



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-ouzou



Département de Génie civil

Mémoire pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : **SCIENCE ET TECHNOLOGIE**

Filière : **GENIE CIVIL**

Spécialité : **GEOTECHNIQUE**

- Thème -

**Caractérisation et classification géomécanique des
massifs rocheux
(Étude de cas : la déviation de la RN25 touchée
par la cuvette du barrage de SOUK EL TLETA
dans la wilaya de TIZI OUZOU.)**

Présenté par

AMER SAID Kahina

Soutenance prévue pour le 29/09/2021 devant le jury composé de :

F. MEZIANI	MCB	Présidente
S.AIT BACHIR	MAA	Promotrice
H. MOUBAREK	MAA	Examinatce

Année Universitaire 2020 / 2021

Rapport provisoire

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A ma très chère maman, pour son amour, ses encouragements, ses sacrifices et ses prières qui m'ont toujours accompagnées.

Au meilleur des pères, pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordé.

"Mes parents" Quoique je puisse dire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance et j'espère être à la hauteur de leurs attentes.

*A mes précieuses sœurs, chahinaz et Kenza, source de force et d'amour.
A mes petits chers frères, Mouloud et Islam, source de bonheur.*

*A mes adorables cousines et cousins, Meriama, Jasmine, Sérine, Sid Ali, Ismail,
Abd elkarim, Lounis, Rahim, et le petit ange Sarah
Mes aimables amies, Kahina, Zahra, Siham, Imane, Malika et Sarah*

A toute ma famille, oncles et tantes et toutes les personnes qui m'ont encouragé et soutenu.

Kahina

Remerciement

je remercie en premier lieu DIEU qui nous a donné le courage, la patience et la force pour achever ce travail

je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Mme S.AIT BACHIR** pour son encadrement, son attention, ses orientations judicieuses et sa patience qui nous a permis d'accomplir ce projet de fin d'étude.

Je remercie aussi Mme **BOUAZZOUNI** pour son aide.

j' adresse aussi mes remerciement à tous les profs du département Génie civil.

je souhaite également remercier les membres de jury, Mme **F.MEZIANI**, et Mme **H.MOUBAREK** , d'avoir accepté d'évaluer ce travail de fin d'étude

Nos remerciements vont également à nos familles pour leur soutien et leurs encouragements.

Résumé

ملخص

عادة ما تكون معظم تحركات الأرض بسبب عدم استقرار الصخور، وهذه الظاهرة الطبيعية تمثل خطرًا على البشرية. تؤثر خصائص الكتلة الصخرية بشكل مباشر على نوع الحركة. تعد الدراسة الجيولوجية والجيوتقنية ضرورية لتوصيف كتلة الصخور وتصنيفها. ثم تمكنا من تحديد وتصنيف الكتلة الصخرية لهذا الانحراف بفضل أنظمة التصنيف الجيوميكانيكية مثل نظام RQD و RMR و Q وبالتالي تمكنا من تحديد جودة صخور هذه الكتل الصخرية في هذه المنطقة، متفاوتة من المتوسط إلى الجودة الجيدة، وعندما يتعلق الأمر باستقرار المنحدر، أظهر حساب SMR أن المنحدر غير مستقر لهذا السبب اقترحنا دعم التوصيات لتعزيز الأخير

الكلمات الدالة: عدم استقرار الصخور، الكتلة الصخرية، أنظمة التصنيف، السلوك الميكانيكي، التركيب الهندسي للانقطاعات، مصفوفة الصخور..

Abstract

Most land movements are generally due to rock instability; a natural phenomenon that poses a risk to humanity. The properties of the rock massif directly influence the type of movement. A geological and geotechnical study is required to characterize and classify a rocky massif. This established work first present the methodology for calculating the properties and behavior of the rocky massif of the deviation and modernization of the RN25 of TIZI-OUZOU through which it has been possible in the second place to characterize and classify the rocky massif of this deviation thanks to geotechnical classification systems such as the RQD, RMR and Q system it has therefore been possible to determine the quality of the rocks of these massifs in this zone, varying from the mean to the good quality, when to the stability of the slope the calculation of the SMR has demonstrated that the slope is unstable for this it has been suggested support recommendations to reinforce the latter.

Key words : Rock massif, classification systems, rock instability, mechanical behavior, geometric structure of discontinuities, rock matrix.

Résumé

La plupart des mouvements de terrain sont généralement dus à l'instabilité des roches, ce phénomène naturel présente un risque pour l'humanité. Les propriétés du massif rocheux influent directement sur le type de mouvement. Une étude géologique et géotechnique est nécessaire pour caractériser et classer un massif rocheux. Ce travail établi présente d'abord la méthodologie de calcul des propriétés et du comportement du massif rocheux de la déviation et de la modernisation de la RN25 de TIZI-OUZOU à travers laquelle on a pu en second lieu caractériser et classer le massif rocheux de cette déviation grâce aux système de classification géomécaniques tels que le RQD, RMR et Q système on a pu donc déterminer la qualité des roches de ces massifs de cette zone, variant de la moyenne à la bonne qualité, quand au la stabilité de la pente le calcul du SMR a démontré que la pente est instable pour cela on a suggéré des recommandations de soutènement pour renforcer cette dernière.

Mots clés : Massifs rocheux, Système de classification, instabilité des roches, structures géométriques des discontinuités, matrice rocheuse

Table des matières

Introduction générale	I
I Structure et comportement d'un massif rocheux	1
I.1 Introduction	1
I.2 Distinction sol/ roche	1
I.3 Classification géologique des roches	2
I.4 Structure géométrique des massifs rocheux	3
I.4.1 Description des massifs rocheux	3
I.4.2 Matrice rocheuse	4
I.4.3 Aspect géologique	4
I.4.4 La discontinuité	6
I.4.4.1 Description des discontinuités	6
I.4.4.2 Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux	6
I.4.4.3 Les familles des discontinuités	7
I.4.4.4 Les caractéristiques géométriques des discontinuités .	10
I.4.4.5 Les Caractéristiques mécaniques des discontinuités .	16
I.5 Conclusion	19
II Les systèmes de classification des massifs rocheux	20
II.1 Introduction	20
II.2 Les buts des systèmes de classification des massifs rocheux	20
II.3 Avantages des d'utilisation les systèmes de classifications	21
II.4 Les différents systèmes de classification	21
II.4.1 Le système du RQD (Rock Quality Designation)	23
II.4.1.1 Les limites du système RQD	24
II.4.2 Le système RMR (Rock Mass Rating)	25
II.4.2.1 Estimation des caractéristiques mécaniques des mas- sifs rocheux à partir du RMR	28
II.4.2.2 Limitations du système de classification RMR	29
II.5 Le système Q	29
II.6 Comparaison des utilisations des RME et Q	31
II.7 Système du GSI (Geological Strength Index)	32
II.8 Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)	34
II.9 Commentaires sur les systèmes de classification	38
II.10 Conclusion	38

III	présentation de la zone d'étude	39
III.1	Introduction	39
III.2	Présentation de la déviation de la RN25 touchée par la cuvette du barrage de SOUK EL TLETA dans la wilaya de TIZI OUZOU	39
III.2.1	Situation géographique	41
III.2.2	Géomorphologie	42
III.2.3	Climat	44
III.2.4	Zonage Sismique	44
III.3	CONTEXTE GEOLOGIQUE	46
III.3.1	Cadre géologique de la zone d'étude	46
III.3.2	Géologie régionale	47
III.3.2.1	Le Tell	47
III.3.3	Géologie locale	49
III.3.3.1	Description des principaux terrains	49
III.4	Tectonique	53
III.5	Hydrogéologie	54
III.5.1	Hydrogéologie régionale	54
III.5.2	Hydrogéologie locale	55
III.5.3	Hydrogéologie locale	55
III.6	Conclusion	55
IV	propriétés physico-mécaniques des roches	56
IV.1	Introduction	56
IV.2	Caractéristiques physiques	56
IV.2.1	Teneur en eau W % [NF P94- 050]	56
IV.2.1.1	Définition	56
IV.2.1.2	Exécution de l'essai	57
IV.2.1.3	Expression des résultats	57
IV.2.2	La masse volumique	57
IV.2.2.1	La masse volumique naturelle ρ_h	57
IV.2.2.2	La masse volumique sèche ρ_d et la masse volumique saturée ρ_{sat} par pesée hydrostatique [NF P94- 064]	58
IV.2.2.3	La masse volumique des particules solide ρ_s méthode du pycnomètre [NF P94- 054]	62
IV.2.3	Indice des vides et porosité	65
IV.2.3.1	Indice des vides (e)	65
IV.2.3.2	Porosité n	65
IV.3	Les propriétés mécaniques des roches	66
IV.3.1	Définition de la rupture.	66
IV.3.2	Critère de Mohr Coulomb	67
IV.3.3	Le Critère de Hoek et Brown	68
IV.3.4	Résistance en compression	69
IV.3.4.1	Essai de compression uni axiale [NF P94-420]	69
IV.3.4.2	Traitement statistique de la valeur de la résistance à la compression	73
IV.3.5	La résistance à la traction	74

IV.3.5.1	Essai de traction par flexion [NF P 18-407]	75
IV.3.5.2	Traitement statistique des données de la résistance à la traction par flexion	77
IV.4	Conclusion	78
V	Caractérisation et classification des massifs rocheux de la déviation de la modernisation de la RN25	79
V.1	Introduction	79
V.2	Etude des discontinuités	79
V.2.1	Caractéristiques rocheuse	80
V.2.2	Mesure de l'orientation des discontinuités	81
V.3	La présentation des données et des mesures	82
V.3.1	Le premier affleurement : Micaschiste	82
V.3.2	Le deuxième affleurement : Grès	84
V.3.3	Le troisième affleurement : Marbre	86
V.4	Classification géomécaniques des massifs rocheux de la déviation et de la modernisation de la RN25	88
V.4.1	Système du RQD (Rock Quality Designation)	88
V.4.2	Système Q	93
V.4.3	Système du GSI (Geological Strength Index)	94
V.4.4	Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)	94
V.5	Conclusion	97
	Conclusion générale	98
	Annexes	i
A	Caractéristique du massif suivant Q systèmes	i
A.1	paramètre Jr (paramètre de rugosité des joints), (Barton et al. 1974)	i
A.2	Paramètre Ja (paramètre d'altération des joints), (Barton et al 1974)	ii
A.3	Paramètre Jw (paramètre hydraulique), (Barton et al, 1974)	iii
A.4	Paramètre de Jn (nombre de famille de discontinuités), (Barton et al, 1974)	iv
A.5	Paramètre de SRF (paramètre de réduction relatif aux contraintes), (Barton et al.1974).	v
B	Caractérisation du massif suivant le GSI.	i
B.1	Couche des Micaschistes.	ii
B.2	Couche du Grès.	iii
B.3	Couche du Marbre.	iv
	Bibliographie	i

Liste des figures

I.1	Cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols [1]. . .	2
I.2	Les trois types de roches et le processus qui conduisent à leur formation.	3
I.3	Structure géométrique d'un massif rocheux des schistes(PK 4+900) de ILLALEN.	4
I.4	Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés [3]. .	5
I.5	Types de structures des massifs rocheux avec les représentations statistiques correspondantes [15].	6
I.6	Les joints stratigraphiques des micaschistes de la zone d'étude (TIZI OUZOU)	7
I.7	Réseau de diaclases dans un banc de grès (Eaglehawk Neck, Tasmania) [6].	8
I.8	Plan faille des grès de la région.	8
I.9	Microplissement au niveau des schistes de la région d'étude.	9
I.10	Schistosité au niveau des micaschistes du massif rocheux de la région.	9
I.11	le vecteur perpendiculaire au plan de discontinuité [4].	10
I.12	Mesures de l'orientation du plan de discontinuité.	11
I.13	Orientation d'une direction de plan dans l'espace, au centre en perspective cavalière, par la direction (ou azimut) de ses lignes de niveau (vue en plan, à gauche), et le pendage de ses lignes de pente (en coupe, à droite) [8].	11
I.14	Représentation stéréographique [9].	12
I.15	Projection stéréographique d'une faille inverse [10].	13
I.16	Mesure de l'espacement [11].	14
I.17	Mesure de la fréquence des discontinuités.	15
I.18	Fissure ouverte et remplie [14].	15
I.19	Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC) [12].	17
I.20	Epaisseur déformable d'un joint.	17
I.21	le modèle polygonale (Dershowitz 1984).	18
I.22	le modèle disque (Long 1985).	19
II.1	graphique des paramètres de caractérisation du RMR [3].	25
II.2	Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse (Hoek et Brown, 1995)	34
III.1	Situation de la zone de projet.	42

III.2 Terrain peu vallonné au début de projet.	43
III.3 Topographie très accidentée	43
III.4 Assif Tlatha	43
III.5 Oued Ksari.	43
III.6 La carte des précipitations de la campagne agricole 2012/2013 (du 01 septembre 2012 au 30 juin 2013)	44
III.7 Le zonage sismique du territoire Algérien élaboré par le CRAAG. . .	45
III.8 Le zonage sismique du territoire Algérien élaboré par le CRAAG. . .	46
III.9 La position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne Alpine	48
III.10 Les différents domaines et unités cités précédemment en Algérie (exemple du Constantinois, Algérie nord-orientale).	49
III.11 Les différentes unités géologiques d'après Domzig 2006	49
III.12 Affleurement de couche de grès altéré et fracturé de l'unité Miocène .	51
III.13 Grès dur avec des traces de fossiles	51
III.14 Affleurement de couche de grès altéré et fracturé de l'unité Miocène .	52
III.15 Gneiss foliacés.	52
III.16 Schiste écaillé	53
III.17 Micaschistes finement lités, légèrement oxydés	53
IV.1 Préparation les échantillons dans le panier de la pesée hydrostatique.	59
IV.2 Equipement de l'essai.	64
IV.3 Rupture d'un sol [4].	66
IV.4 Présentation graphique du cycle de mohr.	67
IV.5 Diagramme contrainte-déformation [10].	68
IV.6 Le dispositif expérimental.	70
IV.7 Essai de compression simple sur l'éprouvette cubique de grès (labo- ratoire Béton UMMTO).	71
IV.8 Essai de compression simple sur l'éprouvette cubique de marbre(laboratoire Béton UMMTO).	71
IV.9 Essai de compression simple sur l'éprouvette cubique de micaschiste(laboratoire Béton UMMTO).	72
IV.10 Essai de compression simple sur l'éprouvette cubique de gneiss (labo- ratoire Béton UMMTO).	72
IV.11 Machine de l'essai de traction par flexion (Laboratoire de Béton UMMTO).	75
IV.12 Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (4 points).	75
IV.13 Essai de traction par flexion à trois points sur les roches étudiées. . .	76
V.1 L'orientation des ensembles de discontinuités.	82
V.2 Photos du premier affleurement	82
V.3 Projection stéréographique des discontinuités du massif de Micaschiste.	84
V.4 l'affleurement des grès.	84
V.5 Projection stéréographique des discontinuités du massif de Grès. . . .	86
V.6 l'affleurement des marbres.	86
V.7 Projection stéréographique des discontinuités du massif de Marbre. . .	88

Liste des tableaux

I.1	La différence entre sol/roche	2
I.2	Description de l'espacement des discontinuités [11].	14
I.3	Classification d'ouverture des discontinuités [11].	16
II.1	Les anciens Systèmes de classification des massif rocheux	22
II.2	Classification d'ouverture des discontinuités [11].	24
II.3	Classification RMR(Bieniawski).	27
II.4	Les classes de roche suivant la classification de Z.BIENIAWSKI après application de la note d'ajustement	28
II.5	Relations entre RMR sec et la résistance à la compression simple d'après Stille et al. (1982).	29
II.6	Évaluation de la cote Q et de la qualité du massif [23].	31
II.7	Comparaison des utilisations du RME et de Q système	32
II.8	Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI [3].	33
II.9	Notes des paramètres du système de classification SMR (Romana,1985) [7].	36
II.10	Les différentes classes de stabilité selon la valeur du SMR.	37
II.11	Les suggestions de soutènement selon IA classe du SMR	37
III.1	Localisation des déblais et remblais importants.	41
III.2	La classification sismique.	46
IV.1	La teneur en eau.	57
IV.2	La masse volumique naturelle.	58
IV.3	Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche	59
IV.4	La masse volumique sèche.	60
IV.5	La masse volumique saturée.	62
IV.6	Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides.	64
IV.7	Résultats de la détermination de l'indice des vides	65
IV.8	Résultats de la détermination de la Porosité.	66
IV.9	Les valeurs de la constante du matériau m de quelques types de roches.	69
IV.10	La résistance de nos échantillons à la compression	73
IV.11	Traitement statistique des valeurs de la Résistance à la compression.	74
IV.12	Classification des roches en fonction de la résistance à la compression [30].	74

IV.13	Classification du massif rocheux de la déviation et de la modernisation de la RN25 en fonction de la résistance à la compression	74
IV.14	Les résultats des essais de la résistance à la traction par flexion trois points.	77
IV.15	Traitement statistique des valeurs de la Résistance à la traction.	78
IV.16	Classification des roches en fonction de la résistance à la traction [30].	78
IV.17	Classification du massif rocheux de la déviation de RN25 en fonction de la résistance à la traction.	78
V.1	Critère d'estimation de la résistance de la roche.	80
V.2	Degrés d'altération de la roche.	81
V.3	Mesure de l'orientation des discontinuités	83
V.4	Mesure de l'orientation des discontinuités	85
V.5	Mesure de l'orientation des discontinuités	87
V.6	RQD des différents massifs	88
V.7	Classification RMR Bieniawski (1989) de Grès.	89
V.8	Classification RMR Bieniawski(1989) de micaschiste.	90
V.9	Classification RMR Bieniawski(1989) de Marbre.	91
V.10	Classification RMR Bieniawski(1989) de Gneiss.	92
V.11	Classification RMR du massif rocheux.	92
V.12	Les caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR	93
V.13	Classification Q-système du massif rocheux	93
V.14	Classification GSI du massif rocheux	94
V.15	les directions de la pente de la falaise	95
V.16	Les valeurs du SMR	95
V.17	La différente classe de stabilité par la valeur du SMR	95

