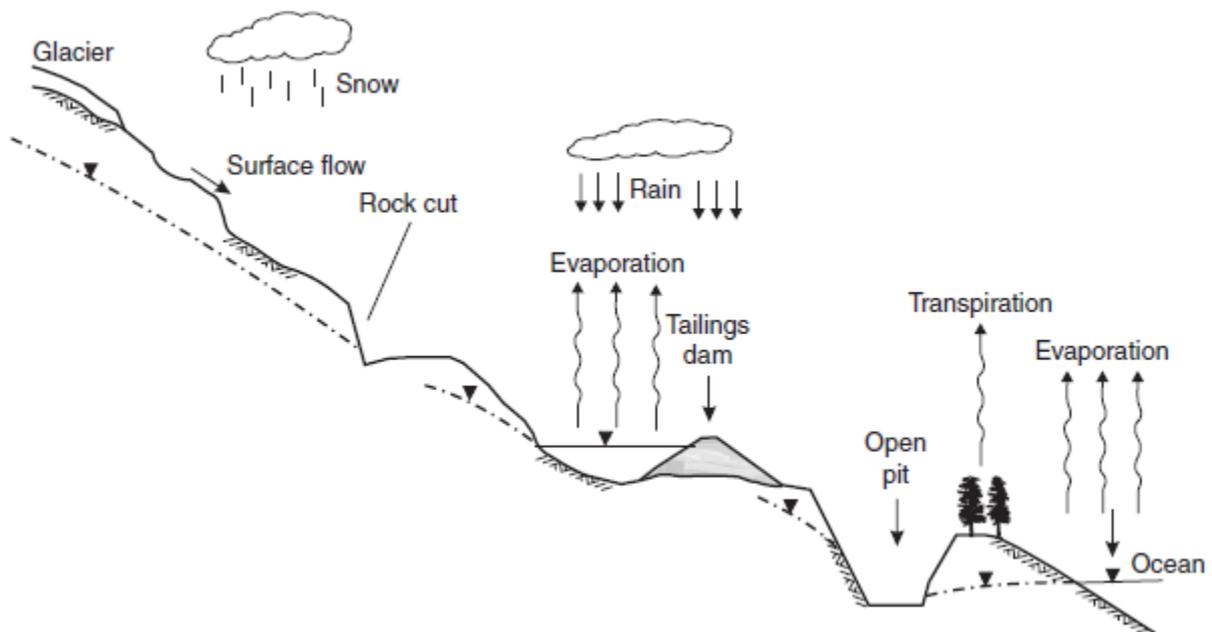


Figure III.4. Représentation simplifiée d'un cycle hydrologique montrant certaines sources typiques d'eaux souterraines (modifié de Davis et de Wiest (1966)).

Un autre facteur important influençant le terrain l'eau dans une pente est la distribution des types de roches, et des détails de la géologie structurale tels que la faille remplissage, persistance des jeux de joints et présence des cavités de solution. Ces caractéristiques peuvent entraîner dans les régions de conductivité hydraulique faible et élevée dans la pente qui sont appelés aquitards et aquifères, respectivement. Ces questions sont discutées plus en détail dans la section 5.4 plus loin dans ce chapitre.

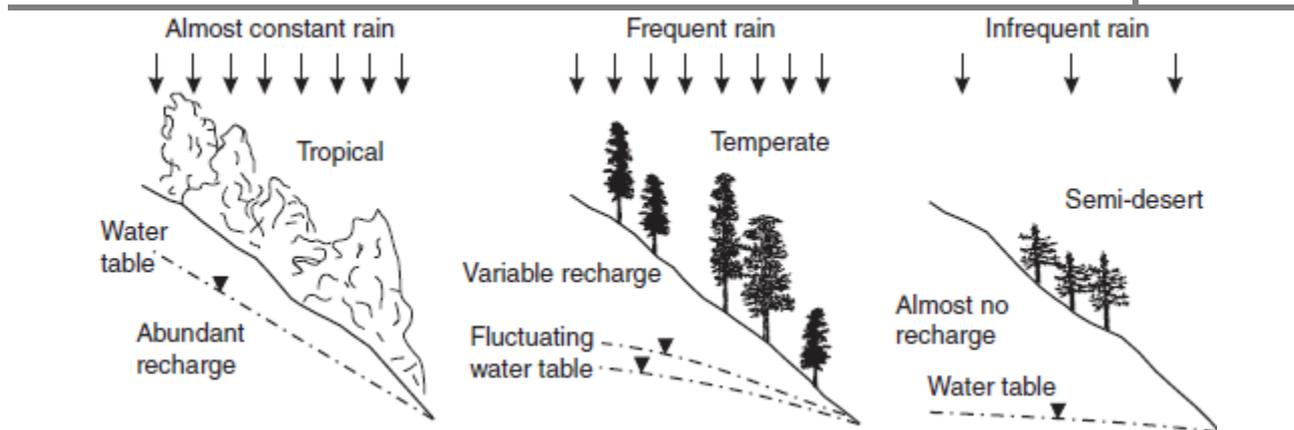


Figure III .5 : Relation entre le niveau de la nappe phréatique et les précipitations (modifiée de Davis et de Wiest (1966)).

III. 5. La rupture planaire.

La rupture planaire n'est pas très fréquente dans les talus rocheux du fait que les conditions géométriques requises pour produire une telle surface de rupture ne sont pas souvent réunies. La rupture planaire peut servir de cas pédagogique pour démontrer les états de stabilité du talus suite aux changements de résistance au cisaillement et les conditions des eaux souterraines. La quantification de l'effet de ces changements est difficile à démontrer dans les cas complexes.

III.6. Conditions mécaniques et géométriques de la rupture plane

Pour qu'une rupture plane survienne dans un talus rocheux certaines conditions doivent être réunies. **La figure .IV.5** montre un cas réel de talus rocheux sur lequel se développent des glissements plans.



Figure III.6 Rupture plane sur un joint stratigraphique lisse et persistant (Interstate 40, near Newport, Tennessee).

- 1- Le plan de glissement doit être parallèle au talus; la direction du pendage du plan de glissement et du plan de talus ne doivent pas être différents de plus de $20^\circ (\pm 20^\circ)$.
- 2- Le plan de glissement doit couper le talus ; ce qui signifie que le pendage du plan de glissement doit être inférieur au pendage du talus c'est-à-dire $\psi_p < \psi_f$. **Fig (III.6).**
- 3- Le pendage du plan de glissement doit être plus grand que l'angle de frottement de ce plan. Cela signifie que $\psi_p > \phi$. **Fig (III.6).**
- 4- L'extrémité supérieure de la surface de glissement doit voir le jour ou se terminer par une fissure de tension (**Fig .III.6).**
- 5- Le bloc en mouvement doit être limité latéralement par des surfaces de non cohésion pour ne pas empêcher le glissement (**Fig. III.6**).

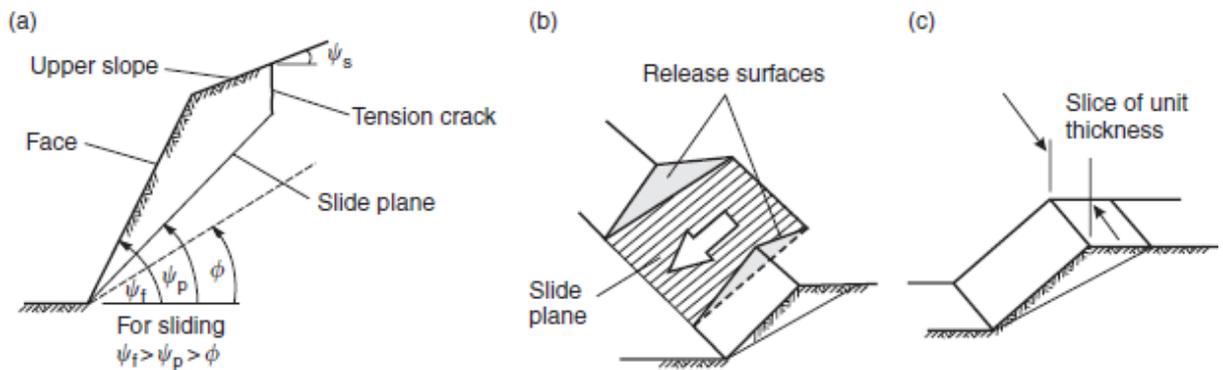


Figure .III.7 . Conditions de rupture plane .

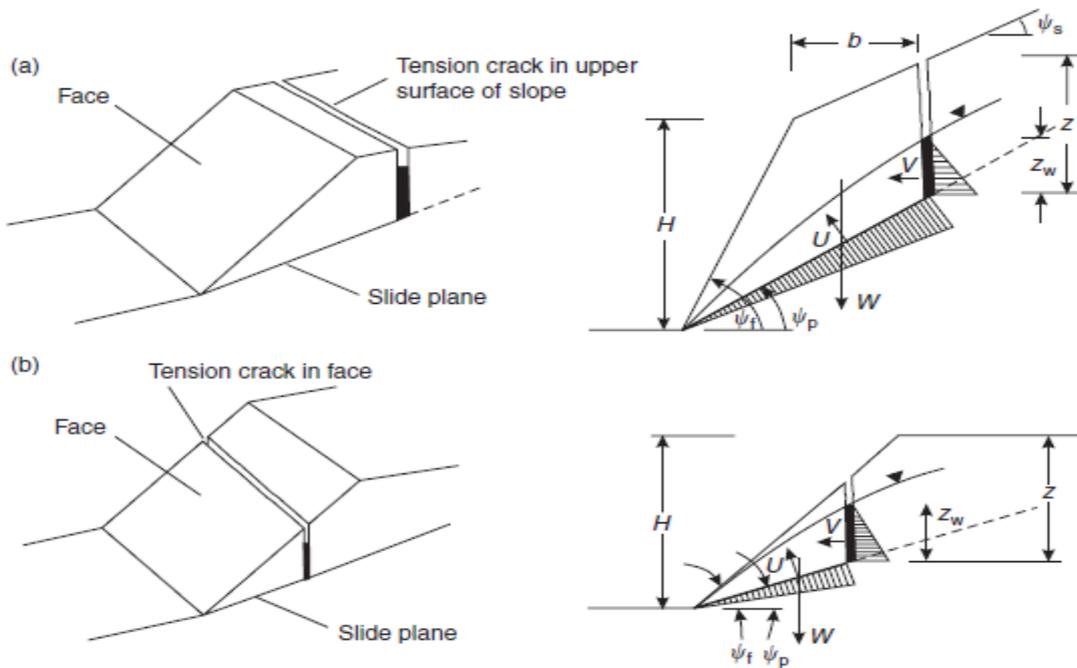


Figure .III.8 : condition de rupture avec une fissure traction.

III.6.1 Analyse de la rupture plane .

La géométrie des pentes et les conditions des eaux souterraines considérées dans cette analyse sont définis à la figure xx, qui montre deux géométries comme suit:

- (a) Pentes ayant une fissure de traction dans la partie supérieure derrière la couronne; et
- (b) Pentes avec une fissure de traction coupant le talus.

La stabilité du talus ou d'un bloc reposant sur un joint tectonique ou stratigraphique est en générale donné par la formule suivante :

$$FS = \frac{\text{Resisting force}}{\text{Driving force}} \\ = \frac{cA + \sum N \tan \phi}{\sum S}$$

Dans le cas ou on a une fissure de traction sèche (non replie avec de l'eau) le coefficient de sécurité est donné par :

$$FS = \frac{c \cdot A}{W \sin \psi_p} + \cot \psi_p \tan \phi$$

Sachant sur un joint $c = 0$ donc le coefficient de sécurité devient :

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \psi_p}$$

Dans le cas ou on a une fissure de traction replie avec de l'eau, le coefficient de sécurité est donné par :

$$FS = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p}$$

III.6.2 Analyse de glissement par la méthode de projection stéréographique :

Si le pendage de la discontinuité est plus grand que la pente, une rupture est-elle possible ? Pour les conditions sèches, les frottements sont élevés et le grand cercle du plan passe en dehors du cercle de frottement et dans ce cas il n'y aura pas de glissement. Pour le cas saturé, les frottements sont plus faibles et le grand cercle du plan de rupture passe dans le cercle de frottement et par conséquent le glissement est éminent. Un glissement peut se produire.

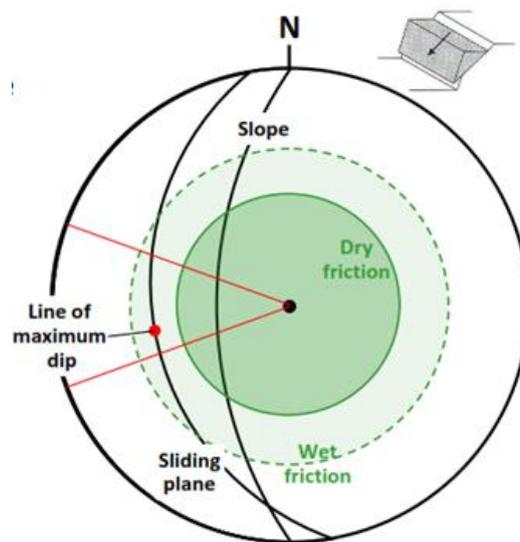


Figure III.9. Schéma montrant le cas stable et instable d'un talus rocheux par la méthode de projection stéréographique.

Selon les conditions environnantes qui causent la rupture les ingénieurs conçoivent les renforcements appropriés. On peut envisager le drainage, les boulons d'encrage ou les contreforts.

III.6.3 Rupture en coin.

Quand deux familles de discontinuité s'intersectent il se forme des blocs de forme tétraédrique ressemblant à un coin.

La géométrie du coin pour analyser la mécanique de base du glissement est définie à la (Figure .III.9) Sur la base de cette géométrie, les conditions générales de rupture en coin sont les suivantes:

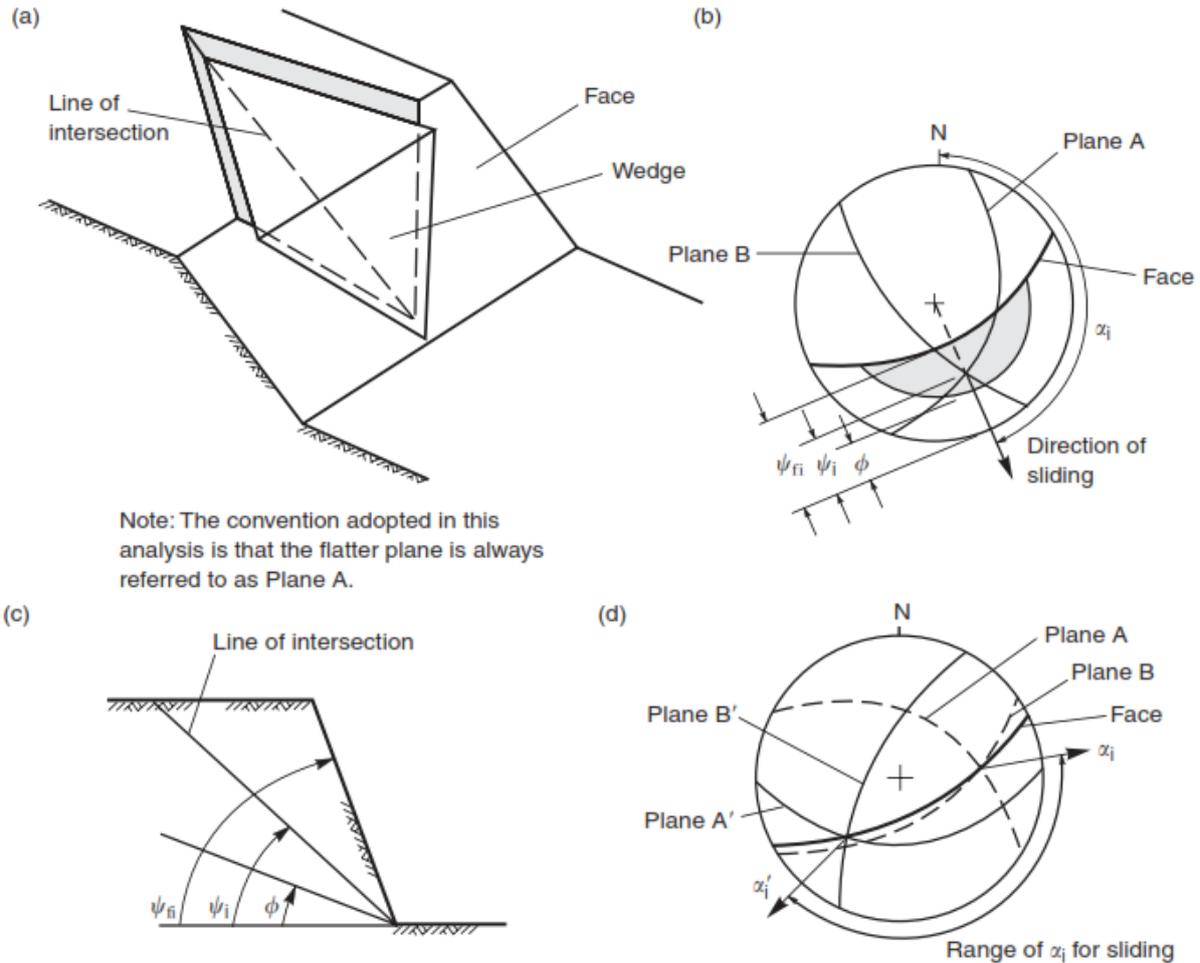


Figure III.10 conditions géométriques pour la rupture d'un coin.

L'intersection de deux plans donne toujours une ligne droite. Sur le stéréonet, la ligne d'intersection est représentée par le point où les deux grands cercles des plans se croisent, et l'orientation de la ligne est définie par sa direction (α_i) et son plongement (ψ_i) (**figure IV.10** (b)). Le plongement de la ligne d'intersection doit être inférieur à l'inclinaison du talus et plus grande que l'angle de frottement moyen des deux glissières planes $> \phi$ (figure 10.3 (b) et (c)) pour qu'il y aura instabilité.

III.7. Analyse de la rupture en coin

Le facteur de sécurité de la rupture en coin est défini à la (**figure 8**), en supposant que le glissement ne résiste que par le frottement et que l'angle de frottement (ψ) est le même pour les deux plans, est donné par

$$FS = \frac{(R_A + R_B) \tan \phi}{W \sin \psi_i}$$

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \psi_A \cos \alpha_A - \tan \psi_B \cos \alpha_B}{\tan \psi_B \sin \alpha_B - \tan \psi_A \sin \alpha_A} \right)$$

$$\psi_i = \tan \psi_A \cos(\alpha_A - \alpha_i) = \tan \psi_B \cos(\alpha_B - \alpha_i)$$

α_A et α_B sont les directions des plans A et B, et ψ_A et ψ_B sont les pentages des deux plans.

R_A et R_B sont les forces normales sur les plans A et B, comme illustré à la figure xx, et la composante du poids agissant le long de la ligne d'intersection est ($W \sin \psi_i$). On trouve les forces R_A et R_B en les résolvant en composantes normales et parallèles à la direction le long de la ligne d'intersection comme suit:

$$R_A \sin \left(\beta - \frac{1}{2} \xi \right) = R_B \sin \left(\beta + \frac{1}{2} \xi \right)$$

$$R_A \cos \left(\beta - \frac{1}{2} \xi \right) + R_B \cos \left(\beta + \frac{1}{2} \xi \right) = W \cos \psi_i$$

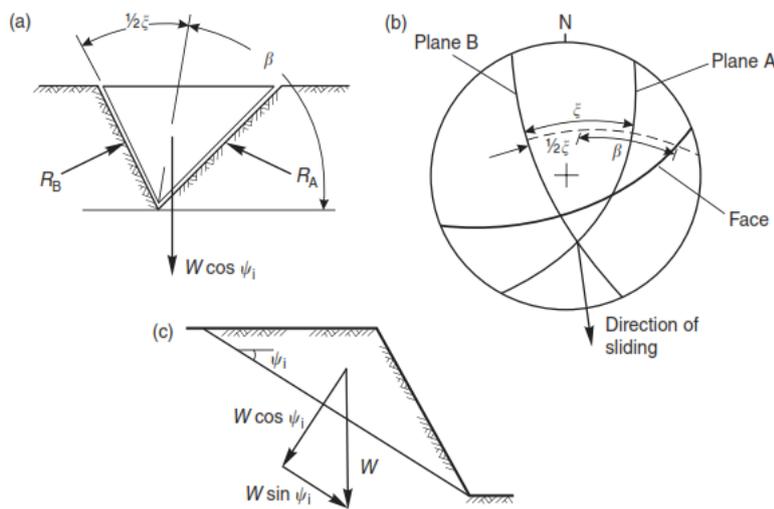


Figure.III.11. schemat montrant l analyse graphique de la repture .

$$R_A + R_B = \frac{W \cos \psi_i \sin \beta}{\sin(\xi/2)}$$

Hence

$$FS = \frac{\sin \beta}{\sin(\xi/2)} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \psi_i}$$

In other words,

$$FS_W = K FS_P$$

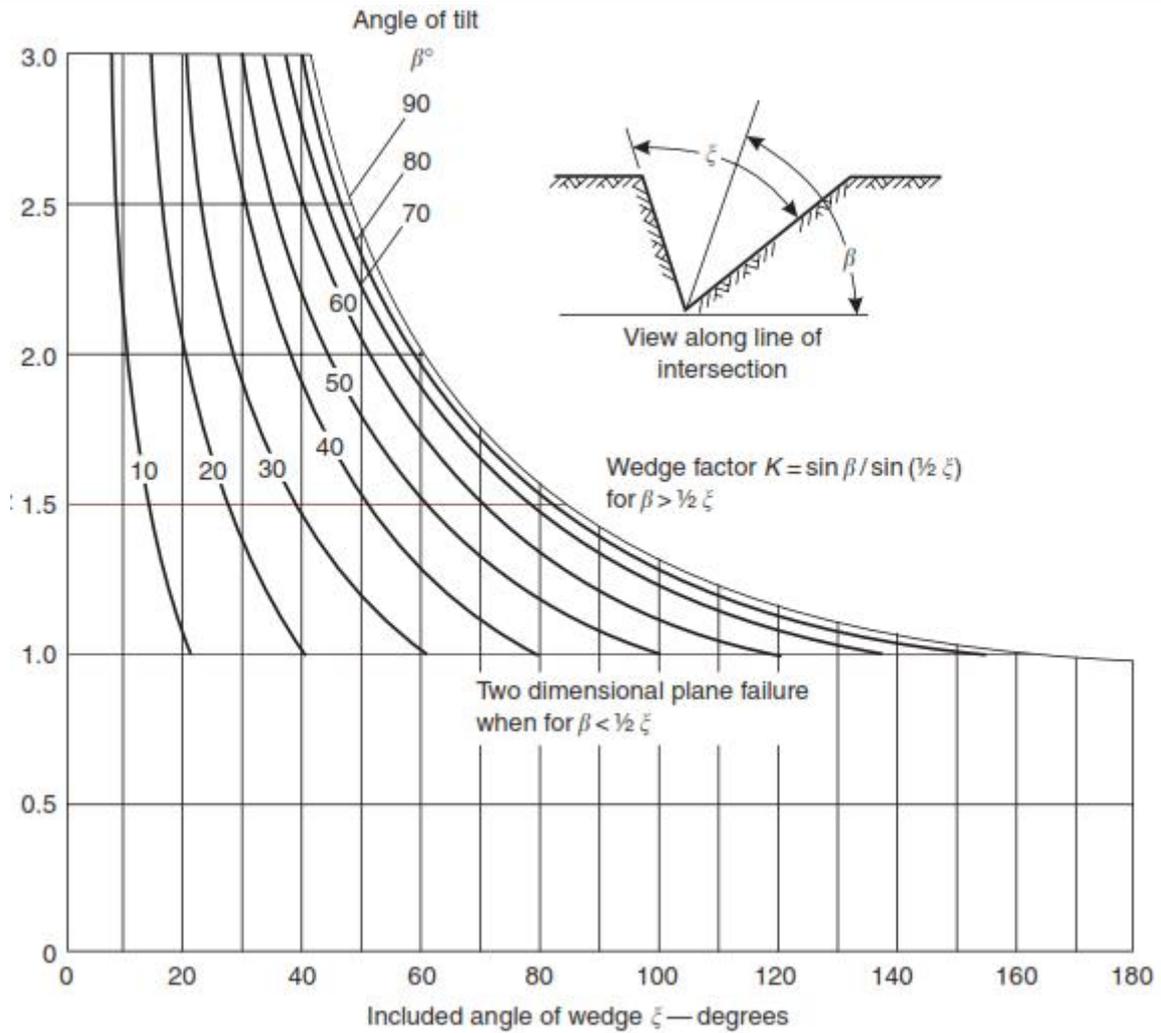


Figure III.12. Facteur de coin K en fonction de la géométrie du coin.