Liste des abréviations

AFTES	Association Française des Tunnels de l'Espace Souterrain
C.F.M.R	Comité Français de Mécanique des Roches
RQD	Rock Quality Designation (Degré de fracturation)
JRC	Joint Roughness Coefficient (coefficient de rugosité du joint)
RMR	Rock Mass Rating
Q- système	Mass Quality ou Tunneling Quality Index
GSI	Géologie Strength Index
SMR	Slop Mass Rating
SACSIR	South African Council of Scientific and Industrial Research
NGI	Norwegian Géotechnical Institute
SRF	Stress Reduction Factor

Liste des symboles

E	est
S	Sud
O	Ouest.
N	Nord.
(s)	RDirection.
(d)	Pendage.
(p)	Grand cercle et pole.
σ_1 et σ_2	Les contraintes horizontales.
σ_3	contrainte verticale.
Φ_1	Angle de frottement interne.
C	cohésion ; $[KN/m^2]$.
L	la longueur de levé.
A_1	Résistance en compression uniaxiale de la roche intacte.
A_2	Rock Quality Index (RQD).
A_3	Espacement des diaclases.
A_4	Condition des joints.
A_5	L'état d'infiltration d'eau souterraine.
A_6	Orientation des discontinuités.
J_n	Nombre de familles de joints.
J_r	Indice de rugosité des joints.
J_a	CIndice de l'altération des joints
J_w	Facteur de réduction pour la présence d'eau.
F_1, F_2, F_3	Sont des facteurs d'ajustement l
F_4	facteur de correction.
α_s	Direction des pendages du talus.
α_j	direction des pendages des joints.
β_s	pendage du talus .
β_j	pendage du joints.
W	La teneur en eau.
E	Module de Young ; $[KN /m]$.
ν	coefficient de poisson
M_h	La masse naturelle ; g.
M_s	La masse de matériau sec ; g.
ρ_h	La masse volumique naturelle ; g/cm^3 .
Vt	Le volume de l'échantillon ; cm^3
ρ_d	La masse volumique sèche ; g/cm^3

Liste des symboles

M_r	Masse de la roche; g.
M_{rp}	Masse de la roche paraffinée; g.
M'_{rp}	Masse de la roche paraffinée dans l'eau; g.
ρ_p	Masse de la paraffine; g/cm^3
ρ_w	Masse volumique de l'eau; g/cm^3
ρ_{sat}	La masse volumique saturée; g/cm^3
M_{satr}	Masse de la roche saturée; g.
$M_{satr p}$	Masse de la roche saturée paraffinée à l'air libre; g.
$M_{str'rp}$	Masse de la roche saturée paraffinée dans l'eau; g.
M_1	Masse du pycnomètre vide; g.
M_2	Masse du pycnomètre avec échantillon; g.
M_3	Masse du pycnomètre + eau + échantillon; g.
M_4	Masse du pycnomètre plein d'eau; g.
e	Indice de vides.
n	Porosité.
ϵ	déformation
R_c	La résistance en compression uni axiale.
σ_n	la contrainte normale.
L	longueur que séparent les deux appuis
F	effort (charge) maximale atteinte .
D	diamètre de l'éprouvette
H	Hauteur d'éprouvette .
b	cote de l'éprouvette.
τ	Contrainte de cisaillement.
R_c	La résistance à la compression.
R_t	La résistance à la traction.

Introduction générale

L'étude de stabilité dans les massifs rocheux fracturés, ainsi que la modélisation des ouvrages de génie civil ou de génie minier nécessitent la connaissance des modèles de comportement mécanique de ces derniers tenants compte de l'existence des fractures. Très coûteuses, les méthodes d'estimation directe in-situ des propriétés mécaniques à grande échelle sont remplacées par des méthodes indirectes. Ces dernières estiment, avec plus ou moins de rigueur ou de facilité, les propriétés mécaniques de différentes manières.

Notre étude est basée sur les méthodes de classification empiriques (Bieniawski [1973], Barton et al. [1974], Hoek et Brown [1980] ...), qui déterminent de manière empirique et plutôt qualitative, les propriétés homogénéisées du massif en fonction des propriétés de la matrice rocheuse et de certaines caractéristiques de la fracturation.

Le problème de stabilité des massifs rocheux peut être résolu seulement si on connaît de façon détaillée la structure du site étudié. De ce fait, Les systèmes de classification prennent en considération plusieurs facteurs affectant la stabilité des massifs rocheux. Ces facteurs sont reliés notamment à la résistance de la matrice rocheuse, la présence de l'eau et la description des discontinuités (nombre de familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage). Nous nous intéressons, dans ce qui suit, aux systèmes de classifications quantitatives, nommés également classifications géomécaniques.

Les buts principaux de ces classifications se résument comme suit :

- Estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d'un massif fracturé, en particulier son module de déformation, sa résistance à la compression simple, sa cohésion et son angle de frottement interne.
- Donner des recommandations de soutènement des ouvrages.

Notre mémoire est structuré comme suit :

Chapitre 01 : ce chapitre à pour but d'introduire et de présenter le comportement du massif rocheux ainsi que la discontinuité et son influence sur leur comportements.

Chapitre 02 : ce deuxième chapitre sera consacré à la présentation des différents systèmes de classification notamment : RQD, RMR, Q système, GSI qui donne des classifications géomécaniques largement et qui utilisées dans le domaine de la Mécanique des Roches .

Chapitre 03 : ce troisième chapitre est dédié à la présentation de la zone de notre

étude qui est la déviation de la RN25 touchée par la cuvette du barrage de SOUK EL TLETA dans la wilaya de TIZI OUZOU.

Chapitre 04 : le quatrième chapitre consiste à déterminer les différents paramètres physiques et mécaniques des formations rocheuses des différents massifs.

Chapitre 05 : dans ce dernier chapitre, nous allons déduire les caractérisations et les classifications des massifs rocheux de notre zone d'étude.

Enfin nous présentons une conclusion générale où nous récapitulons les résultats obtenus et présentons les perspectives possibles.

Chapitre I

Structure et comportement d'un massif rocheux

I.1 Introduction

Les massifs rocheux, sont des structures très complexes. Dans ce contexte, nous allons présenter le comportement des massifs rocheux qui sont fortement liés aux réseaux de fracturation qui les affectent et interrompent la continuité physique du milieu sain appelé discontinuités.

L'étude des discontinuités dans un massif rocheux nécessite une analyse statistique, pour pouvoir différencier toutes les familles de discontinuités qui affectent le massif. Chaque famille est alors analysée à part pour déterminer la distribution de ces différentes paramètres géométriques.

I.2 Distinction sol/ roche

Un agrégat naturel de grains minéraux séparables par une action mécanique légère ; comme l'agitation dans l'eau est un sol. Alors que les grains minéraux d'une roche sont liés par des forces de cohésion fortes et permanentes [1]. Le tableau I.1 suivant présente quelques différences n entre les sols et les roches.

Tableau I.1 – La différence entre sol/roche

les sols	les roches
La mécanique des sols est la science qui étudie les sols	la mécanique des roches c'est la discipline qui prend en considération les roches, ceci représente le cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols.
Les sols géo matériaux pulvérisent ou cohésifs mais ne présentant pas en pratique de résistance à la compression simple et la cohésion disparaît par dissolution [1]	Les roches ont une forte cohésion et une résistance à la compression simple supérieure à 10 MPa, mais comporte généralement des surfaces de discontinuités donc la roche à l'échelle d'ingénierie est Discontinue, Inhomogène, Anisotrope, et Non-linéairement Elastique [1].
La règle générale veut que Léon désigne les sols par les terrains de surfaces[2].	par contre les roches sont des terrains profonds[2].

La figure I.1 ci-dessous représente le cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols.

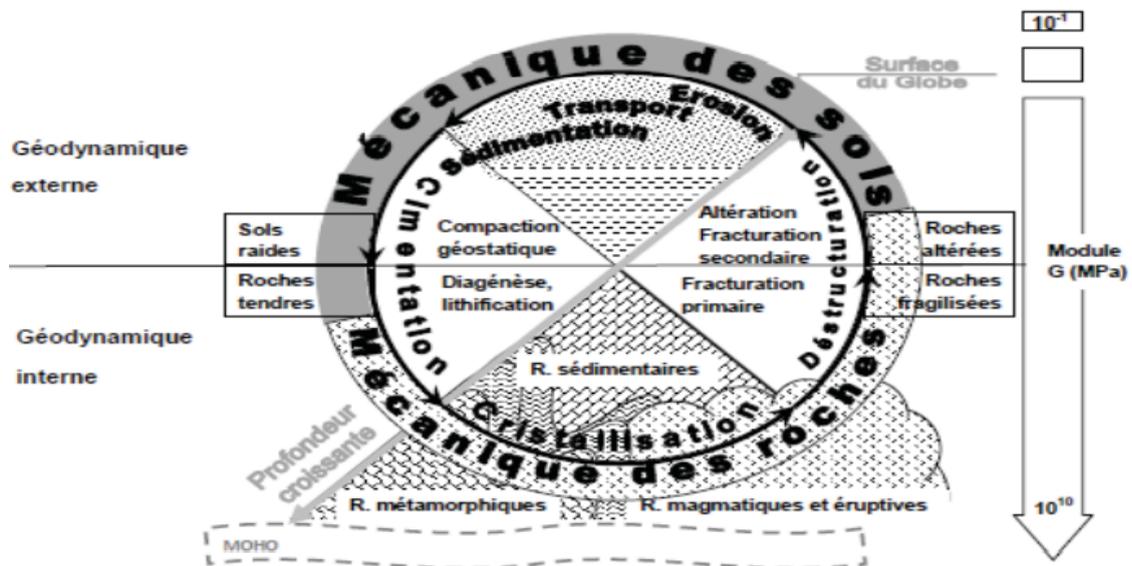


Figure I.1 – Cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols [1].

I.3 Classification géologique des roches

Le nom d'une roche est donné en fonction de sa composition minéralogique, de sa texture et de son mode de formation. Ce dernier conduit à distinguer trois grandes familles de roches Selon l'AFTES [2] :

- **Les roches magmatiques** : résultent du refroidissement et de la solidification de magmas avec ou sans cristallisation. Elles peuvent être formées soit en profondeur, on a alors les roches plutoniques (granites par exemple), soit à la surface et on a alors les roches effusives (basaltes par exemple). Leur distinction se fait grâce à la taille des minéraux constitutifs : les roches plutoniques ont généralement un grain grossier et les effusives un grain fin ;
- **Les roches sédimentaires** : sont formées par la décomposition (mécanique, chimique ou biologique) des matériaux suivis par leur dépôt en couches initialement proches de l'horizontale. Elles affleurent sur 75 % de la surface des continents mais avec des épaisseurs limitées. On peut citer ici les plus répandues comme les grès, les roches argileuses ou les roches carbonatées ;
- **Les roches métamorphiques** : résultent de la recristallisation (accompagnée souvent de déformation) de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous l'effet de l'augmentation de la température et de la pression en profondeur (métamorphisme régional) ou au contact d'autres roches (métamorphisme de contact). Les plus communes sont les schistes et les gneiss où les minéraux apparaissent nettement orientés. Les marbres et les quartzites sont des roches massives, entièrement recristallisées, dans lesquelles l'orientation des minéraux (calcite ou quartz) n'est guère visible à l'œil nu.

La figure I.2 ci-dessous récapitule les trois types des roches cités précédemment et le processus de leurs formations.

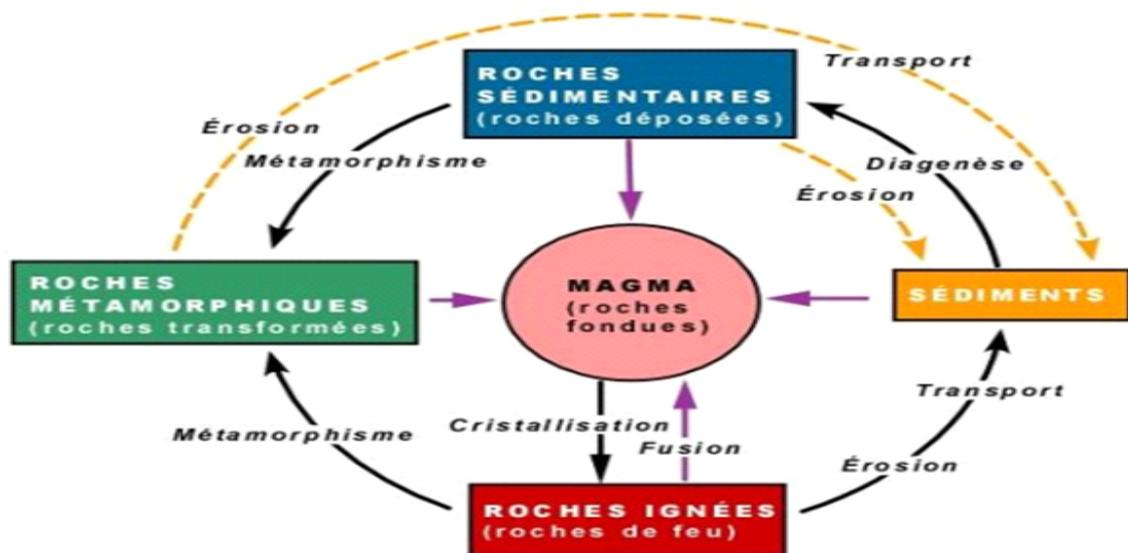


Figure I.2 – Les trois types de roches et le processus qui conduisent à leur formation.

I.4 Structure géométrique des massifs rocheux

I.4.1 Description des massifs rocheux

Les massifs rocheux sont des structures très complexes qui sont Formés d'une juxtaposition de matériaux hétérogènes. Ils sont assimilés à un assemblage de blocs

appelés matrice rocheuse lesquels sont délimités par des discontinuités constituées de fissures, de fractures ou de failles ou encore de limites stratigraphiques [3].

La figure I.3 suivante présente une photo réelle d'un massif rocheux.



Figure I.3 – Structure géométrique d'un massif rocheux des schistes(PK 4+900) de ILLALEN.

Le comportement mécanique des massifs rocheux est un facteur déterminant dans le dimensionnement des ouvrages qui y sont exécutés. Afin de comprendre, expliquer et modéliser ce comportement, il est nécessaire de connaître la structure géométrique ou plus précisément le modèle de distribution géométrique des fractures, ainsi que les propriétés mécaniques de chacune des composantes que sont la matrice rocheuse et les discontinuités[3].

I.4.2 Matrice rocheuse

La matrice rocheuse est définie comme un volume de roche intacte qui possède des propriétés homogènes et non coupé par des discontinuités discrètes et isolées. La matrice rocheuse fait ainsi référence aux blocs non-fracturés situés entre les discontinuités structurales. En fonction des caractéristiques du massif rocheux et de son histoire géologique, la taille de ces blocs peut varier de quelques millimètres à plusieurs mètres.

I.4.3 Aspect géologique

Afin d'étudier le comportement mécanique d'un massif rocheux, il est essentiel de connaître le degré de fracturation ainsi que la répartition des discontinuités dans l'espace. Pour un ensemble de massifs rocheux, les discontinuités constituent une superposition de différentes familles de fractures, disposant chacune des lois de distribution et des caractères statistiques différents. Ces derniers sont souvent déterminés par le biais de la méthode de projection stéréographique [3].

Divers auteurs ont essayé de regrouper les structures géométriques des massifs rocheux dans des catégories bien définies. Cela est illustré dans la figure I.4 pour une série de massifs rocheux. Nous distinguons les massifs à blocs polyédriques, équidimensionnels, prismatiques ou en colonnes, les massifs à bancs minces dont l'épaisseur est moins épaisse que la longueur et les massifs comprenant plusieurs familles de fractures [3].

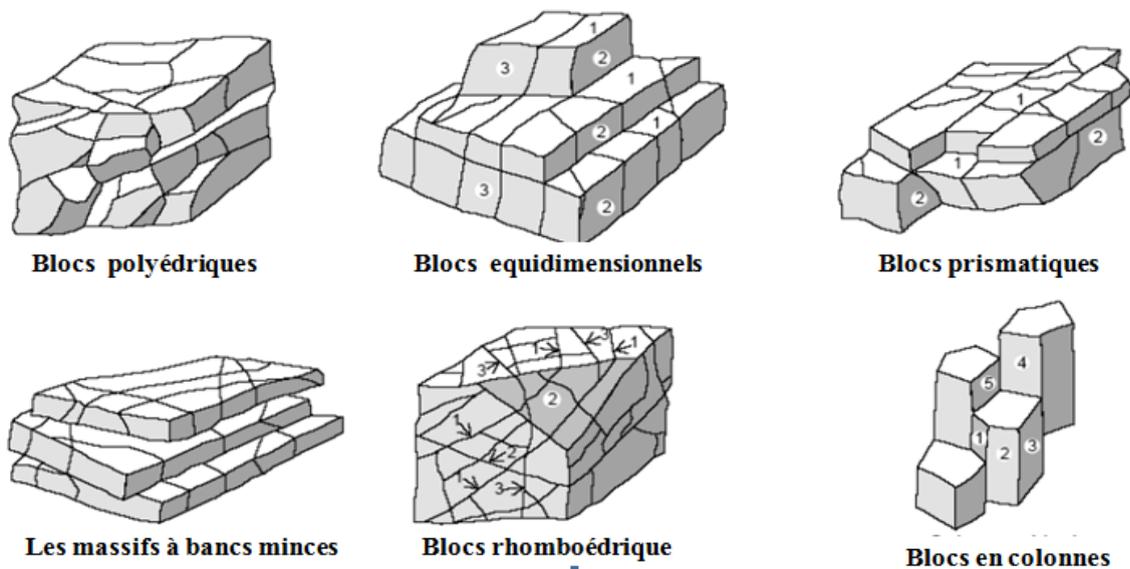


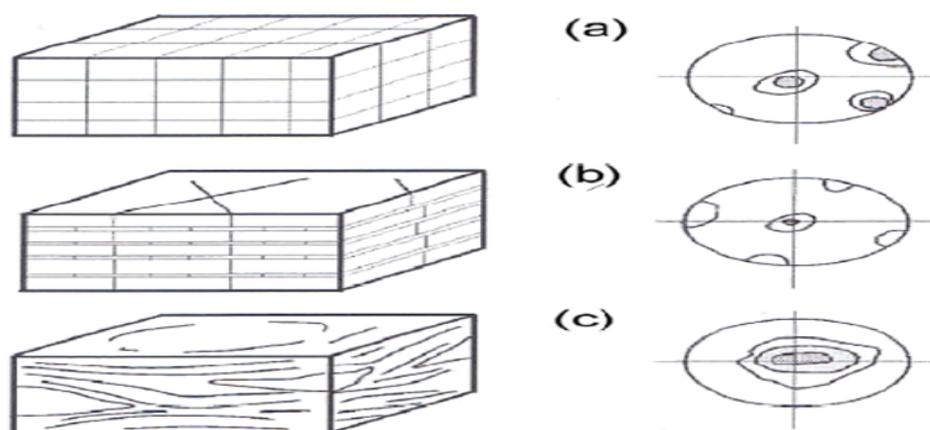
Figure I.4 – Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés [3].