III. 8. Rupture circulaire.

Bien que les glissements dans les masses rocheuse sont principalement conditionnés par les discontinuités et sont du type planaire et ou en coin, les glissements circulaires affectent les roches altérées et les roches fortement fissurées. Dans de tels matériaux, les plans de ruptures s'approchent de la forme circulaire (**figure III.11**).



Figure III.13. Rupture circulaire dans des granites fortement altérés (Highway 1, near Devil's Slide, Pacifica, California).

III.8.1. Conditions de rupture circulaire et méthodes d'analyse .

La roche est si fracturée qu'aucune famille de discontinuité n'existe. La rupture est libre de se produire dans les zones de faible résistance. La rupture se produit en cisaillement (angle de frottement et cohésion).

Même théories qu'en mécanique des sols, les méthodes d'analyse est l'équilibre limite, Jambu, Bishop, méthode des tranches, etc.). La méthode est itérative. La surface de rupture est choisie. Les forces stabilisatrices et déstabilisatrices sont calculées ainsi que le facteur de sécurité (FOS). Puis, une autre surface de rupture est choisie et l'opération reproduite. Le plan de rupture probable est celui qui correspond au facteur de sécurité les plus faible.

III.8.2 Risque de chute de pierres.

Dans les zones montagneuses, les routes sont souvent exposées aux aléas de chute de blocs. Ces chutes sont souvent les résultats de la mise au jour des discontinuités par les excavations qu'exige le tracé. Ces chutes surviennent quand les conditions géologiques, structurales et environnementales préparent un bloc pour être vaincu par la gravité. Les conditions sont de deux types: le premier étant de nature structurale et ça concerne les joints et les discontinuités ainsi que les frottements sur la surface des joints. Le second concerne l'érosion différentielle sur le talus car, les ruptures potentielles sont directement liées à ce facteur. Pour ces deux groupes de conditions, il est souvent difficile de décider le quel il faut en utiliser. L'estimation de l'aléa chute de pierre est établi sur la base des conditions cités (Pierson 1991).

Table 1. Summary sheet of Rockfall Hazard Rating System (after Pierson et al., 1990).

Category	Rating criteria by score			
	Points 3	Points 9	Points 27	Points 81
Slope height	7.5 m	15 m	22.5 m	> 30 m
Ditch effectiveness	Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment
Average vehicle risk (% of time)	25%	50%	75%	100%
Decision sight distance (% of design value)	Adequate (100%)	Moderate (80%)	Limited (60%)	Very limited (40%)
Roadway width (including paved shoulders)	13.20 m	10.80 m	8.40 m	6 m
Geologic characteristics Case 1	Structural condition	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation
	Friction	Rough, irregular	Undulating	Planar
Geologic characteristics Case 2	Structural condition	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features
	Difference in erosion rates	Small	Moderate	Large
Block size	0.3 cm	0.6 m	0.9 m	1.20 m
Volume of rockfall per event	2.3 m ³	4.6 m ³	6.9 m ³	9.2 m ³
Climate and presence of water on slope	Low to moderate precipitation; no freezing periods; no water on slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods	High precipitation and long freezing periods or continual
Rockfall history	Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls

Tableau. III. 1 summary of rockfall hazard rating system.

L'analyse de stabilité des talus est souvent réalisée par une des méthodes citées plus haut, il s'agit de l'équilibre limite ou l'analyse cinématique par la méthode de projection stéréographique. Les ruptures sont planaire, circulaire ou en dièdre. Dans la masse rocheuse, il est préférable d'estimer la stabilité des pentes des excavations par la méthode Slope Rock Mass Rating (SMR) (Romana 1991). Le SMR est donné par :

$$SMR = RMR - (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) \cdot F_4 ,$$

F_1 facteur dépendant du parallélisme entre les joints et la face du talus

F_2 exprime la relation le pendage des joints pour la rupture planaire

F_3 exprime la relation talus et pendage des joints

F_4 facteur d'ajustement pour la méthode d'excavation

SMR classification (ROMANA, 1985) and related description of stability conditions, failures and support measures.

SMR	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
Class				V	IV			III			II			I		
SMR Interval				11-20	21-40			41-60			61-80			81-100		
Description				Very bad	Bad			Normal			Good			Very Good		
Stability				Completely unstable	Unstable			Partially stable			Stable			Completely stable		
Probable failure types																
Plane failure				Very big			Major			None						
Wedge failure							Many			Some			Very few			None
Toppling							Major			Minor			None			
Mass failure				Possible									None			
Support measures																
Reexcavation				Reexcavation Walls												
Drainage				Surface drainage Deep drainage												
Concrete							Shotcrete Dental concrete Ribs and/or Beams Toe walls									
Reinforcement										Bolts Anchors						
Protection										Toe ditch Toe or Slope fences Nets						
No support													Scaling None			

Tentative description of Slope Mass Rating (after Romana, 1991).

Class	V	IV	III	II	I
<i>SMR</i>	0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Description	Very bad	Bad	Normal	Good	Very good
Stability	Completely unstable	Unstable	Partially stable	Stable	Completely stable
Failures	Big planar or soil-like	Planar or big wedges	Some joints or many wedges	Some blocks	None

Tableau III. 2 Classification (romana .1985) .

III.8.3 Localisation des parties instables sur un talus

Sur un talus ou une falaise, deux types de facteurs sont à considérer dans l'estimation de la probabilité de chute de pierres. Il s'agit des facteurs de prédispositions et des facteurs déclencheurs. Les facteurs de prédispositions de chutes de pierres sont les joints (orientation, espacement, pendage, matériaux de remplissages et l'ouverture des joints). Ces facteurs préparent d'une manière ou d'une autre les roches pour les rendre susceptibles de tomber. Les facteurs déclencheurs, de l'autre coté, sont les précipitations, le gel-dégel, la croissance des racines des arbres et les tremblements de terre. En raison de l'interaction complexe des facteurs déclencheurs de chutes de pierres, il est difficile de fournir la probabilité réelle d'une chute potentielle de pierres en fonction d'une période donnée (Hantz et al 2003). Très souvent, des chutes de pierres se produisent soudainement dans des endroits où il existe peu ou pas d'indices d'instabilité préalables.

Les indicateurs d'instabilité incluent à la fois des caractéristiques liées à une rupture future, telles que des fissures ouvertes ou des rochers en état d'équilibre limite, et des caractéristiques indiquant des ruptures récentes et passées, telles que les cicatrices dans le plan de la falaise. En règle générale, l'activité passée des chutes de pierres est une bonne source d'informations si les conditions de la magnitude et de la fréquence des facteurs de prédisposition et déclencheurs de chutes de pierres n'ont pas changé de manière significative.