Le Manuel de Mécanique de Roche (CFMR-MMR [2000]) vient appuyer dans ce sens la définition des divers types déjà cités ci-dessous. Parmi plusieurs variantes plus complexes mais moins significatives, trois modèles géométriques principaux sont illustrés dans la figure I.5 [3].

Certains granites ou calcaire massifs formés de blocs parallélépipédiques (Figure I.5-a), révèlent la présence de trois familles de fractures rectangulaires pour lesquelles tous les plans de discontinuités sont continus. Toutefois, il faut noter que cette forme géométrique est très idéalisée. Des solutions analytiques existent déjà pour le calcul des propriétés mécaniques de tels massifs dont certaines seront présentées dans le chapitre suivant.

Le schéma de la Figure I.5-b représente un massif sédimentaire dont l'une des directions prend davantage d'importance et les diaclases perpendiculaires sont moins continues. Cette définition peut correspondre à des calcaires à bancs minces, des alternances de marnes et de calcaires, de grès et de marnes des formations appelées "flyschs" ou des roches schisteuses. Les observations montrent que l'espacement entre les bandes est souvent équivalent à la taille des diaclases ou à sa moitié. Ces types de massifs sont très courants mais non accessibles à des traitements analytiques simples ; le recours à des méthodes d'homogénéisation numériques nous semble très pertinent. La structure de ces massifs est définie géométriquement par un nombre limité de paramètres que nous préciserons dans le paragraphe suivant.

Souvent situées dans des zones tectoniques, les roches écrasées comme les schistes et les brèches de faille présentent une direction d'anisotropie largement dispersée. Dans un tel type de massif (Figure I.5-c), la précision d'un nombre bien défini de familles de fractures n'est pas évidente. Toutefois, des méthodes empiriques approximatives permettent le calcul de leurs propriétés mécaniques.



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

Figure I.5 – Types de structures des massifs rocheux avec les représentations statistiques correspondantes [15].

I.4.4 La discontinuité

L'étude du réseau de discontinuités pose plus de difficultés et nécessite la mise en œuvre de méthodologies spécifiques. Les discontinuités présentes dans le massif doivent être étudiées en détail, au moyen d'analyses statistiques pour prendre en compte la variabilité naturelle de leurs paramètres géométriques et mécaniques.

I.4.4.1 Description des discontinuités

Les discontinuités représentent des types de surface très variés dont l'identification géologique est primordiale, puisqu'elle apporte des informations importantes sur certains de leurs paramètres géométriques et mécaniques.

I.4.4.2 Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux

La présence d'une discontinuité dans un massif rocheux influence sur son comportement. Cette influence peut apparaître comme :

- Des coupe de la roche en plaques, blocs et coins (libres de tomber et de bouger) ;
- agir comme plan de faiblesse pour le glissement ;
- faciliter l'écoulement d'eau et créer des réseaux d'écoulement ;

- entraîner de grandes déformations ;
- un changement de la distribution et l'orientation des contraintes [5].

I.4.4.3 Les familles des discontinuités

Les discontinuités peuvent être de diverse nature, généralement on distingue :

- a) **Les joints stratigraphiques** : ils marquent une discontinuité dans le phénomène de sédimentation des formations sédimentaires. Ils présentent une forte extension et souvent une faible ondulation [4].



Figure I.6 – Les joints stratigraphiques des micaschistes de la zone d'étude (TIZI OUZOU)

- b) **Les diaclases** : elles sont souvent perpendiculaires ou obliques aux joints de stratifications ou à la schistosité. Elles ne présentent pas de trace de mouvement et elles ont une extension limitée [4].



Figure I.7 – Réseau de diaclases dans un banc de grès (Eaglehawk Neck, Tasmania) [6].

- c) **Les fentes ou fractures d'extension** : elles sont formées sous l'effet d'une traction qu'a subi le massif au cours des mouvements tectoniques. Elles sont souvent remplies de cristallisation de calcite ou de quartz [4].
- d) **Les failles** : elles résultent de la rupture d'une zone du massif qui a subi un grand effort de cisaillement. Elles représentent ainsi des discontinuités séparant deux grandes entités du massif. Elles sont caractérisées par une grande extension et souvent un remplissage de matériau broyé et altéré, parfois des recristallisations.



Figure I.8 – Plan failledes grès de la région.

- e) **Les plis** : les plis sont le résultat de la flexion d'une strate rocheuse sous l'effet

d'une force tectonique ou d'un mouvement. Les plis ne sont généralement pas considérés comme éléments du massif rocheux. Ils sont souvent associés à un haut degré de fracturation et à des roches relativement faibles et tendres [5].



Figure I.9 – Microplissement au niveau des schistes de la région d'étude.

- f) **La schistosité** : La schistosité dans les roches métamorphiques, la forte compression a perturbé et transformé l'organisation des minéraux internes. Ceux-ci se sont alignés selon une direction orthogonale à la compression et ont entraîné la formation de plans de rupture préférentiels. L'ardoise, qui est fendue selon cette schistosité, en est une bonne illustration [7]



Figure I.10 – Schistosité au niveau des micaschistes du massif rocheux de la région.

I.4.4.4 Les caractéristiques géométriques des discontinuités

Les caractéristiques géométriques les plus importantes des discontinuités, qui ont une influence sur le comportement du massif rocheux sont :

- a) **Orientation** : La position du plan de discontinuité est décrite par son orientation dans l'espace muni d'un repère ayant un axe parallèle au Nord magnétique comme le montre la figure I.11 ci-dessous. L'orientation est représentée par la direction de la ligne d'intersection du plan de discontinuité et du plan horizontal, et par le sens et l'angle de pendage de la ligne de plus grande pente [4].

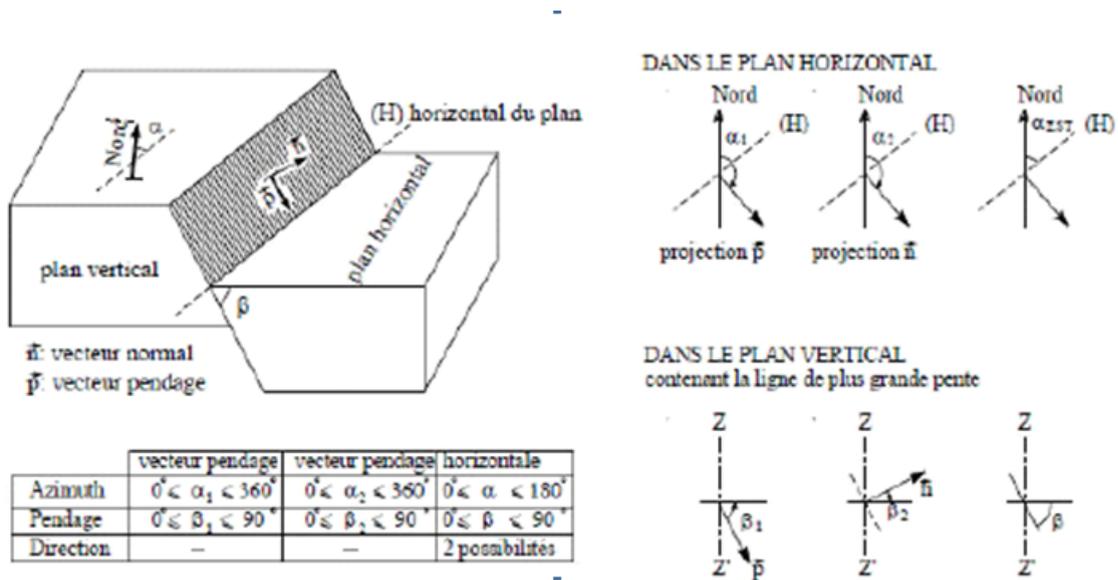


Figure I.11 – le vecteur perpendiculaire au plan de discontinuité [4].

- le vecteur perpendiculaire au plan de discontinuité :

En tout point l'orientation d'un plan dans l'espace est définie par deux angles, respectivement par rapport au nord géographique et à la verticale, mesuré avec une boussole et un clinomètre. la figure I.12 suivante présente des photos prises sur le terrain lors des mesures de l'orientation du plan de discontinuité [4].



Figure I.12 – Mesures de l'orientation du plan de discontinuité.

- les lignes de niveau du plan définissent la direction ou azimuth du plan (anglais Strike), compté de 0 à 180 degrés en tournant vers l'Est.
- les lignes de plus grandes pentes du plan définissent le pendage (anglais Dip), compté de 0 pour un plan horizontal à 90 degrés pour un plan vertical, assorti de l'indication du coté vers lequel le plan est incliné [8].

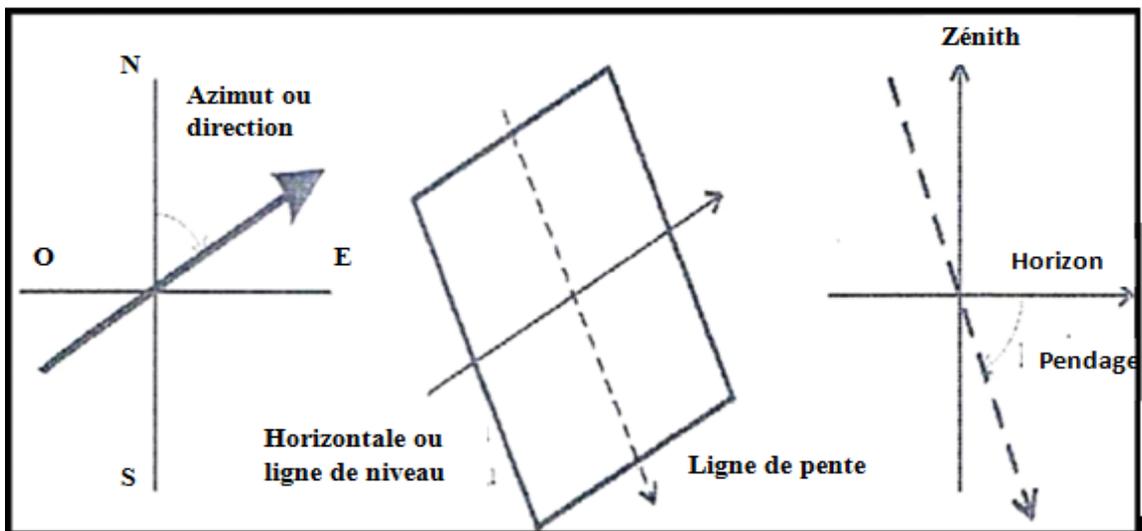


Figure I.13 – Orientation d'une direction de plan dans l'espace, au centre en perspective cavalière, par la direction (ou azimuth) de ses lignes de niveau (vue en plan, à gauche), et le pendage de ses lignes de pente (en coupe, à droite) [8].

La projection stéréographique des discontinuités permet de faire un classement des en familles directionnelles. La représentation des plans se fait habituellement en utilisant les diagrammes polaires. On considère une sphère dont un diamètre du plan équatorial est la direction du plan considéré et l'autre diamètre est orienté Nord - Sud. Sur l'hémisphère inférieur, se trace le grand

cercle, intersection du plan avec la surface hémisphérique, et le pôle du plan, c'est-à-dire le point de percée sur l'hémisphère de la normale au plan passant par le centre de la sphère.

Pour effectuer les projections, on peut utiliser le canevas de Wulf (qui correspond à la projection stéréographique). Mais en général, on utilise le canevas de Schmidt (Lambert) qui est une projection équilatérale et qui n'introduit donc pas de distorsion quant à la densité des pôles.

La notation "classique" donnant l'azimut de la direction en degrés (chiffre <180) et le secteur (N, E, S ou O) vers lequel "pend" le plan.

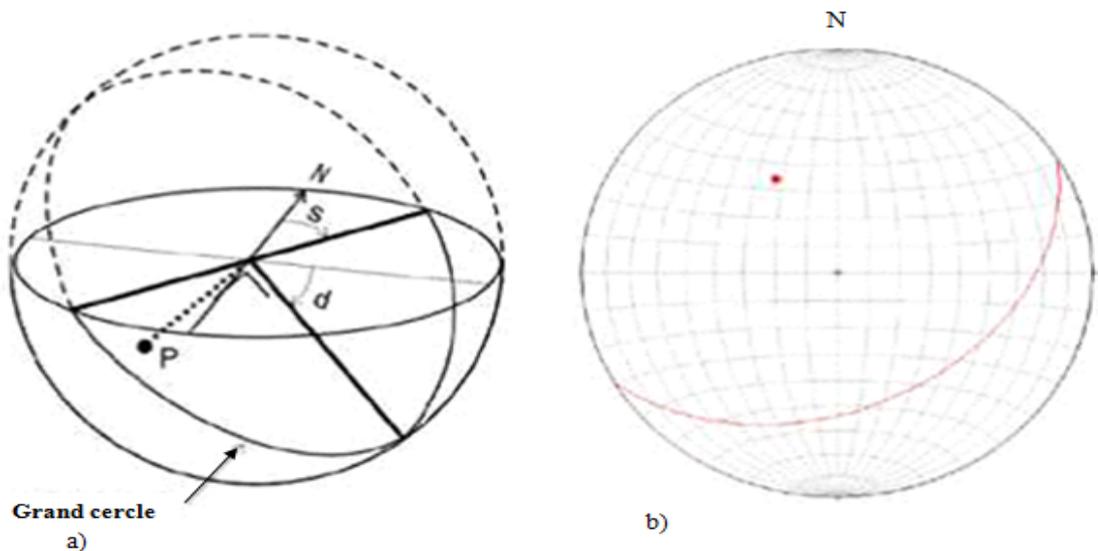


Figure I.14 – Représentation stéréographique [9].

- a) : direction (S), pendage (d), grand cercle et pôle (P) ;
- b) : canevas de Schmidt. Sur le plan équatorial figurent les projections des grands cercles et des petits cercles tracés sur l'hémisphère inférieur.

La représentation stéréographique des failles nous aide à déterminer les contraintes principales agissant sur le massif qui peuvent provoquer la rupture de ce dernier.

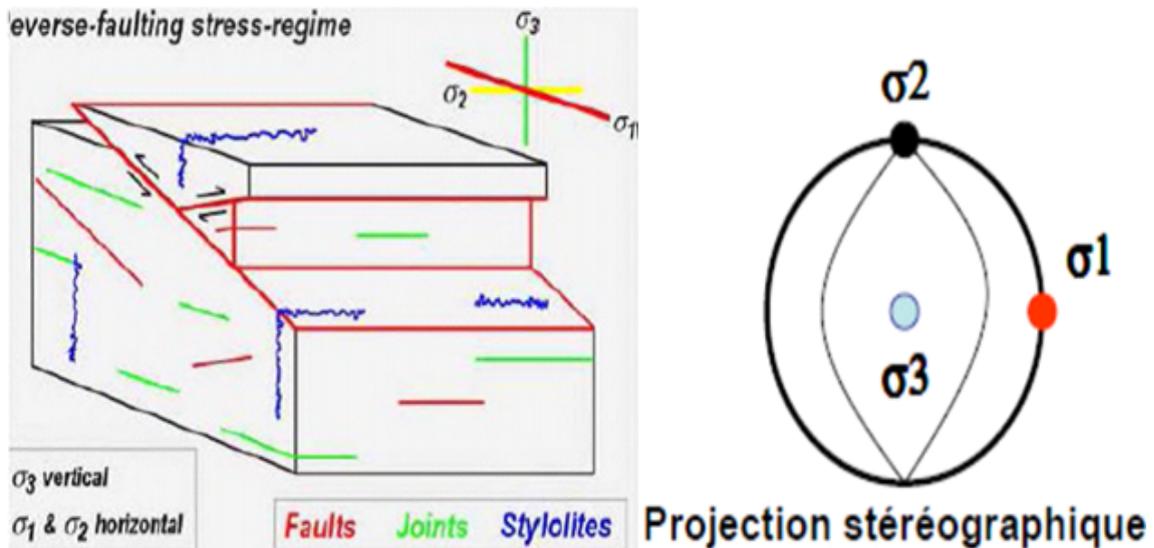


Figure I.15 – Projection stéréographique d'une faille inverse [10].

La détermination des contraintes verticale σ_3 et horizontales σ_1 et σ_2 suite à cette projection stéréographique des failles permettra d'avoir la contrainte normale ainsi qu'à la résistance au cisaillement afin de tracer le cercle de Mohr qui donne l'angle de frottement interne ϕ , la cohésion C et le domaine de rupture du massif [10].

- b) **Extension** : L'extension caractérise la dimension de la discontinuité dans l'espace. Ce paramètre est difficile à évaluer car sur le terrain on n'observe pas la totalité de la discontinuité mais uniquement sa trace sur un parement [4]. L'extension peut être estimée à partir de la distribution de la longueur de trace de la discontinuité. La distribution de la longueur de trace peut suivre une loi exponentielle ou log-normale.
- c) **Espacement et densité** : L'espacement représente la distance moyenne séparant deux discontinuités d'une même famille. La densité définit le nombre de discontinuités, d'une même famille, par unité de volume ou de surface ou de longueur. Ces paramètres sont liés souvent, la densité est estimée à partir de l'espacement puisque ce dernier est facile à mesurer en pratique. Ces paramètres sont essentiels car ils donnent une idée de la fracturation moyenne du massif. La distribution de l'espacement est souvent exponentielle [4].