L'activité future des chutes de pierres peut être estimée en comparant la structure géologique de la masse rocheuse et la topographie de la pente (Hoek & Bray 1981, Goodman & Shi 1985). Dans ce contexte, la taille, la densité, l'orientation et la continuité des discontinuités rocheuses revêtent une importance capitale. Il existe actuellement de nombreuses méthodes d'estimation de la probabilité de rupture basées sur les systèmes d'appréciation de rupture des roches (Mazzocola et Hudson 1996, Budetta, 2004, Corominas et al 2005, Jaboyedoff et al 2005). Les systèmes fréquemment utilisés sont le Slope Mass Rating de Romana (1988), le Rockfall Hazard Rating System (RHRS) mis au point par Pierson et al. (1990) et Matterrock (Rouiller et al. 1997). De telles méthodes nécessitent généralement des notations sur les caractéristiques géologiques, le volume des roches potentiellement détachables, l'historique des chutes de pierres, les facteurs déclencheurs (climat, circulation de l'eau) et, dans certains cas, des estimations des tendances futures de la stabilité d'une pente. L'évaluation de la taille de la roche, le volume d'un bloc détachable peut être estimé, en première approximation, sur la surface de la falaise.

Trois paramètres sont considérés comme les plus importants pour déterminer le volume d'un bloc détachable: l'espacement, l'attitude et la persistance des discontinuités (Corominas et al 2005). L'espacement des discontinuités contrôle la taille des blocs individuels après le premier impact de la masse tombée au sol (Priest & Hudson 1976). L'attitude et la persistance (continuité) des joints déterminent la taille du plus grand bloc détachable. Il est généralement difficile de mesurer la taille des roches dans la zone source des chutes de pierres en raison de son accessibilité limitée ainsi que du danger imminent de chutes de pierres. De plus, il existe des limites méthodologiques pour déterminer les joints qui mèneront finalement au détachement des pierres. Cependant, il est important d'analyser à la fois la zone source et la zone de dépôt pour obtenir une indication de la distribution de la taille des pierres (Mölk 2000). Les méthodes disponibles pour évaluer la taille des pierres dans la zone source sont résumées dans le tableau 1.

III.8.4 Évaluation de la fréquence des chutes de pierres.

En général, la fréquence des chutes de pierres doit être évaluée séparément pour toutes les classes de taille de roches. Aucune relation fréquence - magnitude n'ayant été établie et couvrant toutes les classes de taille de roche (Abele 1972, Whalley 1984, Krautblatter et al 2007). Les sources importantes pour prédire les fréquences des chutes de pierres sont des observations historiques et actuelles. Les chutes de pierres les plus importantes sont souvent consignées dans des descriptions historiques, des documents et des cartes (Morche et al 2006), mais leur interprétation pourrait nécessiter une expérience des sources historiques (Glade & Lang 2003). La prédiction de fréquences futures sur la base d'événements de chutes de pierres historiques n'est toutefois possible que si des conditions environnementales restent les mêmes (Krautblatter & Moser, 2006). Par conséquent, ces méthodes ne sont généralement pas applicables aux environnements qui :

- 1) connaissent actuellement une transition de phase aux fluctuations climatiques
- 2) dont l'état constitutionnel a été modifié par un événement majeur précédent (par exemple, de gros éboulements de pierres),
- 3) dont l'environnement a été modifié en raison d'interactions anthropiques ou naturelles (par exemple, des sous-routes ou des incisions fluviales),
- 4) ceux qui sont susceptibles d'être affectés par de futures situations de déclenchement (par exemple, des tremblements de terre, événements extrêmes de tempêtes de pluie).

III.9. Conclusion.

L'évaluation de la stabilité d'un versant peut se faire par diverses méthodes afin de définir un facteur de sécurité pour apprécier la marge de sécurité du versant vis-à-vis de la rupture et d'identifier la zone instable. De plus des techniques de confortements, elles doivent être adaptées aux conditions du site.

Chapitre IV

Estimation de la

stabilité et risque

associé du tronçon de

route étudié.

IV.1 Risque de chute de pierres.

Dans les zones montagneuses, les routes sont souvent exposées aux aléas de chute de blocs. Ces chutes sont souvent les résultats de la mise au jour des discontinuités par les excavations qu'exige le tracé. Ces chutes surviennent quand les conditions géologiques, structurales et environnementales préparent un bloc pour être vaincu par la gravité. Les conditions sont de deux types: le premier étant de nature structurale et ça concerne les joints et les discontinuités ainsi que les frottements sur la surface des joints. Le second concerne l'érosion différentielle sur le talus car, les ruptures potentielles sont directement liées à ce facteur. Pour ces deux groupes de conditions, il est souvent difficile de décider le quel il faut en utiliser. L'estimation de l'aléa chute de pierre est établi sur la base des conditions cités (Pierson 1991)

	Category	Rating criteria by score				
		Points 3	Points 9	Points 27	Points 81	
	Slope height	7.5 m	15 m	22.5 m	> 30 m	
	Ditch effectiveness	Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment	
	Average vehicle risk (% of time)	25%	50%	75%	100%	
	Decision sight distance (% of design value)	Adequate (100%)	Moderate (80%)	Limited (60%)	Very limited (40%)	
	Roadway width (including paved shoulders)	13.20 m	10.80 m	8.40 m	6 m	
Geologic characteristics	Case 1	Structural condition	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
	Case 2	Friction	Rough, irregular	Undulating	Planar	Clay infilling or slickensided
	Structural condition	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features	Major erosion features	
	Difference in erosion rates	Small	Moderate	Large	Extreme	
	Block size	0.3 cm	0.6 m	0.9 m	1.20 m	
	Volume of rockfall per event	2.3 m ³	4.6 m ³	6.9 m ³	9.2 m ³	
	Climate and presence of water on slope	Low to moderate precipitation; no freezing periods; no water on slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods	High precipitation and long freezing periods or continual	
	Rockfall history	Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls	

Tableau IV.1 summary sheet of rock fall hazard rating system

L'analyse de stabilité des talus est souvent réalisée par une des méthodes citées plus haut, il s'agit de l'équilibre limite ou l'analyse cinématique par la méthode de projection stéréographique. Les ruptures sont planaire, circulaire ou en dièdre. Dans la masse rocheuse, il est préférable d'estimer la stabilité des pentes des excavations par la méthode Slope Rock Mass Rating (SMR) (Romana 1991). Le SMR est donné par :

$$SMR = RMR - (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) \cdot F_4 ,$$

F_1 facteur dépendant du parallélisme entre les joints et la face du talus

F_2 exprime la relation le pendage des joints pour la rupture planaire

F_3 exprime la relation talus et pendage des joints

F_4 facteur d'ajustement pour la méthode d'excavation

SMR	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
Class		V			IV			III			II			I		
SMR Interval		11-20			21-40			41-60			61-80			81-100		
Description		Very bad			Bad			Normal			Good			Very Good		
Stability		Completely unstable			Unstable			Partially stable			Stable			Completely stable		
Probable failure types																
Plane failure		Very big			Major			Some			None					
Wedge failure					Major			Minor			None					
Toppling					Possible						None					
Mass failure																
Support measures																
Reexcavation		Reexcavation Walls														
Drainage		Surface drainage			Deep drainage											
Concrete					Shotcrete			Dental concrete			Ribs and/or Beams			Toe walls		
Reinforcement								Bolts			Anchors					
Protection								Toe ditch			Toe or Slope fences			Nets		
No support														Scaling		
														None		

Tentative description of Slope Mass Rating (after Romana, 1991).

Class	V	IV	III	II	I
<i>SMR</i>	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Description	Very bad	Bad	Normal	Good	Very good
Stability	Completely unstable	Unstable	Partially stable	Stable	Completely stable
Failures	Big planar or soil-like	Planar or big wedges	Some joints or many wedges	Some blocks	None

Tableau IV. 2. SMR classification Romana 1985 .