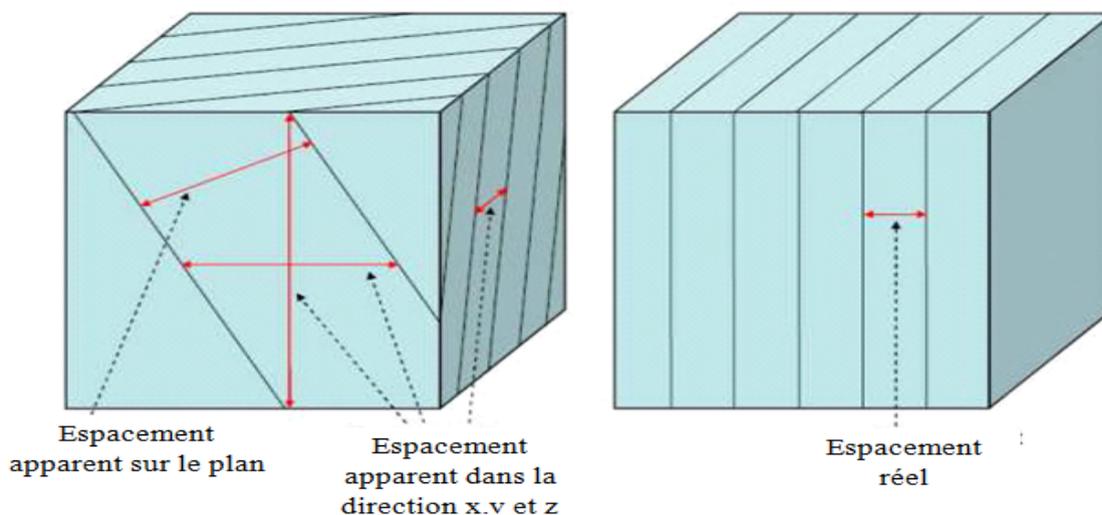


Figure I.16 – Mesure de l'espacement [11].

On décrit l'espacement selon les mesures des discontinuités :

Tableau I.2 – Description de l'espacement des discontinuités [11].

Espacement des discontinuités (m)	Description
<0,02	Espacement extrêmement étroit
0,02-0,06	Espacement très étroit
0,06-0,2	Espacement étroit
0,2-0,6	Espacement modéré
0,6-2	Espacement large
2-6	Espacement très large
>6	Espacement extrêmement large

d) **La fréquence des discontinuités (λ)** : Déterminée par comptage sur le terrain, par exemple en mesurant l'espacement des le long d'une ou de plusieurs lignes tracées perpendiculairement à leur direction ou selon des lignes traversant au mieux (statistiquement) les différentes familles de joints [12].

Si, le long de la ligne du levé, N est le nombre de discontinuités et L la longueur du levé, la fréquence (λ) des discontinuités vaut $\lambda = N/L$ et l'espacement moyen (x) vaut $X = L/N$.

On déduit que la fréquence est simplement l'inverse de l'espacement moyen des discontinuités. La fréquence et l'espacement moyen dépendent de l'orientation de la ligne de levé par rapport à celle des discontinuités [12].

La figure I.17 ci-dessous montre la méthode de mesure de la fréquence des discontinuités sur le terrain .

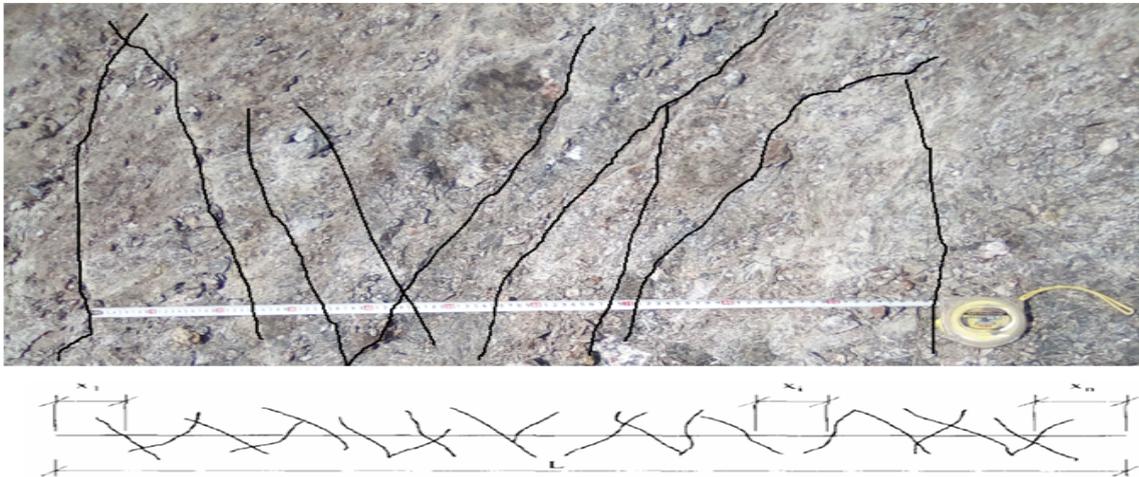


Figure I.17 – Mesure de la fréquence des discontinuités.

- e) **Degré de fracturation** : lorsque des forages carottés sont disponibles, cette qualité est désignée par RQD (Rock Quality Désignation) (Deere, 1988). Cet indice est égal au rapport de la somme des longueurs des éléments de carottes du forage dont la longueur est au moins égale à 10 cm à la longueur totale de la passe carottée.
- f) **Ouverture et matériaux de remplissage** : Il est très rare que les deux surfaces d'une discontinuité soient en contact, généralement il existe un espace entre elles appelé ouverture qu'elle soit remplie d'air, d'eau (joint ouvert) ou avec des matériaux de remplissage [11]. la figure I.18 suivante présente un schéma explicatif d'une fissure ouverte et remplie entre deux surfaces.

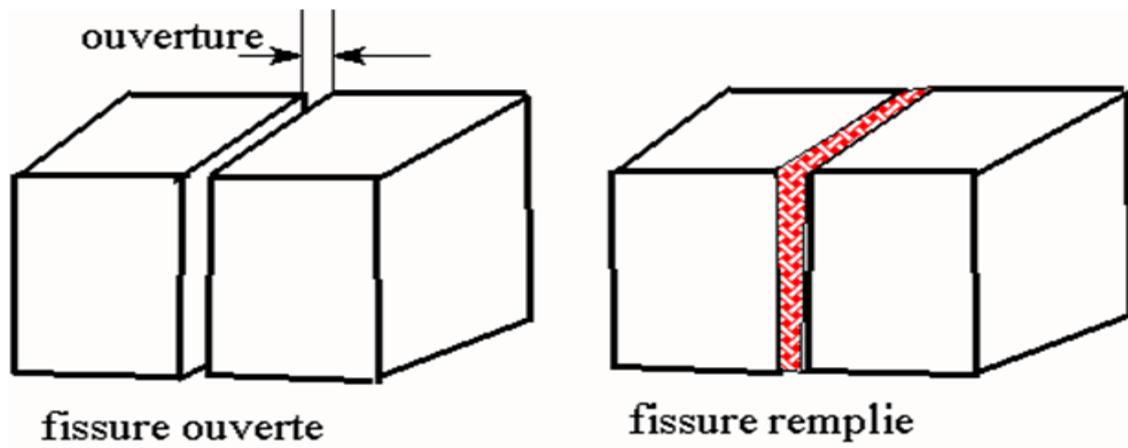


Figure I.18 – Fissure ouverte et remplie [14].

En général, les propriétés du matériel de remplissage affectent la résistance au cisaillement, la déformabilité et la perméabilité des discontinuités. On peut distinguer :

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

En fonction de la taille d'ouverture on peut classer les discontinuités dans le tableau suivant :

Tableau I.3 – Classification d'ouverture des discontinuités [11].

La taille de l'ouverture	Description
<0,1 millimètre	Très étroite
0,1-0,25 millimètre	Étroite
0,25-0,5 millimètre	Partiellement ouvert
0,5-2,5 millimètre	Ouvert
2,5-10 millimètre	Ouvert
1-10 centimètre	Très largement ouvert
10-100 centimètre	Extrêmement ouvert
>1 mètre	Caverneux

I.4.4.5 Les Caractéristiques mécaniques des discontinuités

Le comportement mécanique d'une discontinuité (ou d'un joint) est essentiellement influencé par sa rugosité, le degré d'altération des épontes et le remplissage éventuel.

- a) **Altération** : L'altération des épontes d'une discontinuité est caractérisée par la résistance à la compression simple, noté JCS (Joint Wall Compressive Strength). Comparée à la résistance en compression simple de la roche saine (σ_c il faut le corrigé world), elle permet de donner une appréciation sur le degré d'altération des épontes de la discontinuité et, en conséquence, sur le pouvoir de mobiliser ou non la dilatance.

Le JCS peut être déterminé directement par un essai de compression simple au laboratoire ou indirectement in situ, par le marteau de Schmidt.

- b) **Rugosité** : La rugosité représente le taux d'ondulation de la surface de contact du joint. Elle est difficile à quantifier et elle est fonction de l'échelle d'analyse. En mécanique des roches la rugosité est souvent représentée par le coefficient de rugosité du joint JRC (Joint Roughness Coefficient).

Le JRC permet de déterminer la variation de l'angle dilatance et de l'angle de frottement mobilisé (Barton 1985). Il peut être estimé (grossoirement) à partir d'une charte établie par Barton, en calant le profil du joint sur l'un des éléments de la charte ; ou déterminé par un essai de basculement en mesurant l'angle de frottement du joint.

Il varie de 0 pour les joints lisses à 20 pour des joints très rugueux. Il varie en fonction de la déformation du joint. Plus les aspérités du joint sont cisailées, plus le JRC est faible. La figure I.19 ci-dessous présente les profils de référence

et des chiffres clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC).

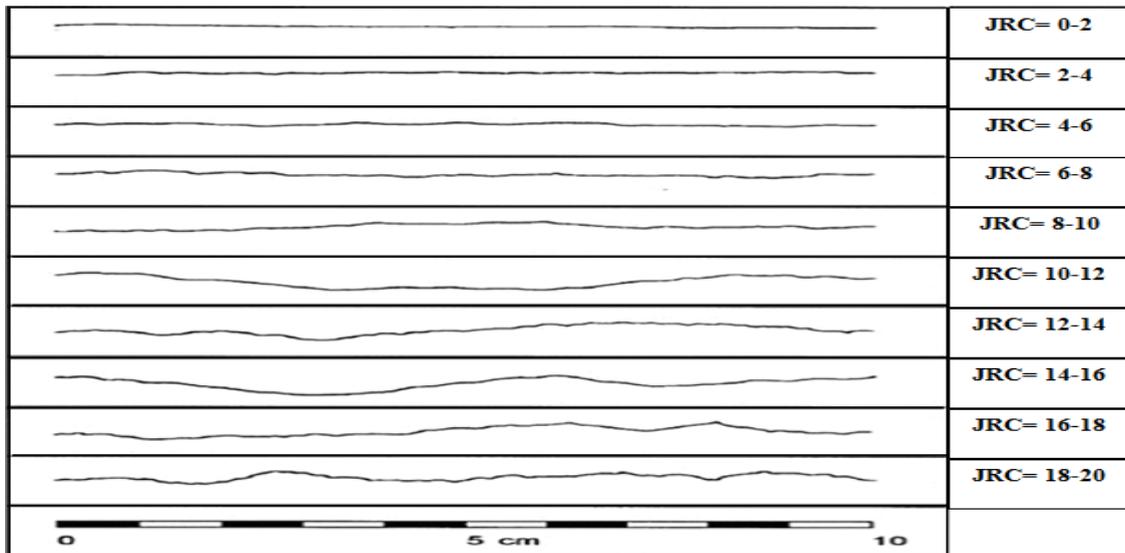


Figure I.19 – Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC) [12].

c) **Épaisseur et remplissage des joints :**

L'épaisseur du joint est définie d'un point de vue mécanique, joue aussi un rôle important, surtout en compression. Elle est liée à l'ouverture du joint, mais prend en compte également le caractère altéré et déformable des épontes.

Ce paramètre est certes dépendant du JRC et du JCS, mais il faut aussi tenir compte du remplissage du joint et de l'état de contrainte en place, et toute mesure in-situ doit être prise avec prudence (joint ouvert...).

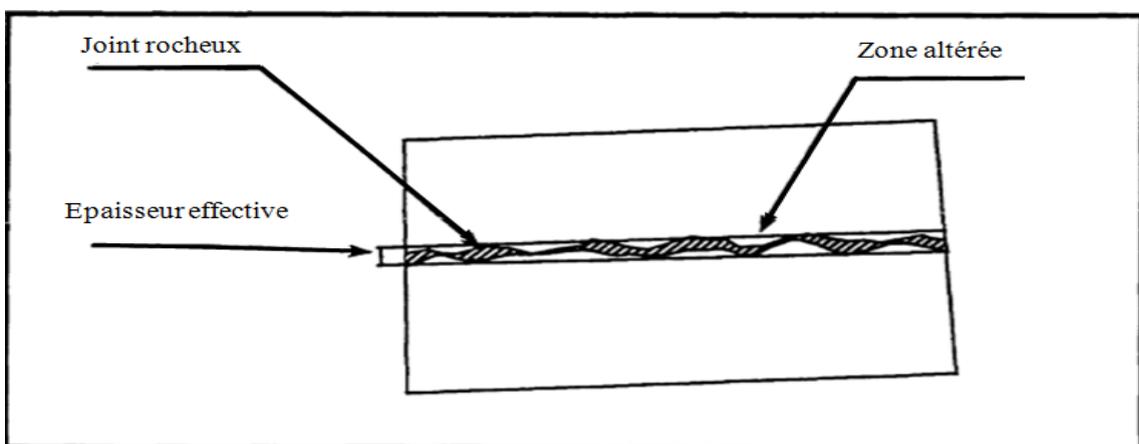


Figure I.20 – Épaisseur déformable d'un joint.

d) **Représentation dans l'espace :** Il est difficile de connaître exactement la forme d'une discontinuité dans l'espace. On ne dispose uniquement que de sa

trace sur un ou plusieurs plans.

Des modèles ont été créés pour représenter les discontinuités dans l'espace en s'appuyant sur les paramètres géométriques relevés sur des plans d'observation. Ceci permet de réaliser des simulations mathématiques des discontinuités du massif rocheux, à partir des lois de distributions de leurs paramètres géométriques. Des études d'écoulement de fluide, ou comportement mécanique sont alors entreprises sur les domaines de simulation correspondants. Parmi les modèles de représentation de discontinuités on peut citer le modèle polygonal (Veneziano 1978 et Dershowitz 1984) et le modèle de disque (Baecher 1977 et Long 1985).

- **Le modèle polygonal :**

Dans ce modèle les discontinuités sont représentées par des polygones. Une simulation basée sur ce modèle s'obtient par une réalisation d'un processus aléatoire de plans en trois dimensions. Chaque plan est découpé en polygones par des lignes générées suivant une loi spécifiée, et seule une partie de ces polygones est choisie, par un processus aléatoire, pour représenter les discontinuités du massif.

le schéma illustré dans la figure I.21 présente le modèle polygonale des discontinuités.

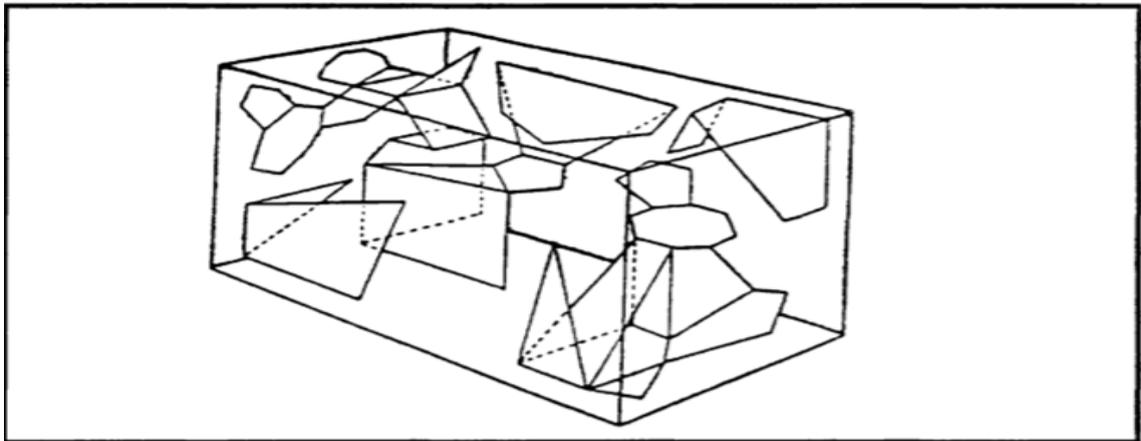


Figure I.21 – le modèle polygonale (Dershowitz 1984).

- **Le modèle disque :** Dans ce cas les discontinuités sont présentées par des disques. Ce modèle, très idéalisé, a été introduit surtout pour permettre un traitement mathématique facile.

La réalisation d'une simulation basée sur ce modèle consiste à placer aléatoirement les centres des disques dans le domaine de simulation. Et pour chaque centre est affecté aléatoirement une orientation, un pendage et une extension (diamètre du disque), suivant la loi de la distribution adoptée.

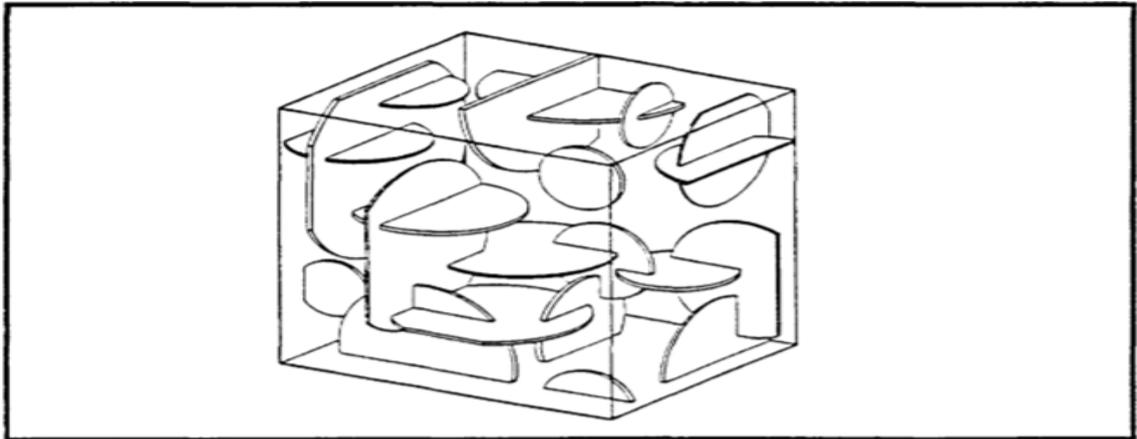


Figure I.22 – le modèle disque (Long 1985).

I.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le comportement mécanique ainsi que la structure géométrique des massifs rocheux où nous avons focalisé sur la structure caractérisée par la présence des discontinuités. Cette dernière peut avoir une grande influence sur le comportement et la structure du massif.

La nature discontinue de ces milieux rend leur caractérisation géométrique elle-même compliquée. L'étude du comportement mécanique des massifs rocheux ne sont donc pas seulement basés sur la caractérisation de la roche saine, mais on doit se baser sur la caractérisation géométrique des discontinuités

Chapitre II

Les systèmes de classification des massifs rocheux

II.1 Introduction

La caractérisation du massif rocheux peut se faire soit directement grâce aux résultats d'essais in situ adéquats, soit de manière indirecte par l'intermédiaire de méthodes empiriques (classification, corrélations). Les classifications géologiques sont généralement utilisées afin d'assigner une valeur numérique pour définir les caractéristiques et propriétés du massif rocheux afin d'estimer le comportement de l'excavation et de permettre un design du support de terrain adéquat et sécuritaire. La force principale des classifications provient des recommandations simples, rapides et peu coûteuses qu'elles produisent, basées sur une vaste base de données de cas répertoriés.

Nous présentons dans ce chapitre, dans un premier lieu les types de classification existante, puis nous exposons quatre classifications géomécaniques largement utilisées dans le domaine de la Mécanique des Roches (RQD, RMR, Q système, GSI) ainsi que les SMR qui déterminent la stabilité des pentes et suggère des soutènements selon leurs classes, Les avantages et les limitations de chacune de ces dernières sont ensuite détaillés.

Nous nous intéressons, dans ce qui suit, aux systèmes de classifications quantitatives, nommés également classifications géomécaniques.

II.2 Les buts des systèmes de classification des massifs rocheux

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

très médiocre. Les buts principaux de ces classifications se résument comme suit :

- Estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d'un massif fracturé, en particulier son module de déformation, sa résistance à la compression simple, sa cohésion et son angle de frottement interne.

- Estimer le temps Durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement (stand-up time). C'est un indice très essentiel dans la détermination de la portée d'excavation.
- Donner des recommandations de soutènement des ouvrages [3].

II.3 Avantages des d'utilisation les systèmes de classifications

Il existe plusieurs avantages pour quantifier le massif rocheux. Singh et Goel (1999) énumèrent les bénéfices suivants :

- Produit une meilleure communication entre la géologie, l'ingénierie et la production ;
- Les expériences, les observations et le jugement de l'ingénieur sont corrélés plus efficacement par un système de classification quantifiable ;
- Les ingénieurs préfèrent des chiffres au lieu de description pour l'évaluation du massif rocheux ;
- Les classifications permettent de mieux organiser les connaissances.

II.4 Les différents systèmes de classification

Les classifications des massifs rocheux fracturés continuent a évoluer plus d'un siècle leur utilisation a un intérêt considérable lors de l'étude de faisabilité et 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 classifications prennent en considération plusieurs facteurs affectant la stabilité des massifs. Ces facteurs sont reliés notamment a la résistance de la matrice rocheuse, la présence de l'eau et la description des discontinuités (nombre de familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage ...). Nous nous intéressons, dans ce qui suit, aux systèmes de classifications quantitatives, nommés également classifications géomécaniques.

le tableau II.1 suivant énumère les systèmes de classification les plus anciens.

Tableau II.1 – Les anciens Systèmes de classification des massifs rocheux .

Système de classification	Référence	Pays d'origine	Applications
Rock Loads	Terzaghi, 1946	É.-U.A	Tunnels avec support en acier
Stand-up time	Lauffer, 1958	Autriche	Tunnels
New Austrian tunneling method(NATM)	Rabcewicz, 1964/1965, 1975	Autriche	Tunnels
Rock Quality Designation	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, 1989	Afrique du Sud ;É.-U.A	Tunnels, mines,SLOPES, fondations
Extensions dusystème 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	-Afrique du Sud -Inde -É.-U.A. -Portugal -Espagne -É.-U.A. -Espagne -É.-U.A.	-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
Rock Mass Strength-Size	Franklin, 1975	Canada	Tunnels
Basic geotechnical description	ISRM, 1981 a	-	Communication
Ramamurthy & Aurora Classification (RAC)	Ramamurthy et Aurora, 1993	Inde	Roche intacte
Geological strength index (GSI)	Hoek et al. 1995	Canada	Mines
Rock Mass Number (N)	Goel et al. 1996	Inde	Meilleure corrélation entre systèmes RMR-Q
Rock mass index system (RMi)	Palmström, 1995	Norvège	Tunnels, TBM, mines

Les systèmes le plus utilisés sont :

- RQD (Rock Quality Designation) d'après Deer (1967) ;
- RMR (Rock Mass Rating) d'après Bieniawski (1976) ;
- Q-system (Barton, 1974) ;
- GSI (Geological Strength Index) d'après Hoek- Brown (1995) ;
- SMR (Slop Mass Rating) d'après Romana (1985).

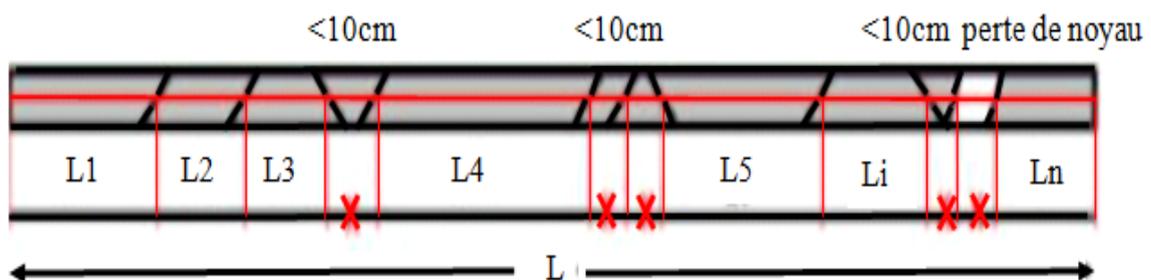
Fondés sur des philosophies différentes, ces systèmes caractérisent la masse rocheuse de manière distincte l'une de l'autre. Essentiellement, ils caractérisent différents paramètres reliés au comportement mécanique du massif rocheux. Avant l'utilisation d'un système de classification particulier, il est primordial de bien saisir les subtilités que présente chacun afin d'assurer la compatibilité avec le massif rocheux étudié.

II.4.1 Le système du RQD (Rock Quality Designation)

Deere (1964) propose un paramètre évaluant la qualité du roc de la masse rocheuse selon un index intitulé RQD (Rock Quality Designation). Obtenu à partir de carotte de forage géologique, cet indice représente l'évaluation du pourcentage des carottes récupérées sur une longueur de course précise. Basée sur un procédé qualitatif ; seule la somme des longueurs de morceaux de plus de 10 Cm est conservée et cette somme est divisée par la longueur de course de carotte de forage [19].

Ce paramètre est défini comme suit [19] :

$$RQD = \frac{\sum \text{longueurs de pièces} > 100\text{mm}}{\text{longueur totale de la course}} * 100$$



Deere et al. (1967) affirment que le RQD s'avère utile pour déterminer le facteur de réduction du module de déformation de la roche intacte à la masse rocheuse. La relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif peut être établie selon la proposition de Deere (1968) et elle est présentée dans le tableau II.2 ci-dessous.

Tableau II.2 – Classification d’ouverture des discontinuités [11].

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

Lorsque aucun forage géologique n’est disponible, cette corrélation s’avère très utile. La méthode suivante est proposée pour un massif rocheux sans remplissage d’argile. Proposé par Palmström (1982), l’indice RQD peut être indirectement déterminé par le nombre de joints/discontinuités par unité de volume pour définir la somme volumétrique des joints (J_v) caractérisant la surface du massif rocheux :

$$RQD = 115 - .3.3J_v$$

pour $J_v < 4.5$ le RQD = 100.

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

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

II.4.1.1 Les limites du système RQD

La simplicité du système RQD a non seulement promu son utilisation importante comme outil, mais aussi l’apport de plusieurs critiques. Voici une série de limites trouvées dans la littérature [20] :

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

une carotte de forage, cette classification est en outre limitée par la qualité du forage.

II.4.2 Le système RMR (Rock Mass Rating)

Le RMR (Rock Mass Rating) a été développée par Bieniawski [1973] au South African Council of Scientific and Industrial Research (SACSIR), afin de permettre l'estimation quantitative des caractéristiques du massif rocheux et des soutènements nécessaires à sa stabilité. Cette approche est basée au départ sur l'étude de plus 300 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.

la figure II.1 suivante illustre graphiquement graphique des paramètres de caractérisation du RMR [3].

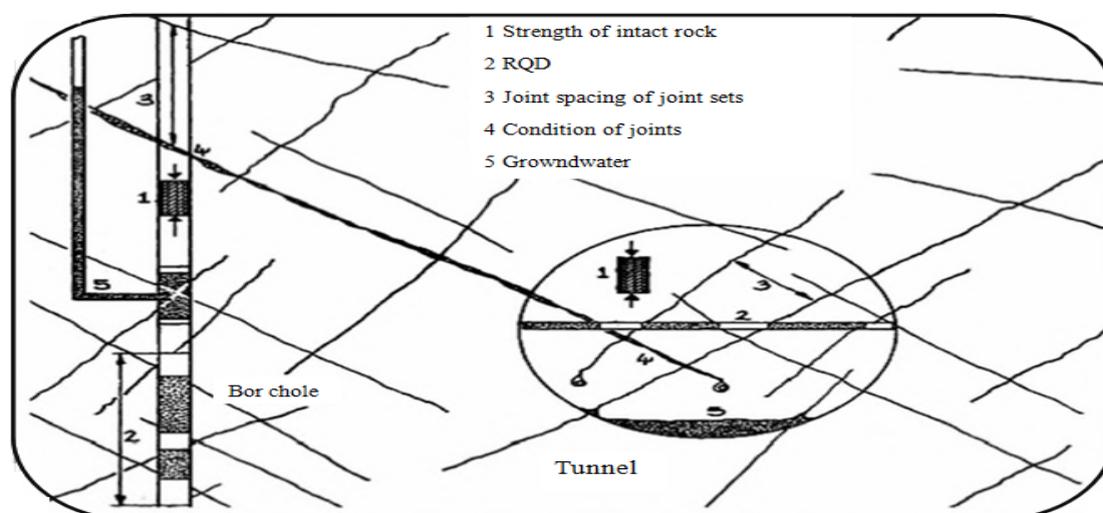


Figure II.1 – graphique des paramètres de caractérisation du RMR [3].

L'indice RMR est la somme de cinq paramètres caractérisant le massif et d'une note d'ajustement dépendant de l'orientation des discontinuités (azimut et pendage). Le RMR été calculé pour varier dans la gamme 0 à 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 [2].

avec :

- A1 (Strength of intact rock material) : la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse est obtenue, soit par procédure d'écrasement d'un échantillon, soit par procédure de chargement ponctuel (note : de 0 à 15).
- A2 (Rock Quality Designation RQD, 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).

- A3 (Spacing of discontinuities) : dans le cas de plusieurs familles de fractures le minimum des notes attribuées à l'espacement des fractures est considéré (note : de 5 à 20).
- A4 (Conditions of discontinuities) : cet indice caractérise l'extension, l'ouverture, la rugosité, le matériau de remplissage et l'altération des épontes des discontinuités (note : de 0 à 30).
- A5 (Groundwater conditions) : Il est en rapport avec les conditions hydrogéologiques et consiste à réaliser des mesures de flux d'eau ou de pressions interstitielles des joints (note : de 0 à 15).
- B (Adjustement for joint orientation) : c'est un facteur correctif qui est en rapport avec l'effet de l'azimut et du pendage des familles de discontinuités sur la stabilité de l'ouvrage (note : de -12 à 12 pour les tunnels, de -25 à 0 pour les fondations et de -60 à 0 pour les talus).

Les sommes des cinq premiers indices caractérisent le RMR de base. Quant aux travaux souterrains, il faut ajouter l'effet du facteur correctif. Le RMR89 s'écrit alors [21] :

$$RMR89 = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B$$

Chacun des paramètres précédents aura une note, la somme des notes, après avoir été ajustée par une note relative à l'orientation (Tableau II.3), nous donne une appréciation générale de la qualité du rocher (Tableau II.4).

La version 1976 du système de classification (RMR76) indique que l'utilisation du RMR se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants et leurs pondérations ; avec :

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

le RMR76 est donc calculé comme suit :

$$RMR76 = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6$$

Tableau II.3 – Classification RMR(Bieniawski).

Classification des paramètres et notes									
Paramètre		Coefficient							
1	Résistance de la roche	Indice franklin	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Indice franklin non utilisable		
		Résistance à la compression	>250MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	2-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Note	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25M-50%	<25%		
	Note		20	17	13	8	3		
3	Espacement des discontinuités		< 2m	0.6-2 m	200-600 m	60-200 m	<60mm		
	Note		20	15	10	8	5		
4	Nature des discontinuités		Surface très rugueuses non continues Eponte en contact Eponte non altérées	Surface légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Eponte non altérées	Surface légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Eponte altérées	Surface lustrées ou remplissage < 5mm ou joint ouvert 1 à 5 mm Joints continus	Remplissage mou > 5 mm Joints ouverts > 5 mm Joint continus		
	Note		30	25	20	10	0		
5	Condition hydraulique	Débit sur 10 m	Aucune venue d'eau	< 10	10-25	25-125	> 125		
		Pression d'eau contrainte	0	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		Hydrogéologie	Complètement sec	Suintement	Suintement	Pressions d'eau modérée	Problème sérieux de venues d'eau		
	Note		15	10	7	4	0		

Tableau II.4 – Les classes de roche suivant la classification de Z.BIENIAWSKI après application de la note d’ajustement

Note globale	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Classe de rocher et description	I Très bon rochet	II Bon rochet	III Rochet moyen	IV Rochet médiocre	V Rochet très médiocre
Temps de tenue Moyen	10 ans pour 5m de portée	6 mois pour 4m de portée	1 semaine pour 3m de portée	5 heures pour 1.5m de portée	10mn pour 0.5 m de Portée
Cohésion du massif (C_m), KPa	> 300	200-300	150-200	100-150	< 100
Angle de friction du massif (φ_m)	> 45°	40°- 45°	35°- 40°	30°- 35°	< 30°

II.4.2.1 Estimation des caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR

Plusieurs auteurs ont proposé des relations entre les paramètres mécaniques du massif rocheux et la valeur du RMR. Nous avons retenu les relations suivantes qui permettent d’estimer une cohésion et un angle de frottement, ainsi qu’un module de Young [22] :

a) **La cohésion :**

notée C en (Kpa), avec :

$$C \simeq 5RMR \text{ (Beniawski, 1979, cité par Beniawski, 1989)}$$

b) **L’angle de frottement :**

notée φ en ($^{\circ}$), avec :

$$\varphi \simeq 0,5RMR + 8,3 \pm 7,2 \text{ (Trunck et Hönish,1989, cité par Beniawski, 1989).}$$

c) **Le module de Young :**

noté E en (Gpa), avec :

$$E \simeq 10^{(RMR-10)/40} \text{ Serafim \& Pereira, 1983, cité par Beniawski, 1989)}$$

Stille et al (1982,) ont proposé d’utiliser les équivalences du tableau II.5 pour estimer la résistance à la compression simple du massif rocheux.

Tableau II.5 – Relations entre RMR sec et la résistance à la compression simple d’après Stille et al. (1982).

RMR sec	RMR sec=A1+A2+A3+A4				
	< 21	21-40	41-60	61-80	>80
Rc (MPa)	0,5	2,5	5	2	30

II.4.2.2 Limitations du système de classification RMR

Étant donné que le système de classification RMR est initialement développé pour le domaine civil. De ce fait, ce système est limité dans le domaine minier. voici quelques limitations pertinentes où l’ingénieur doit questionner la validité lors de l’évaluation d’un massif rocheux :

- Le paramètre de l’orientation des discontinuités (B) est ignoré. Le système conservé redevient le RMR de base. Cette correction est apportée principalement pour ignorer les conditions environnementales résultant en une classification dépendante du massif rocheux uniquement ;
- Les contraintes sont ignorées comme paramètre du système RMR. Bieniawski, 1989 estime le système RMR adéquat pour un projet civil jusqu’à une contrainte verticale de 25 MPa. Souvent dans le domaine minier, les mines souterraines exploitent à des niveaux de contraintes supérieurs ;
- Cette classification ne prend pas en considération l’état de contrainte in-situ ni la rugosité des fractures et l’angle de frottement du matériau de remplissage, les roches gonflantes n’y sont pas non plus traitées ;
- L’application de cette classification est limitée aux cas de massifs dont la matrice a une bonne résistance et dont le comportement est régi par les discontinuités.
- La validité sur la compatibilité de nouvelle version du système RMR par rapport à l’utilité des anciennes directives de design empirique est questionnable (Milne et Hadjigeorgiou, 2000).

Néanmoins, le RMR reste un outil puissant, lorsque bien utilisé. Ce système a réussi à identifier des paramètres géologiques quasi universels permettant d’enregistrer rapidement et simplement toute expérience d’excavations dans la masse rocheuse. De la sorte, l’application du système de classification RMR s’étend avec succès à la conception de fondation, de stabilité de talus, l’évaluation du décapage, ainsi que de nombreuses applications minières [20].

II.5 Le système Q

L’indice Q est le paramètre central d’une méthode développée par le NGI (Norwegian Geotechnical Institute) en 1974, à partir des données issues de la réalisation

de plus de 200 tunnels, majoritairement situés dans le cristallin du bouclier scandinave à contraintes description des massifs rocheux.

L'indice de qualité Q variant entre 0.001 pour un massif très mauvais et 1000 pour un massif très bon. Dans la pratique, cet indice est réduit entre 0.005 et 50 [23].