IV.2 Localisation des parties instables sur un talus

Sur un talus ou une falaise, deux types de facteurs sont à considérer dans l'estimation de la probabilité de chute de pierres. Il s'agit des facteurs de prédispositions et des facteurs déclencheurs. Les facteurs de prédispositions de chutes de pierres sont les joints (orientation, espacement, pendage, matériaux de remplissages et l'ouverture des joints). Ces facteurs préparent d'une manière ou d'une autre les roches pour les rendre susceptibles de tomber. Les facteurs déclencheurs, de l'autre côté, sont les précipitations, le gel-dégel, la croissance des racines des arbres et les tremblements de terre. En raison de l'interaction complexe des facteurs déclencheurs de chutes de pierres, il est difficile de fournir la probabilité réelle d'une chute potentielle de pierres en fonction d'une période donnée (Hantz et al 2003). Très souvent, des chutes de pierres se produisent soudainement dans des endroits où il existe peu ou pas d'indices d'instabilité préalables.

Les indicateurs d'instabilité incluent à la fois des caractéristiques liées à une rupture future, telles que des fissures ouvertes ou des rochers en état d'équilibre limite, et des caractéristiques indiquant des ruptures récentes et passées, telles que les cicatrices dans le plan de la falaise. En règle générale, l'activité passée des chutes de pierres est une bonne source d'informations si les conditions de la magnitude et de la fréquence des facteurs de prédisposition et déclencheurs de chutes de pierres n'ont pas changé de manière significative.

L'activité future des chutes de pierres peut être estimée en comparant la structure géologique de la masse rocheuse et la topographie de la pente (Hoek & Bray 1981, Goodman & Shi 1985). Dans ce contexte, la taille, la densité, l'orientation et la continuité des discontinuités rocheuses revêtent une importance capitale. Il existe actuellement de nombreuses méthodes d'estimation de la probabilité de rupture basées sur les systèmes d'appréciation de rupture des roches (Mazzoccola et Hudson 1996, Budetta, 2004, Corominas et al 2005, Jaboyedoff et al 2005). Les systèmes fréquemment utilisés sont le Slope Mass Rating de Romana (1988), le Rockfall Hazard Rating System (RHRS) mis au point par Pierson et al. (1990) et Matterrock (Rouiller et al. 1997). De telles méthodes nécessitent généralement des notations sur les caractéristiques géologiques, le volume des roches potentiellement en détachables, l'historique des chutes de pierres, les facteurs déclencheurs (climat, circulation de l'eau) et, dans certains cas, des estimations des tendances futures de la stabilité d'une pente. L'évaluation de la taille de la roche, le volume d'un bloc détachable peut être estimé, en première approximation, sur la surface de la falaise.

Trois paramètres sont considérés comme les plus importants pour déterminer le volume d'un bloc détachable: l'espacement, l'attitude et la persistance des discontinuités (Corominas et al 2005). L'espacement des discontinuités contrôle la taille des blocs individuels après le premier impact de la masse tombée au sol (Priest & Hudson 1976). L'attitude et la persistance (continuité) des joints déterminent la taille du plus grand bloc détachable. Il est généralement difficile de mesurer la taille des roches dans la zone source des chutes de pierres en raison de son accessibilité limitée ainsi que du danger imminent de chutes de pierres. De plus, il existe des limites méthodologiques pour déterminer les joints qui mèneront finalement au détachement des pierres. Cependant, il est important d'analyser à la fois la zone source et la zone de dépôt pour obtenir une indication de la distribution de la taille des pierres (Mölk 2000). Les méthodes disponibles pour évaluer la taille des pierres dans la zone source sont résumées dans le tableau 1.

IV.3 Évaluation de la fréquence des chutes de pierres

En général, la fréquence des chutes de pierres doit être évaluée séparément pour toutes les classes de taille de roches. Aucune relation fréquence - magnitude n'ayant été établie et couvrant toutes les classes de taille de roche (Abele 1972, Whalley 1984, Krautblatter et al 2007). Les sources importantes pour prédire les fréquences des chutes de pierres sont des observations historiques et actuelles. Les chutes de pierres les plus importantes sont souvent consignées dans des descriptions historiques, des documents et des cartes (Morche et al 2006), mais leur interprétation pourrait nécessiter une expérience des sources historiques (Glade & Lang 2003). La prédiction de fréquences futures sur la base d'événements de chutes de pierres historiques n'est toutefois possible que si des conditions environnementales restent les mêmes (Krautblatter & Moser, 2006). Par conséquent, ces méthodes ne sont généralement pas applicables aux environnements qui

- 5) connaissent actuellement une transition de phase aux fluctuations climatiques
- 6) dont l'état constitutionnel a été modifié par un événement majeur précédent (par exemple, de gros éboulements de pierres),
- 7) dont l'environnement a été modifié en raison d'interactions anthropiques ou naturelles (par exemple, des sous-routes ou des incisions fluviales),
- 8) ceux qui sont susceptibles d'être affectés par de futures situations de déclenchement (par exemple, des tremblements de terre, événements extrêmes de tempêtes de pluie).

IV.4 Application au cas d'étude.

Le tronçon de la route menacé par les instabilités gravitationnelles, en l'occurrence, les chute de pierres se situe exactement à mi-chemin entre sidi Maarouf et El Milia. Il s'agit de d'un talus sub-vertical crée suite aux travaux d'excavations routiers dans les calcaires du tithonique (jurassique inférieur). Se sont des calcaires gris à gris claire de bancs décimétriques avec présence de joints marneux. Ils coupés par plusieurs familles de discontinuités (failles, joints, fractures). Au moins trois familles de discontinuités ont pu être observées et mesurées. Il s'agit de joints stratigraphiques de direction sensiblement NW-SE plongeant vers l'est, de failles de directions NE – SW plongent vers le sud et des discontinuités E-W dont le pendage varie de sub-verticales à fort vers le sud coupant le plan du talus. L'histoire tectonique et la position structurale de ces calcaires a engendré une fracturation intense au point ou elle laisse penser que ces calcaires sont affectés par une infinité de famille de discontinuités. L'apparente orientation aléatoire des discontinuités réduit considérablement la résistance mécanique de la masse rocheuse.

L'investigation des conditions de la masse rocheuse pour l'estimation des conditions géo mécaniques des falaises a été élaborée visuellement d'une distance a cause du danger associé avec le relief escarpé et l'intensité du trafic routier. La direction, la persistance, l'espacement, l'ouverture des joints, la rugosité et la résistance à la compression uniaxiale ont été estimé le long de lignes de mesure choisies. Au moins trois familles de discontinuités ont été identifiées caractérisées par un espacement étroit à moyennement étroit, ouvertures moyenne et des surfaces plus ou moins rugueuses. Les roche intacte a une résistance mécanique moyenne à élevée.

Les paramètres géo mécaniques tirés du levé de terrain sont souvent utilisés pour classer la masse rocheuse selon le system RMR_{base} qui permet ensuite de classer chaque élément du talus selon de SMR. La note SMR sert à juger la stabilité des différentes parties du talus.

Dans cette étude on a choisi d'utiliser le système GSI (Hoek 1994) qui permet à partir d'une inspection visuelle de l'état de la roche masse et d'un abaque spécial de définir un paramètre connu par Geological Strength Index (GSI) (figure IV. 1).

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavorable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behavior. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
		DECREASING SURFACE QUALITY				
	INTACT OR MASSIVE – intact rock specimens or massive <i>in situ</i> rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY – well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY – interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY – olded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED – poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED – lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A		20	10
		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES				

Figure IV. 1 les paramètres connus par Geological Strength Index (GSI) .



Figure IV. 2. L'état de la roche masse le long de la route.

Selon l'état de la masse rocheuse tel qu'observé en affleurement, sa position sur l'abaque GSI nous a donné une valeur GSI aux environ de 40.

Le RMR_{base} est ensuite calculé par la formule :

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

$$\text{Le } RMR_{89} = GSI + 5.$$

Doc notre RMR base est de 53 %.