Le système Q juge important d'évaluer, en tant que paramètres de classification, six caractéristiques particulières du massif rocheux, soit :

- Indice RQD (Deere, 1964) ;
- Nombre de familles de joints (JN) ;
- Indice de rugosité des joints (JR), celle du plus faible plan de fissuration ;
- Indice de l'altération des joints (JA), caractéristiques de ce dont les fissures sont remplies ;
- Facteur de réduction pour la présence d'eau (JW) ;
- Et le facteur de réduction pour les contraintes in-situ (SRF).

Le calcul de la cote Q se fait comme suit :

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

Les trois quotients de la formule représentent des caractéristiques particulières du massif rocheux, dont l'interprétation est la suivante :

- RQD/JN représente la structure globale du massif, ce qui constitue une mesure approximative de la taille des blocs rocheux (éléments dissemblables) ;
- JR/JA représente la résistance au cisaillement des discontinuités (les plus défavorables ou argileuses) séparant les blocs rocheux ;
- Et JW/SRF consiste le paramètre de réduction due à la présence d'eau JW qui a un effet néfaste sur la résistance au cisaillement et indirectement quant à l'évaluation de l'état général des contraintes SRF.

Ce dernier paramètre mesure la réduction de contrainte lors d'excavation rocheuse dans une zone présentant un niveau de cisaillement élevé ou lors de présence d'argile, des contraintes élevées dans la roche compétente, des pressions de convergence ou de gonflement dans des roches de faible résistance (plastique ou ductile). Le quotient résultant est un paramètre empirique complexe décrivant l'état des contraintes actives. Pour le domaine minier, ce quotient est souvent mis comme unitaire et le système de classification est désigné par Q'.

La valeur des différents paramètres de cette classification, ainsi que des notes explicatives supplémentaires permettant d'évaluer ceux-ci plus adéquatement, sont donnés au Tableaux QBCDE (voir annexe 01).

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

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

Cette expression a été modifiée par plusieurs autres chercheurs. Toutefois ces corrélations ne sont pas très fiables et doivent être utilisées avec beaucoup de précaution. Selon Goel et al. [1995], le RMR et le Q-system ne prennent pas en considération les mêmes paramètres et donc, elles ne sont pas équivalentes [3].

La cote Q permet d'évaluer qualitativement la masse rocheuse selon neuf catégories de qualité pour la construction de tunnels. Cette qualification est présentée dans le tableau II.6 ci-dessous.

Tableau II.6 – Évaluation de la cote Q et de la qualité du massif [23].

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

II.6 Comparaison des utilisations des RME et Q

Le tableau II.7 suivant résume quelques points forts et faibles des deux systèmes : RME et Q.

Tableau II.7 – Comparaison des utilisations du RME et de Q système

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

II.7 Système du GSI (Geological Strength Index)

Le GSI n'est pas directement un système de classification, mais constitue une étape intermédiaire pour la détermination des propriétés mécaniques du massif rocheux, utilisant les formules empiriques proposées par Hoek et Brown.

Le GSI ou Geological Strength Index a été introduit en 1995 par Hoek ("Strength of rock and rock masses", ISRM News Journal, 1994, Vol. 2). Il est déduit de variantes du RMR et / ou du coefficient Q notée RMR' et / ou Q' . Le RMR' est calculé en retenant une valeur 15 pour le coefficient relatif à l'eau (A5) et une valeur nulle pour le coefficient de correction relatif à l'orientation des discontinuités (B).

$$RMR' = A1 + A2 + A3 + A4 + 15$$

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

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_a}{J_a}$$

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

$$GSI = RMR'_{89} - 5 \text{ SI } RMR'_{89} > 23$$

$$GSI = 9(\log Q' + 44) \text{ SI } RMR'_{89} \leq 23$$

L'estimation du GSI s'appuie sur une observation directe de la structure du massif rocheux à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in-situ. Cet indice varie entre 5 et 85. Par définition et comme le montre le tableau II.8 ci-dessous, les valeurs proches de 5 correspondent à des matériaux de très mauvaise qualité, tandis que les valeurs proches de 85 décrivent des matériaux d'excellente qualité [24].

Tableau II.8 – Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI [3].

Valeur du GSI	76-95	56-75	41-55	21-40	<20
Qualité de massif rocheux	Très bonne	Bonne	Moyenne	mauvaise	Très mauvaise

la figure suivante illustre le principe de l'estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse selon Hoek et Brown [1995].



Figure II.2 – Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse (Hoek et Brown, 1995)

II.8 Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)

Introduit par Romana en 1985, le SMR est davantage orienté vers la stabilité des pentes rocheuse. Il est obtenu à partir du RMR en lui ajoutant un produit de

facteurs d'ajustement dépendant de la relation joints-talus et en lui additionnant un facteur dépendant de la méthode d'excavation.

$$SMR = RMR_{Base} + (F1 * F2 * F3) + F4$$

avec F1, F2, F3 sont des facteurs d'ajustement.

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

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

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

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

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

β_j est le pendage des joints.

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

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

- Les talus naturels sont plus stables à cause de l'érosion à long terme et des protections naturelles telle la végétation.
- La roche prédécoupée augmente également la stabilité.
- L'abattage à l'explosif augmente, ne change pas ou diminue la stabilité du talus selon qu'il est léger, normal ou déficient (trop d'explosifs par exemple).
- L'excavation mécanique par arrachage dans les roches très fracturées n'augmente, ni ne diminue la stabilité du talus.

Les valeurs des paramètres figurent dans le tableau (14) :

Tableau II.9 – Notes des paramètres du système de classification SMR (Romana,1985) [7].

SMR= RMR de base+ (F1*F2*F3) + F4					
Facteurs d'ajustement liés aux joints (F1, F2, F3).	α_j =Direction du pendage des joints β_j =Pendage du joint α_s =Direction du pendage du talus β_s =Pendage du talus				
	Très favorable	favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable
Rupture Plane $ \alpha_j - \alpha_s =$	>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°
Basculement $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ =$					
Valeur de F1	0.15	0.4	0.7	0.85	1
Relation	$F1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s)^2$				
$\beta_j =$	<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°
La valeur	0.15	0.4	0.7	0.85	1
Rupture plane	1				
Basculement	1				
Relation	$F2 = \text{tg}2\beta_j$				
Rupture plane $\beta_j - \beta_s =$	>10°	10°-0°	0°	0°-(-10°)	<(-10°)
Basculement $\beta_j + \beta_s =$	< 110°	110°-120°	>120°	-	-
Valeur de F3	0	-6	-25	-50	-60
Relation	F3 = Ajustement de BIENIAWSKI pour l'orientation des joints, 1976				
F4 : Facteur d'ajustement pour la méthode d'ajustement	F4=Valeur empirique de la méthode d'excavation.				
	Talus naturels	Prespliting	Smooth blasting	Explosif ou mécanique	Déficient blasting
Valeur de F4	15	10	8	0	-8

Selon les valeurs SMR, Romana (1985) a défini cinq classes de stabilité qui sont décrites dans le tableau II.10 ci-dessous. ce dernier indique que les pentes avec une valeur inférieure à 20 SMR peuvent être échouées très rapidement.

Aucune pente n'a été enregistrée avec une valeur de SMR en dessous de 10, parce que cette pente ne pourrait pas exister physiquement [26].

Tableau II.10 – Les différentes classes de stabilité selon la valeur du SMR.

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

De nombreuses mesures correctives peuvent être prises pour soutenir une pente. L'étude détaillée de l'ingénierie est nécessaire pour stabiliser une pente. Les systèmes de classification peuvent nous donner les techniques habituelles pour chaque classe différente des supports comme indiqué dans le Tableau II.11 suivant.

Tableau II.11 – Les suggestions de soutènement selon la classe du SMR

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

II.9 Commentaires sur les systèmes de classification

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

Ces méthodes sont facilement utilisées au stade de l'avant-projet. Cependant elles présentent certaines limites que nous résumons comme suit :

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

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté plusieurs méthodes de classification semi-empiriques des massifs rocheux. Nous retenons quelques remarques essentielles :

Vu leur simplicité, les systèmes de classification empiriques (RQD, RMR, Q système, GSI) sont fréquemment utilisés dans le calcul des ouvrages souterrains. Toutefois, leur emploi n'est pas suffisant pour la détermination ou le dimensionnement des soutènements et l'évaluation de la déformabilité et la stabilité des ouvrages. Le recours à ce type de classification doit être limité à la phase préliminaire de l'avant-projet (conception, étude de faisabilité...).

Lorsqu'une ou deux directions préférentielles de la fracturation sont considérées et le massif présente une structure quasi périodique, certaines propriétés mécaniques peuvent être calculées rigoureusement par des voies analytiques.

Si la structure géométrique des fractures est complexe (plusieurs familles, extension finie, orientation quelconque...), alors ces méthodes trouvent rapidement leurs limitations, d'où l'importance du système de classification Le SMR qui sert à évaluer la stabilité des Pentes et définir des classes de stabilité ainsi que des suggestions de soutènement selon ces classes.

Chapitre III

présentation de la zone d'étude

III.1 Introduction

L'hydrologie est la science de la terre qui s'intéresse au cycle de l'eau, c'est-à-dire aux échanges entre l'atmosphère, la surface terrestre et son sous-sol. Au titre des échanges entre l'atmosphère et la surface terrestre, l'hydrologie s'intéresse aux précipitations (pluie et neige), à la transpiration des végétaux et à l'évaporation directe de la couche terrestre superficielle.

La géotechnique est l'étude de l'adaptation des ouvrages humains aux sols et roches formant le terrain naturel. Les études géotechniques ont pour principal objet les études de sol pour la construction d'ouvrages (pavillons, immeubles, voiries, ouvrages d'art.), et notamment la définition des fondations.

La géologie applique les principes et les méthodes des sciences minérales et connexes aux travaux de l'ingénieur. Ce dernier ne peut en effet négliger ni les caractéristiques des sols, des roches, des massifs rocheux et des eaux souterraines, ni le rôle des processus géologiques en action ou potentiels. Elle se trouve tributaire à la fois des conditions naturelles d'un site ou d'un territoire et de la nature d'un projet, et doit faire appel, entre autres disciplines, à la géologie classique, à la pétrographie, à la mécanique des sols et des roches, à la géotechnique et à l'hydrogéologie.

Pour étudier un site il est prépondérant d'associer et détailler ces trois paramètres à savoir : l'hydrologie, la géologie et la géotechnique.

III.2 Présentation de la déviation de la RN25 touchée par la cuvette du barrage de SOUK EL TLETA dans la wilaya de TIZI OUZOU

Le tracé de la variante (N°5) retenue pour le dédoublement de la RN25 est de 9051 m de longueur. D'orientation Nord Est- Sud-Ouest, son point de démarrage étant la RN 25 existante, du côté Est du futur barrage, au niveau du site de Ighil Ouberouak ; il entrecroise le CW 128 et l'assif Tala Imadrene entre le PK02+120 et PK02+600, puis se faufile à travers des massifs forestiers très boisés pour se raccorder

à la même route du côté Sud, au niveau de Tarzouth. Cette variante compte à son passage :

- Un (01) viaduc de 480 m de longueur au PK02+120 (hauteur pile égale 92 m)
- Deux (02) ouvrages d'art de longueurs respectives 90 m et 160 m, implantés aux PK 04+730 et PK05+310 ;
- Trois (03) dalots aux franchissements des écoulements de moindre importance, implantés aux PK0+770,PK8+222 et PK8+540,de longueurs respectives de 57 m, 23 m et 46 m.

L'escarpement des reliefs au passage du tracé est en faveur des terrassements importants notamment en déblais, les hauteurs de plus de 10 m à l'axe en déblai et remblai, sont résumées dans le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1 – Localisation des déblais et remblais importants.

Profil	Localisation (PK)	Extension (m)	Hauteur max (m)	PK
Déblai	00+120 – 00+500	380	19.00	00+360
	01+550 – 02+100	550	18.71	01+660
	02+610 – 04+570	1960	25.42	03+430
	05+110 – 05+280	170	14.22	05+150
	05+480 – 05+800	320	25.98	05+610
	05+900 – 06+120	220	16.41	06+070
	06+250 – 06+330	80	16.53	06+290
	06+540 – 06+860	320	18.46	06+600
	07+130 – 07+520	390	24.49	07+250
	07+850 – 07+980	130	14.10	07+910
	08+000 – 08+200	200	12.07	08+170
	08+240 – 08+480	240	21.48	08+360
	08+620 – 08+910	290	24.14	08+830
Remblai	00+650 – 00+850	200	19.45	00+770
	01+130 – 01+230	100	11.57	01+210
	06+400 – 06+530	130	14.26	06+490
	08+490 – 08+600	110	19.60	08+520

III.2.1 Situation géographique

La zone de projet est située dans la wilaya de Tizi-Ouzou, à environ 8 km au Sud de la Daïra de Draa Ben KHEDDA, à l'amont du futur barrage de souk Tlata, cette zone où les chaînons montagneux de plus de 200 m d'altitude se succèdent, est cernée en majeure partie par les vallées de l'Acif Tlatha et l'Acif Thala Imadrene, affluents de l'oued Boughdoura (voir figure III.1).



Figure III.1 – Situation de la zone de projet.

III.2.2 Géomorphologie

A l'exception du début de projet, sur quelques centaines de mètres, où le tracé empiète sur des terrains appartenant au bassin miocène de Tizi-Ouzou de moins de 150 m d'altitude, le reste du tracé traverse des terrains accidentés, de plus de 200 m d'altitude, qui appartiennent au massif ancien de grande Kabylie du Djurdjura. Ces terrains sont entaillés par de nombreux écoulements qui se déversent dans des oueds importants, tels que : assif Tlatha (figure III.5), oued Ksari (Figure III.2), assif Tala Imadrene et l'oued Boughdoura ; qui s'écoulent en gros dans le sens S-N, jusqu'à leur confluence à souk El Tlatha (site du futur barrage).

Les figures ci-dessous, illustrent la géomorphologie des terrains dans la zone d'étude, et les écoulements y présents.



Figure III.2 – Terrain peu vallonné au début de projet.



Figure III.3 – Topographie très accidentée



Figure III.4 – Assif Tlatha



Figure III.5 – Oued Ksari.

III.2.3 Climat

La région de Tizi-Ouzou, jouit d'un climat Méditerranéen, le mois d'Août est le mois le plus chaud avec une température moyenne mensuelle de 28°, par contre le mois de janvier est très froid avec une température moyenne mensuelle de 10,1°C.

Il pleut en moyenne entre 600 mm et 1000 mm par an (voir carte des précipitations 2012/2013 ci-dessous), ce qui en fait une région bien arrosée.

La période pluvieuse s'étend du mois de novembre au mois d'avril, le mois de décembre étant le plus pluvieux, avec une quantité moyenne de 128.57 mm et le mois de juillet est le plus sec avec une valeur moyenne de 3.62 mm (source : ONM de TIZI-OUZOU).

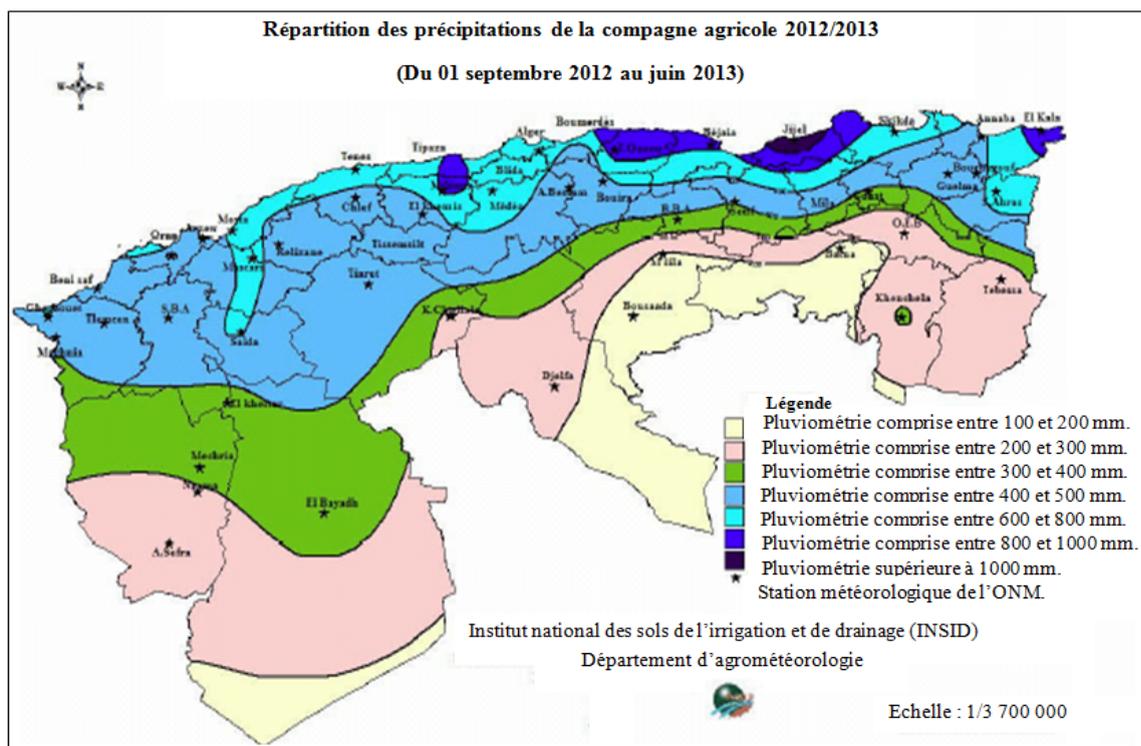


Figure III.6 – La carte des précipitations de la campagne agricole 2012/2013 (du 01 septembre 2012 au 30 juin 2013)

III.2.4 Zonage Sismique

En Algérie, la tectonique active est localisée dans la région nord du pays, essentiellement dans le Tell. Dans cette région frontière entre les plaques Africaine et Eurasiatique, la déformation tectonique est l'expression de la convergence actuelle de ces deux plaques, et se traduit par la fermeture progressive des bassins néogènes et par la poursuite de l'édification de la chaîne.

À terre, la sismicité s'exprime surtout, le long des bordures des bassins néogènes qui longent la côte. Ces bassins se déforment en donnant des structures (synclinales, et anticlinales), et parfois cassantes (plis-failles, failles inverses, chevauchements) orientées NE-SW à NNE-SSW. Ces dernières sont le plus souvent à l'origine des

violents tremblements de terre que connaît l'Algérie.