Le calcul du SMR est selon la formule

$$SMR = RMR - (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) \cdot F_4,$$

$$F_1 = (1 - \sin A) = 0,2$$

$$F_2 = \text{tg}^2 B = 1$$

$$F_3 = \text{on a utilisé les valeurs de Beniawski} = -50$$

$$F_4 = 0 \quad \text{=====> } (F_1 * F_2 * F_3) + F_4 = (0.2 \times 1 \times -50) + 0 = -10$$

$$\text{Donc SMR} = 40 - 10 = 30$$

SMR	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100	
Class		V			IV	III			II			I					
SMR Interval		11-20			21-40	41-60			61-80			81-100					
Description		Very bad			Bad	Normal			Good			Very Good					
Stability		Completely unstable			Unstable	Partially stable			Stable			Completely stable					
Probable failure types																	
Plane failure		Very big			Major			Some			Very few			None			
Wedge failure					Major			Some			Very few			None			
Toppling					Major			Minor			None						
Mass failure		Possible									None						

Tableau . IV.3 position de l'état de stabilité du talus en question dans le tableau de classification SMR (Romana ,1991).

Selon le tableau (fig. V.3) le talus de l'excavation routière entre Sidi Maarouf et El Milia est classé en catégorie IV, mauvaise état de la roche masse et instable. Il est noté que la probabilité de rupture planaire, en coin et en masse est forte.

Sur le talus plusieurs on peut facilement localiser les zones sources d'anciens événements de chute de pierres (fig. IV. 3).

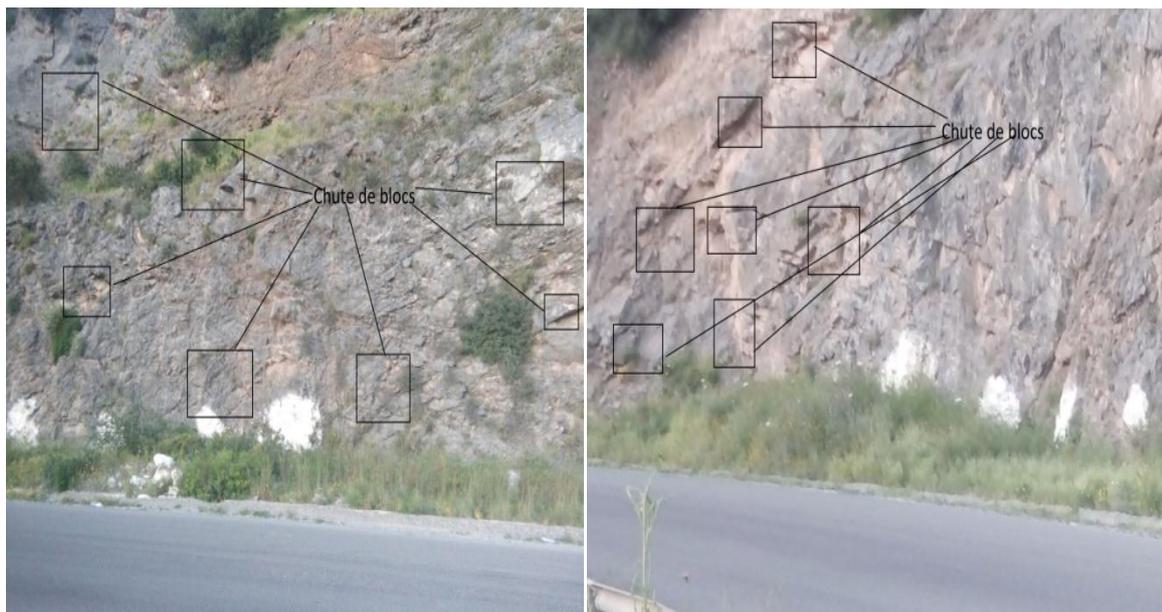


Figure IV. 3. Les zones sources de chute de pierres.

IV.5. Estimation de l’alea chute de pierres.

IV.5.1 Le système d’évaluation de l’alea chute de pierres (The rockfall hazard rating system).

Le département de l’Oregon de transport (USA) a développé un système de classification, conçu spécialement pour les excavations autoroutières, le Rockfall Hazard Système (Pierson et al., 1990) pour identifier les talus dangereux et nécessitent des travaux de réparation urgents ou des études complémentaires.

Cette méthode contient tous les éléments concernant la chute de pierres (hauteur du talus, caractéristiques géologiques, taille des masses instables, climat et présence d’eau sur les talus, l’historique des chutes de pierres) et la vulnérabilité des véhicules (efficacité des fossés, risque moyen du véhicule, pourcentage de la distance de décision, largeur de la chaussée), la note totale résultante évalue le degré d'exposition au risque le long des routes (tableau.IV.4). Les scores des critères d’évaluation augmentent de façon exponentielle de 3 à 81 points et permettent rapidement de distinguer les sites les plus dangereux.

	Category	Rating criteria by score				
		Points 3	Points 9	Points 27	Points 81	
	Slope height	7.5 m	15 m	22.5 m	> 30 m	
	Ditch effectiveness	Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment	
	Average vehicle risk (% of time)	25%	50%	75%	100%	
	Decision sight distance (% of design value)	Adequate (100%)	Moderate (80%)	Limited (60%)	Very limited (40%)	
	Roadway width (including paved shoulders)	13.20 m	10.80 m	8.40 m	6 m	
Geologic characteristics	Case 1	Structural condition	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
	Case 2	Friction	Rough, irregular	Undulating	Planar	Clay infilling or slickensided
	Structural condition	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features	Major erosion features	
	Difference in erosion rates	Small	Moderate	Large	Extreme	
	Block size	0.3 cm	0.6 m	0.9 m	1.20 m	
	Volume of rockfall per event	2.3 m ³	4.6 m ³	6.9 m ³	9.2 m ³	
	Climate and presence of water on slope	Low to moderate precipitation; no freezing periods; no water on slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods	High precipitation and long freezing periods or continual	
	Rockfall history	Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls	

Tableau .IV.4 summary sheet of rock fall Hazard Rating System (after Pierson et al .1990).

IV .5.2 Le système modifié d'évaluation de l'alea chute de pierres (The modified rockfall hazard rating system)

Ce système modifié d'évaluation de l'alea chute de pierres est venu pour simplifier l'application du système d'évaluation de l'alea chute de pierres. Dans ce système modifié l'estimation des notes relatives à l'efficacité des fossés, aux caractéristiques géologiques, au volume des blocs, au climat et à la circulation de l'eau et à l'histoire des chutes de pierres est rendu plus simple et plus efficace, ceci est résumé dans le tableau 5.

Category	Rating criteria by score			
	Points 3	Points 9	Points 27	Points 81
Slope height	7.5 m	15 m	22.5 m	> 30 m
Ditch effectiveness	Good catchment: properly designed according to updates of Ritchie's ditch design chart + barriers	Moderate catchment: properly designed according to updates of Ritchie's ditch design chart	Limited catchment: wrongly designed	No catchment
Average vehicle risk (% of time)	25%	50%	75%	100%
Decision sight distance (% of design value)	Adequate (100%)	Moderate (80%)	Limited (60%)	Very limited (40%)
Roadway width	21.5 m	15.50 m	9.50 m	3.50 m
Slope Mass Rating (SMR)	80	40	27	20
Block size	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm
Boulder volume	26 dm ³	0.21 m ³	0.73 m ³	1.74 m ³
Volume of rockfall per event	2.3 m ³	4.6 m ³	6.9 m ³	9.2 m ³
Annual rainfall and freezing periods	<i>h</i> =300 mm or no freezing periods	<i>h</i> =600 mm or short freezing periods	<i>h</i> =900 mm or long freezing periods	<i>h</i> =1200 mm or long freezing periods
Rockfall frequency	1 per 10 years	3 per year	6 per year	9 per year

Tableau .IV.5 Summary sheet of the modified rock fall Hazard Rating System.

IV .5.2.1 La hauteur du talus.

Elle concerne la hauteur verticale du talus. elle donne une estimation de l'énergie de chute.

IV.5.2.2 L'efficacité des fossés.

L'efficacité d'un fossé se mesure à sa capacité à empêcher les pierres tombantes d'atteindre la route. Dans l'estimation l'efficacité du fossé, les facteurs à prendre en compte sont: (i) hauteur et angle de la pente; (ii) largeur, profondeur et forme du fossé.