Le zonage sismique du territoire Algérien élaboré par le CRAAG, montre que la bande tellienne notamment dans sa frange littorale est soumise au degré d'aléa sismique le plus élevé.

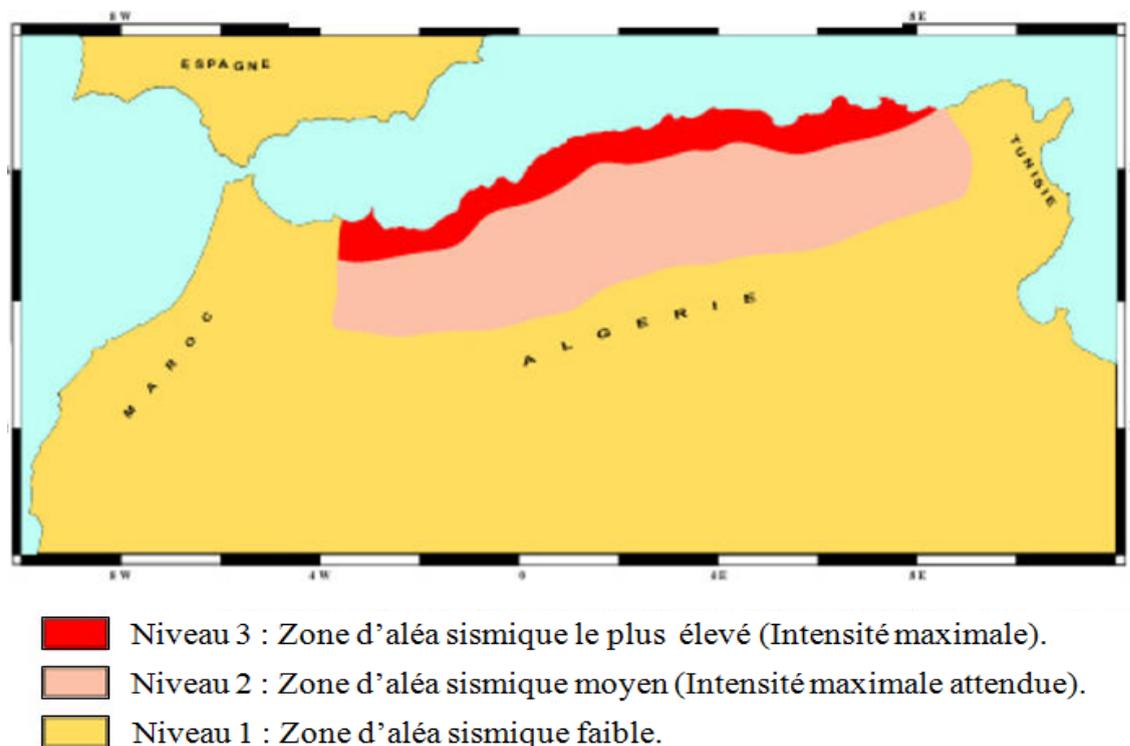


Figure III.7 – Le zonage sismique du territoire Algérien élaboré par le CRAAG.

Le paramètre sismique est un facteur déterminant dans le calcul des structures à long terme, de ce fait, la sismicité de la zone de projet doit être déterminée en se référant aux règles parasismiques algériennes RPA 99/version 2003.

La région de Tizi-Ouzou est caractérisée par une activité sismique moyenne. En effet, elle se trouve en dehors des bassins sédimentaires subsidents tels que la Mitidja, le Chelif, où l'aléa sismique est le plus élevé (intensité maximale)

Tout ouvrage qui relève du domaine d'application des règles parasismiques algériennes RPOA 2008, doit être classé dans l'un des quatre groupes définis ci-après :

Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale.

Groupe 1B : Ouvrages de grande importance.

Groupe 2 : Ouvrages courants ou d'importance moyenne.

Groupe 3 : Ouvrages de faible importance.

Tableau III.2 – La classification sismique.

ZONE				
Groupe	I	Ia	IIb	III
1A	0,15	0,25	0,30	0,40
1B	0,12	0,20	0,25	0,30
2	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,07	0,10	0,14	0,18

Le projet de dédoublement de la RN25 est considéré d'une grande importance (groupe 1B), et d'après la carte de zonage sismique insérée ci-dessous, la région de Tizi-Ouzou appartient à la Zone IIa (sismicité moyenne) ; le coefficient d'accélération prendre en compte est : $A = 0.20$.

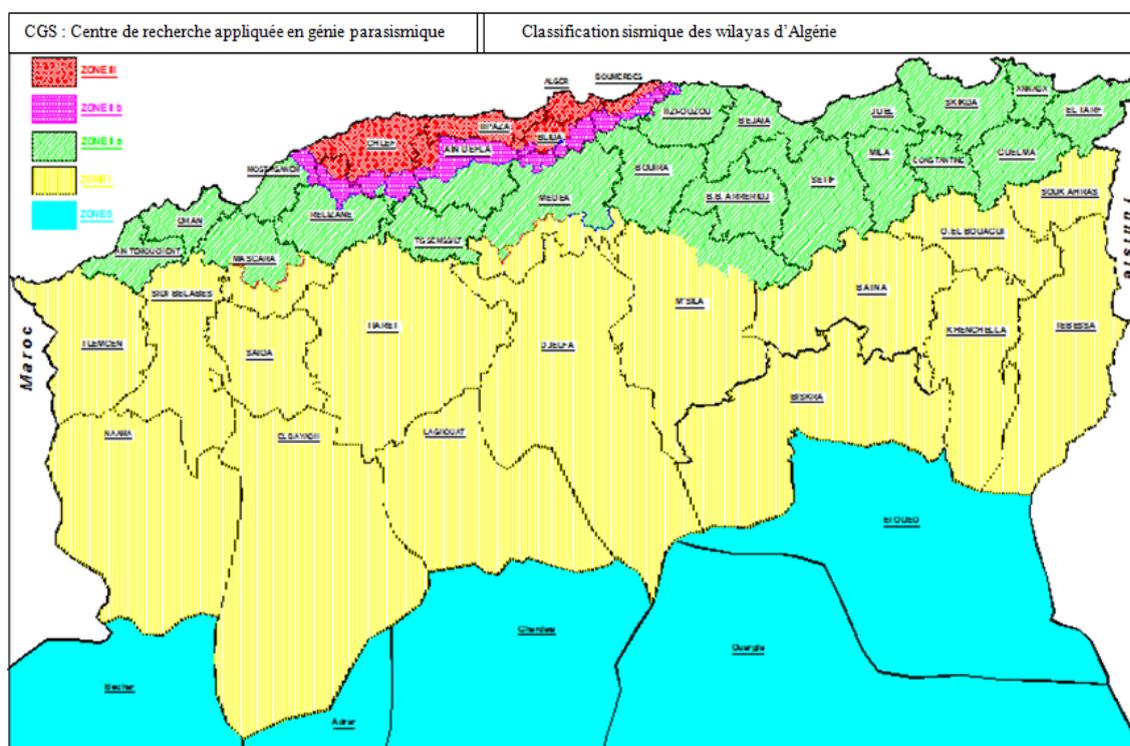


Figure III.8 – Le zonage sismique du territoire Algérien élaboré par le CRAAG.

III.3 CONTEXTE GEOLOGIQUE

III.3.1 Cadre géologique de la zone d'étude

Dans son ensemble, l'Algérie est constituée du Nord au Sud par quatre (4) domaines géomorphologiques (l'Atlas Tellien au nord, les Hauts plateaux au centre,

l'Atlas saharien au sud et la plateforme saharienne à l'extrême sud). Parmi les domaines géologiques constituant le nord du pays, nous avons la chaîne des maghrébides qui comprend entre autre le Tell (au nord, constitué des Kabyliques, des flyschs et des nappes telliennes) et le système de l'Atlas intracontinental (au sud).

III.3.2 Géologie régionale

La zone concernée par cette étude appartient au domaine tellien de l'Algérie du nord ; (voir figure IV.3), ce domaine est représenté au nord par le tell septentrional qui regroupe quatre grands ensembles essentiels distincts .

III.3.2.1 Le Tell

Le Tell est constitué de séries sédimentaires épaisses à caractère principalement marneux. Les dépôts sédimentaires du Miocène « post-nappes » scellent en quelque sorte des derniers grands mouvements tectoniques à l'origine de la formation des nappes telliennes. De grands bassins littoraux tels que la Mitidja et le bassin du Chélif, orientés OSO-ENE, sont comblés par les sédiments des transgressions marines miocènes à quaternaires. Les sédiments miocènes « post-nappes » sont constitués de conglomérats et de molasses alors que les sédiments pliocènes sont typiquement composés de marnes. Les sédiments quaternaires sont généralement composés d'alluvions des fleuves dans les bassins néogènes ou d'anciennes plages quaternaires le long de la côte. L'ensemble de ces sédiments est actuellement légèrement déformé à terre, là où la tectonique récente (plio-quaternaire).

1. Un domaine interne

Appelé aussi socle kabyle, il est composé de massifs cristallophylliens métamorphiques (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes), et d'un ensemble sédimentaire paléozoïque (Ordovicien à Carbonifère) peu métamorphique. Ce socle affleure d'ouest en est dans les massifs du Chenoua (à l'ouest d'Alger), d'Alger, de Grande Kabylie et de Petite Kabylie (entre Jijel et Skikda). Ce dernier, avec 120 km de long et 30 km de large, constitue le plus large affleurement du socle kabyle en Algérie.

2. Dorsale Kabyle

Appelée parfois « chaîne calcaire » à cause de l'importance du Jurassique inférieur calcaire. La dorsale kabyle se présente sous forme d'écaillés d'âge Permo-Triasique à Eocène moyen (Lutétien). Du point de vue lithologique, ces formations comprennent des calcaires du Lias et de l'Eocène, des dolomies du Trias au Lias inférieur et des grès du Permo-Trias.

3. Le domaine des flyschs

Ce domaine est constitué par des nappes de flyschs Crétacés- Bizerte (Tunisie). Il s'agit essentiellement de dépôts de mer profonde mis en place par des courants de turbidités. Ces flyschs se présentent de trois manières (voir figure III.7), soit :

- En position interne, superposés aux massifs kabyles, c'est-à-dire rétrocharriés sur les zones internes, et appelés flyschs nord-kabyles ;

- En position relativement externe à la bordure sud de la Dorsale kabyle (flyschs sud-kabyle) ;
- En position très externe, sous forme de masses isolées, flottant sur le Tell, charriés jusqu'à une centaine de kilomètres au sud.

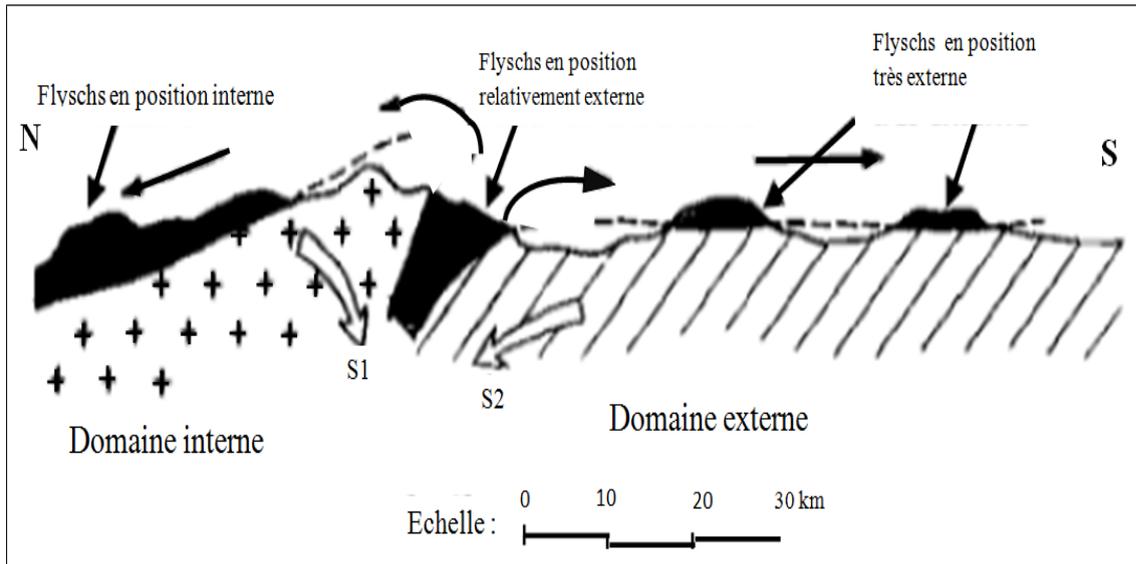


Figure III.9 – La position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne Alpine

4. Un domaine externe

nommé aussi domaine tellien constitué par un ensemble de nappes allochtones pelliculaires constituées principalement de marnes d'âge Crétacé moyen à Néogène et qui ont été charriées sur une centaine de km vers le Sud. On distingue du Nord au Sud et comme le montre la figure III.9 , trois types des nappes à savoir :

- Les nappes **ultra-telliennes**, du Crétacé et de l'Eocène et une série plus détritique au Sénonien et à l'Eocène, ne sont connues que dans l'Est algérien et en Tunisie ;
- Les nappes **telliennes** sensu-stricto formées de Lias de plate-forme surmonté de Jurassique plus marneux, puis par le Crétacé qui, détritique, devient marneux à argilo-calcaire et enfin, l'Eocène aux marnes épaisses ;
- Les nappes **péri-telliennes** dont les séries néritiques du Crétacé à l'Oligocène sont carbonatées et marneuses. Les nappes péri-telliennes, définies dans l'Est algérien, présentent des caractères proches de ceux du néritique constantinois.

la figure III.10 Montre un exemple d'agencement des différents domaines et unités cités précédemment en Algérie (exemple du Constantinois, Algérie nord-orientale).

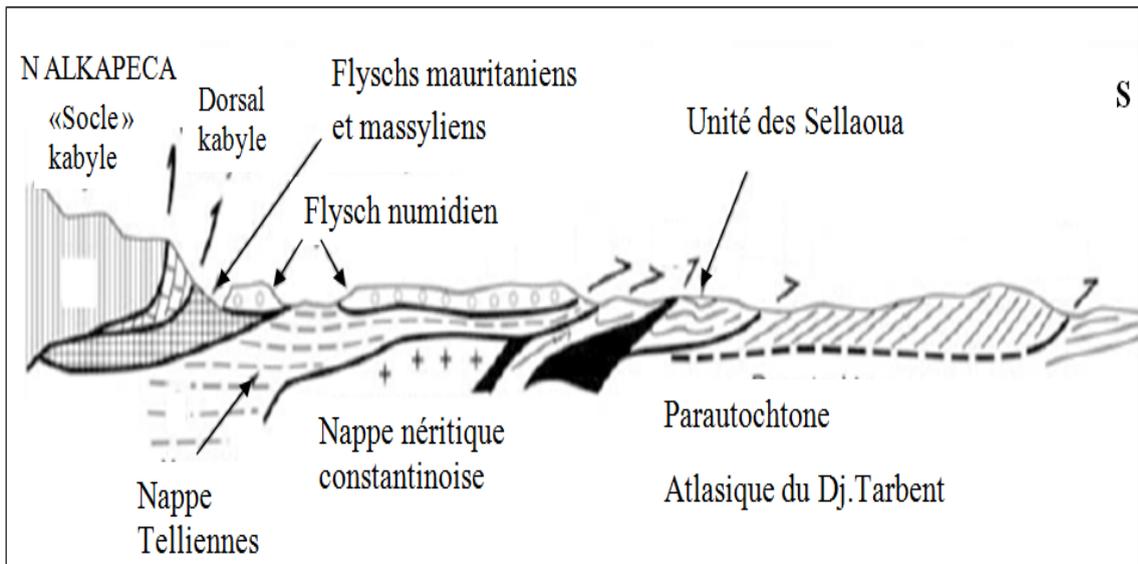


Figure III.10 – Les différents domaines et unités cités précédemment en Algérie (exemple du Constantinois, Algérie nord-orientale).

la figure III.11 suivante présente une carte illustrative des différentes unités géologiques d'après Domzig 2006. zig 2006.

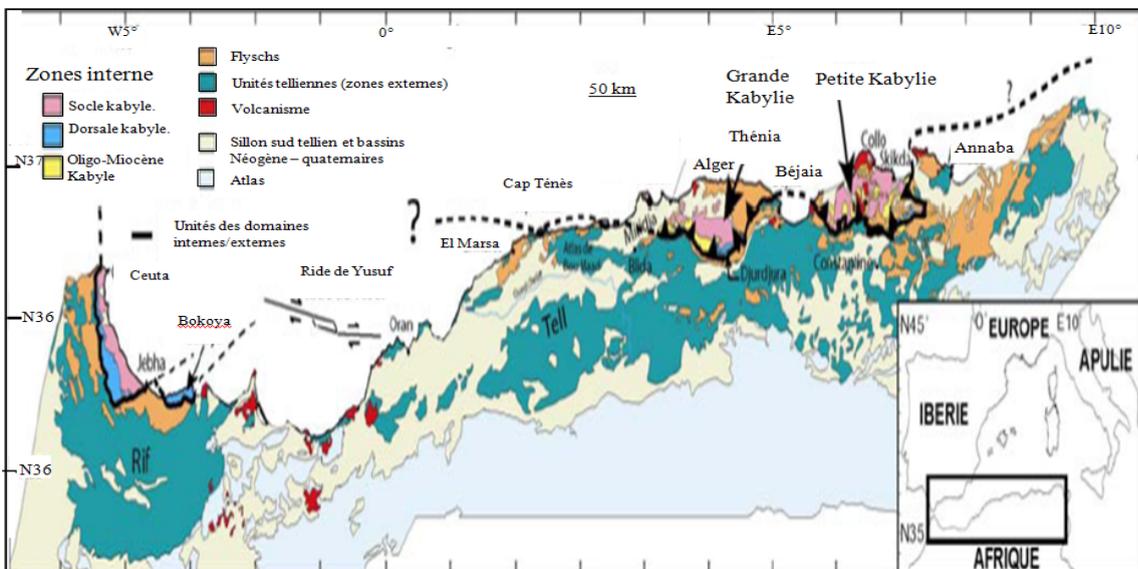


Figure III.11 – Les différentes unités géologiques d'après Domzig 2006

III.3.3 Géologie locale

III.3.3.1 Description des principaux terrains

Les affleurements géologiques observés dans la zone d'étude, suite à la visite effectuée sur le site de projet, et la consultation conjointe de la carte géologique de

la région de Draa El Mizane (échelle 1/50000^{ème}).