IV.5.2.3 Le risque moyen lié au véhicule.

Il représente la probabilité d'occurrence spatiale d'un véhicule dans la zone de risque de chute de pierres. Ce risque (AVR) est obtenu par :

$$AVR = (ADT \cdot SL \cdot 100\%) / P SP$$

- (1) où ADT est le trafic moyen par jour (véhicule / jour);
- (2) SL est la longueur de la zone de danger (km);
- (3) PSP est la limite de vitesse affichée (km/h).

Une note de 100% signifie qu'en moyenne, un véhicule peut se trouver dans la zone de danger. Un RVA élevé (> 100%) indique que, à un moment donné, plus d'un véhicule est présent dans la zone de danger (Pierson et al., 1990).

IV.5.2.4 La distance de décision

Elle représente la longueur de route (en km) dont le conducteur a besoin pour effectuer une tâche complexe ou instantanée. Le pourcentage de distance de vue de décision (PDSD) est obtenu par :

$$PDSD = (ASD / DSD) \cdot 100\%$$

où ASD est la distance de visibilité réelle (km).

La distance de vue de décision est ici considérée comme la distance le long d'une chaussée dans laquelle un objet stationnaire de 15 cm de hauteur visible de façon continue à partir de 1,10 m au-dessus de la route (c'est-à-dire hauteur de l'œil du conducteur sur la route).

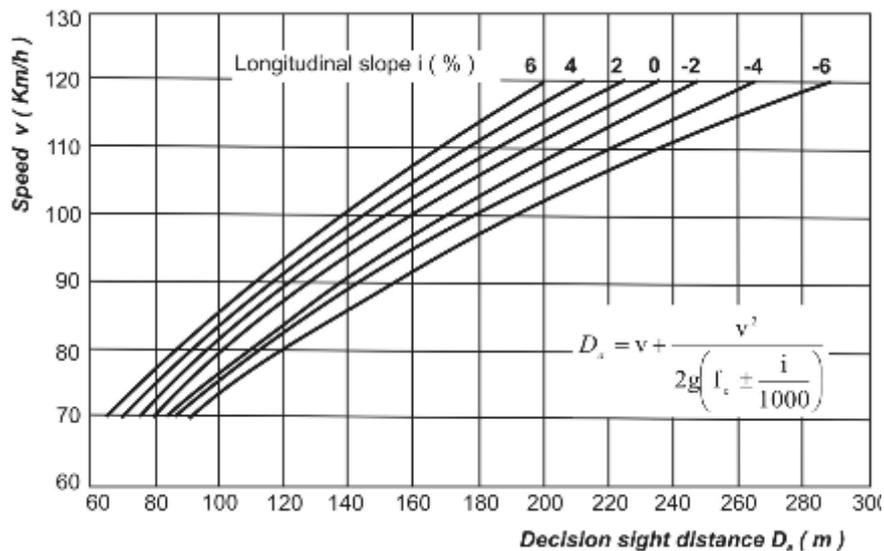


Figure IV.4. Correlation between Descision sight distance (D_a) and vehicle velocity (v) for different longitudinal slopes (i) (after CNR,1980).

IV.5.2.5 La largeur de la route (Roadway width)

La largeur de manœuvre pour éviter un bloc en chute le long de la route est mesurée perpendiculairement à l'axe centrale de la chaussée et s'étant d'un côté à l'autre de la route avec les trottoirs.

Pour le cas présent le risque associé au chute de pierre est tel que présenté sur le tableau suivant.

No	Category	Value	Rating
1	Slope height	25 m	39
2	Ditch effectiveness	no catchment	81
3	Average vehicle risk	75 %	32
4	Decision sight Distance	80 %	15
5	Roadway width	6 m	40
6	Slope Mass Rating (SMR)	30 (class III)	20
7	Block size	0.51 m	6
8	Annual rainfall	1005 mm	40
9	Rockfall frequency	6 per 10 years	27

Tableau .IV.6 Application example of the modified RHRS methode .

La somme des notes dans le system d'évaluation de risque de chute est de 300 points. Cette note correspond au talus (excavations) qui nécessitent des travaux de confortement mais pas d'une manière urgente. Cette note incite a vérifier le talus d'une manière minutieuse et définir tous les types d'instabilité et concevoir les méthodes de confortement appropriés pour chaque source potentielle.

Conclusion générale

Conclusion générale.

Les chutes de pierres sont considérées comme un danger important pour les routes de montagnes longeant les pieds de falaises et celles coupant les massifs rocheux fissurés. Les blocs qui tombent du haut d'une pente peuvent facilement induire des dommages et même des pertes en matériels et vies humaines. En plus des constatations sur le terrain et les événements enregistrés dans les archives on a voulu faire une étude de stabilité pour l'ensemble des falaises. La masse rocheuse a travers laquelle la route passe est généralement classée moyen à médiocre. Elle est peu altérée mais très fracturée ce qui favorise le détachement des blocs, pierres et glissement de terrain. L'application de la méthode Slope Rock Mass Rating (SMR) a montré que les talus rocheux étudiés présentent de forte probabilité de chute de pierres et glissements. Ces instabilités probables et qui peuvent se déclencher à n'importe quel moment sont du type rupture en coin, et en masse.

Pour l'évaluation du risque le New Rockfall Hazard Rating System (RHRS) a été appliquée et a donné un score de 300. Sachant que les pentes avec des scores inférieurs à 300 sont classées pour des travaux de remise en état peu urgents, tandis que celles supérieures à 500 nécessitent des mesures de stabilisation immédiates. Dans notre cas le score de 300 points ne nécessite pas des travaux urgents, néanmoins, les travaux de confortement et de vérification annuelle de l'état de stabilité sont fortement recommandés. Pour réduire le risque il convient également de tirer l'attention des usagers de la route par des panneaux bien visibles pour la réduction de la vitesse et rester vigilant du danger.

Bibliographie

Bieniawski, Z. T. "Classification of Rock Mass for engineering: the RMR system and future trends". Comprehensive Rock Engineering. J. A. Hudson. 3; Rock Testing and Site Characterization. 1993.

BENLAMARI, A. (2015). *ETUDE GEOLOGIQUE ET GÛTOLOGIQUE DE LA MINERALISATION FERRIFERE ET CUPRO-BARYTIQUE DES MASSIFS CARBONATES DE KEF SIDI MAROUF, KEF DERDJA ET KEF BOULEHMAME, COMMUNE DE SIDI MAROUF (NE ALGERIEN)*. UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI - CONSTANTINE - , RESSOURCES MINERALES .

Bieniawski, Z. T. "Engineering classification of jointed rock masses." Trans. S. Afr. Instn. Civil Engrs. **15**(12): 335-344. 1973.

Bieniawski Z.T., [1989], "Engineering rock mass classifications a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering", New-York, Wiley- Interscience.

Chalhoub M., [2006], "Apports des méthodes d'homogénéisation numériques a la classification des massifs rocheux fracturées". Thèse de doctorat, Ecole Nationale

Dershowitz, W.S . " Rock fracture systems". Ph.D. Thesis. Dept. of Civil Eng., MIT, Cambridge. 1984.

Huang R, Liu W. (2009). —In-situ test study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design. || Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol 28(5): 882-891.

Maged Almandalawi, G. Y. (2015). SLOPE STABILITY AND ROCKFALL HAZARD ANALYSIS IN OPEN. *Int. J. of GEOMATE*, , 1143-1150.

Palmstrom, A. "RMI - A rock mass caractérisation system for rock engineering purposes" . University of Oslo, Ph.D. Thesis, 400 p. 1995.

Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In International Symposium on the Role of Rock Mechanics (pp. 49–53). Zacatecas, Mexico.

Supérieure des Mines de Paris, spécialité géologie de l'ingénieur.

Valagussa A, Frattini P, Crosta G B. (2014). —Earthquake-induced rockfall hazard zoning. || Engineering Geology, Vol 182(2014): 213– 225.

Zhang G, Xiang X, Tang H. (2011). —Field test and numerical calculation of restitution coefficient of rockfall collision. || Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol 30(6): 1266-1273.