On y trouve :

- Des formations sédimentaires du Tertiaire (Miocène Post nappes),
- Des dépôts de recouvrement Plio-quaternaires : des colluvions (dépôts de pentes), alluvions anciennes et récentes des oueds et poudingues.

La description litho stratigraphique est la suivante :

1. Formations Quaternaires

- Colluvions argileuses : généralement de granulométrie fine, englobant des débris rocheux, la composante limoneuse est très importante.
- Alluvions actuelles et récents des lits majeurs et mineurs des oueds, au niveau de l'oued Bougdoura, les alluvions sont graveleuses.

2. **Poudingues pliocènes** : Il s'agit de matériaux graveleux emballés dans une matrice limono-argileuse. Cette formation englobe localement des blocs de grès et de gneiss. Ces poudingues affleurent sur la rive gauche de l'oued Bougdoura.

3. **Miocène marin du bassin de Tizi-Ouzou** C'est un vaste synclinorium, affecté par des plis d'orientation N70. Il s'est déposé pendant une période allant du Burdigalien terminal-Langhien basal, au Langhien-Serravallien. Le bassin de Tizi-Ouzou est formé par une série épaisse de dépôts gréseux et marneux, qui recouvrent avec un faciès transgressif les terrains anté-Miocènes du socle kabyle :

- Les grès sont de couleur grisâtre (photo III.10), ceux altérés présentent une couleur beige foncée, rouge brique, l'altération des grès est due aux circulations hydrothermales ferrugineuses le long des plans de fractures. Par endroits, les bancs de grès sont durs et riches en fossiles (photo III.11).
- Les grès sont stratifiés en bancs épais de 1 m d'épaisseur approximative, ils sont entrecoupés par un réseau dense de fracturation et de mini fissures surtout dans les horizons superficiels les plus décomprimés à remplissages calcitiques blanchâtres.
- La fracturation du massif est le produit de la néotectonique distensive post Burdigalienne.



Figure III.12 – Affleurement de couche de grès altéré et fracturé de l'unité Miocène



Figure III.13 – Grès dur avec des traces de fossiles

- Les marnes sont de couleur grisâtre, elles sont altérées en surface formant des versants dénudés et de faible stabilité.



Figure III.14 – Affleurement de couche de grès altéré et fracturé de l'unité Miocène

4. Socle Paléozoïque, métamorphique appartenant au massif de Boumahni et de Sid Ali Bounab

- Gneiss de couleur gris clair (Figure III.14) à ocre jaunâtre, portant des foliations ;
- Schistes de couleur grisâtre moyennement altérés (figureIII.14), se débitant en plaquettes ;
- Micaschistes à mica blanc ou à mica noir finement lités (figureIII.15), et leur couleur est liée à la proportion de micas blancs ou micas noirs qu'ils renferment.



Figure III.15 – Gneiss foliacés.



Figure III.16 – Schiste écaillé



Figure III.17 – Micaschistes finement lités, légèrement oxydés

III.4 Tectonique

Plusieurs phases de déformation affectent la série stratigraphique paléozoïque à quaternaire, cependant, les deux évènements les plus remarquables sont :

- La tectonique alpine qui est responsable des grands traits orographiques de la Kabylie. Elle s'exprime par des chevauchements et des cisaillements complexes, bien visibles dans la série métamorphique.
- La tectonique néogène post-nappes qui a permis l'individualisation du bassin miocène de Draa Ben Khedda - Tizi-Ouzou. Elle s'exprime par le plissement

d'échelle kilométrique que l'on observe dans les grès et argiles miocènes d'El Kmine. Elle se manifeste également par une faille observée le long de l'oued Ksari dans la région d'El Kmine. Cette faille décale par un rejet vertical d'une vingtaine de mètres, les bancs gréseux miocènes affleurant sur les deux versants de l'oued Ksari.

Aussi, les bancs de grès miocènes ont été sollicités par la néotectonique distensive post-burdigalienne, marquée par un réseau dense de failles sub-verticales, suivies de diaclases qui coupent le massif gréseux avec une intensité élevée. Ce réseau de fracturation est très apparent à la surface des grès.

III.5 Hydrogéologie

III.5.1 Hydrogéologie régionale

La connaissance de l'hydrogéologie de la zone concernée par ce projet, est nécessaire pour mieux appréhender les problèmes d'inondations de la chaussée en saison pluviale, et ce, au croisement des oueds, un drainage transversal et longitudinal est de rigueur.

Le niveau de la nappe doit être déterminé, pour se prémunir contre la remontée des eaux lors des travaux de terrassements, et durant la mise en service de l'infrastructure autoroutière.

- **Eaux superficielles** : Le site est creusé par de nombreux oueds dont nous citons les principaux : Boughdoura, Assif Thala Imadrane, assif Guifrane, Agouni et tant d'autres écoulements comme Thala Tikasserai, Ighzer El Ache, Ighzer ou Saka, Ighzer Takhribt, Ighzer ou Berouak. Ces oueds présentent les caractéristiques des oueds algériens ; secs en été, inondant et coupant les routes pendant la période des pluies.

Le type d'ouvrage de franchissement (ouvrage d'art, et dalot) est défini par l'étude hydraulique, des buses seront également recommandées au droit des petits écoulements.

- **Eaux souterraines** : Les niveaux aquifères potentiels sont en rapport avec les formations ci-après :
 - Poudingues et grès miocènes qui jalonnent les flancs de l'oued Boughdoura, et Assif Thala Imadrane.
 - Les grès sont considérés comme étant très perméables d'après l'étude géologique d'avant-projet détaillé du barrage de Souk El Tlatha, menée le bureau d'étude LOMBARDI INGEENERING année 1991.
 - Le coefficient de perméabilité K est supérieur à 1.10^{-5} cm/s
 - Dans la formation gréseuse, la nappe souterraine est profonde.
 - Les schistes et micaschistes sont peu perméables par porosité, toutefois, ils peuvent être également le siège d'une rétention d'eau, en rapport avec leur état d'altérabilité dans les horizons superficiels.

III.5.2 Hydrogéologie locale

D'après le rapport de laboratoire, aucune venue d'eau n'a été constatée, au niveau des sondages carottés implantés aux droits des déblais et remblais. En période hivernale (saison de fortes pluies), le niveau de la nappe peut enregistrer des fluctuations (remontée de son niveau), d'où la nécessité d'effectuer de nouveaux levés piézométriques lors des travaux d'exécution.

A titre d'orientation, les levés piézométriques implantés au niveau du site de la réalisation de la pénétrante autoroutière reliant la ville de Tizi-Ouzou à l'autoroute Est-Ouest (janvier 2013), ont révélé des profondeurs de la nappe à 7.20 m dans la formation de mica schistes très altérés.

III.5.3 Hydrogéologie locale

D'après le rapport de laboratoire, aucune venue d'eau n'a été constatée, au niveau des sondages carottés implantés aux droits des déblais et remblais.

En période hivernale (saison de fortes pluies), le niveau de la nappe peut enregistrer des fluctuations (remontée de son niveau), d'où la nécessité d'effectuer de nouveaux levés piézométriques lors des travaux d'exécution.

A titre d'orientation, les levés piézométriques implantés au niveau du site de la réalisation de la pénétrante autoroutière reliant la ville de Tizi-Ouzou à l'autoroute Est-Ouest (janvier 2013), ont révélé des profondeurs de la nappe à 7.20 m dans la formation de mica schistes très altérés.

III.6 Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous constatons que notre terrain d'étude fait partie d'une zone à moyenne sismicité qui est due à ses structures tectoniques actives, élément à prendre en considération lors de la réalisation de l'étude de ce projet.

Les observations que nous avons réalisées sur site, nous ont mené à conclure que le tronçon de PK1 au PK6 est très hétérogène, il renferme cinq formations géologiques différentes, de ce fait la classification géomécanique des massifs rocheux du terrain sera propre à chaque formation rencontrée.

Chapitre IV

propriétés physico-mécaniques des roches

IV.1 Introduction

La connaissance du matériau rocheux implique la détermination d'un certain nombre de caractéristiques physiques et mécaniques. Celles-ci peuvent être déterminées d'une part par des essais en laboratoire sur des échantillons provenant soit de forages carottés, soit de blocs prélevés in situ et d'autre part par des essais effectués in situ soit dans des forages, soit dans des tranchées, des puits ou des galeries soit à partir du terrain naturel.

La roche, tout comme le sol, est constituée de matériau solide et de vides. Ces vides peuvent être remplis soit d'air (échantillon sec), soit d'eau (échantillon saturé) soit des deux (échantillon humide). Il faut toutefois noter que certains vides ne sont pas accessibles à l'imbibition notamment ceux résultant de la formation de bulles de gaz enfermées dans le matériau solide (roches éruptives).

IV.2 Caractéristiques physiques

IV.2.1 Teneur en eau W % [NF P94- 050]

IV.2.1.1 Définition

Elle est exprimée en pourcentage %, est le rapport entre la masse de l'eau évaporée par séchage d'un volume de sol ramenée à la masse sèche de ce sol. L'essai permet de renseigner sur l'état d'humidité d'un matériau, de savoir la quantité d'eau existante dans un volume de sol donné relativement à la quantité des grains solides de ce même volume de sol.

Cette caractéristique permettra par la suite de déterminer d'autres caractéristiques du sol telles que le degré de saturation, la porosité, ... sa détermination est indispensable et révèle d'un intérêt capital, notamment dans le cas des sols fins sensibles à l'eau.

IV.2.1.2 Exécution de l'essai

La détermination de cette teneur consiste à peser des échantillons de la roche intacte humide puis les passer à l'étuve à 105°C pendant 24h et le peser une autre fois à sec.

$$W(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

IV.2.1.3 Expression des résultats

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.1 ci- :

Tableau IV.1 – La teneur en eau.

Roche	Teneur en eau W %
Grès	0.78
Micaschiste	0.74
Gneiss	0.27
Marbre	1

IV.2.2 La masse volumique

C'est la masse de l'unité de volume de la roche (g/cm^3). Suivant l'état du matériau, on définit : ρ_h la masse volumique naturelle, ρ_d la masse volumique sèche, ρ_{sat} la masse volumique saturée et ρ_s la masse volumique absolue ou masse volumique du solide [22].

IV.2.2.1 La masse volumique naturelle ρ_h

$$\rho_h = \frac{M_h}{V_t}$$

Avec :

M_h la masse naturelle [g] ; V_t le volume de l'échantillon [cm^3]

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.2 suivant :

Tableau IV.2 – La masse volumique naturelle.

Roche	l'échantillon et la profondeur de prélèvement(m)	Dimension (cm)		La masse (g)	Le volume (cm ³)	La masse volumique naturelle ρ_h (g/cm ³)	La masse volumique naturelle moyenne
		A	H				
Grès	N°01 PK1+200 au PK1+500	10	10	2400	1000	2.40	2.40
	N°02 PK1+200 au PK1+500	10	10	2370	1000	2.37	
	N°03 PK1+200 au PK1+500	10	10	2420	1000	2.42	
	N°04 PK1+200 au PK1+500	10	10	2430	1000	2.43	
Micaschiste	N°01 PK4+820 au PK5+340	10	10	2880	1000	2.88	2.92
	N°02 PK4+820 au PK5+340	10	10	2940	1000	2.94	
	N°03 PK4+820 au PK5+340	10	10	2960	1000	2.96	
	N°04 PK4+820 au PK5+340	10	10	2920	1000	2.92	
Gneiss	N°01 PK4+900 au PK5+600	10	10	2630	1000	2.63	2.66
	N°02 PK4+900 au PK5+600	10	10	2700	1000	2.70	
	N°03 PK4+900 au PK5+600	10	10	2680	1000	2.68	
	N°04 PK4+900 au PK5+600	10	10	2640	1000	2.64	
Marbre	N°01 PK6+400 au PK6+600	10	10	2700	1000	2.70	2.59
	N°02 PK6+400 au PK6+600	10	10	2560	1000	2.56	
	N°03 PK6+400 au PK6+600	10	10	2590	1000	2.59	
	N°04 PK6+400 au PK6+600	10	10	2540	1000	2.54	

IV.2.2.2 La masse volumique sèche ρ_d et la masse volumique saturée ρ_{sat} par pesée hydrostatique [NF P94- 064]

a) La masse volumique sèche ρ_d

La masse volumique sèche d'un échantillon de roche est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme NF P94-064. L'essai consiste

à peser l'échantillon à l'air libre, puis à établir une deuxième pesée après paraffinage, et enfin, repeser le tout plongé dans l'eau.



Figure IV.1 – Préparation les échantillons dans le panier de la pesée hydrostatique.

On détermine alors la masse volumique sèche par l'équation suivante :

$$\rho_d = \frac{M_r}{\frac{M_{rp} - M'_{rp}}{\rho_w} - \frac{M_{rp} - M_r}{\rho_p}}$$

Avec :

M_r :Masse de la roche.

M_{rp} :Masse de la roche paraffinée à l'air libre.

M'_{rp} :Masse de la roche paraffinée dans l'eau.

ρ_p :Masse volumique de la paraffine =0,88 g/cm³.

ρ_w :Masse volumique de l'eau =1 g/cm³.

le tableau IV.3 suivant montre la classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche.

Tableau IV.3 – Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche

ρ_d (g/cm ³)	Appréciation
< 1.6	Faible
1.6 – 1.8	Moyenne
> 1.8	Dense

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.4 :

Tableau IV.4 – La masse volumique sèche.

Roche	L'échantillon et la profondeur de prélèvement(m)	Masse de la roche M_r (g)	Masse de la roche paraffinée à l'air libre $M_{rp}(g)$	Masse de la roche paraffinée dans l'eau $M'_{rp}(g)$	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	Masse volumique sèche moyenne (g/cm ³)
Grès	N°01: PK1+200 au PK1+500	90.6	93.2	50.2	2.26	2.12
	N°02: PK1+200 au PK1+500	57.7	60.3	29	2.03	
	N°03 :PK1+200 au PK1+500	89.3	91.2	48.1	2.18	
	N°04 :PK1+200 au PK1+500	111.7	115.1	56	2.02	
Micaschiste	N°01 :PK4+820 au PK5+340	168.4	173.8	95.1	2.32	2.14
	N°02 :PK4+820 au PK5+340	113	117.3	62.4	2.25	
	N°03 :PK4+820 au PK5+340	90.7	94.3	46.6	2.11	
	N°04 PK4+820 au PK5+340	58.3	59.8	27.7	1.91	
Gneiss	N°01 :PK4+900 au PK5+600	141.5	144.6	85.4	2.54	2.44
	N°02 :PK4+900 au PK5+600	125.1	127.4	75.4	2.53	
	N°03 :PK4+900 au PK5+600	67	69	38.6	2.30	
	N°04 :PK4+900 au PK5+600	40.4	41.4	23.2	2.40	
Marbre	N°01 :PK6+400 au PK6+600	127	129.8	68.1	2.17	2.06
	N°02 :PK6+400 au PK6+600	58.1	58.7	29.6	2.04	
	N°03 :PK6+400 au PK6+600	99.6	102.9	54.6	2.23	
	N°04 : PK6+400 au PK6+600	64.6	69	28.3	1.80	

✓ Interprétation des résultats

En se référant au tableau IV.5, on constate que les roches (Micaschiste, grès, marbre, Gneiss) sont des sols très dense.

b) La masse volumique saturée ρ_{sat}

La masse volumique saturée d'un échantillon de roche est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme NF P94-064. L'essai consiste à peser l'échantillon, puis à établir une deuxième pesée après paraffinage,

et enfin, reposer le tout plongé dans l'eau.

La masse volumique saturée tous les vides sont remplis d'eau sol constitué de deux phases uniquement : grains solides + eau. On détermine alors la masse volumique saturée par l'équation suivante :

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat_r}}{\frac{M_{sat_{rp}} - M_{sat_{rp}}}{\rho_w} - \frac{M_{sat'_{rp}} - M_{sat_r}}{\rho_p}}$$

Avec :

M_{sat_r} :Masse de la roche saturée

$M_{sat_{rp}}$:Masse de la roche saturée paraffinée à l'air libre.

$M_{sat'_{rp}}$:Masse de la roche saturée paraffinée dans l'eau.

ρ_p :Masse volumique de la paraffine =0,88 g/cm³.

ρ_w :Masse volumique de l'eau =1 g/cm³.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.5 :

Tableau IV.5 – La masse volumique saturée.

Roche	L'échantillon et la profondeur de prélèvement(m)	Masse de la roche saturée M_{sat_r} (g)	Masse de la roche saturée paraffinée à l'air libre $M_{sat_{rp}}(g)$	Masse de la roche saturée paraffinée dans l'eau $M_{sat'_{rp}}(g)$	Masse volumique saturée ρ_{sat} (g/cm ³) ⁰	Masse volumique saturée moyenne (g/cm ³)
Grès	N°01 :PK1+200 au PK1+500	101.9	104.6	58.5	2.36	2.34
	N°02 PK1+200 au PK1+500	80.8	82.2	46.6	2.37	
	N°03 :PK1+200 au PK1+500	62.6	65.4	35.3	2.32	
	N°04 PK1+200 au PK1+500	61.3	62.5	34.9	2.33	
Micaschiste	N°01 : PK4+820 au PK5+340	61.5	63	39.4	2.80	2.88
	N°02 : PK4+820 au PK5+340	141	147.1	92	2.92	
	N°03 : PK4+820 au PK5+340	111.8	115.3	73.4	2.94	
	N°04 PK4+820 au PK5+340	38.5	39.1	25.1	2.89	
Gneiss	N°01 : PK4+900 au PK5+600	77.8	83.9	47.2	2.61	2.62
	N°02 : PK4+900 au PK5+600	56.8	60.5	34.7	2.62	
	N°03 PK4+900 au PK5+600	59	61.8	36.3	2.64	
	N°04 PK4+900 au PK5+600	78.4	81.3	48.2	2.62	
Marbre	N°01 : PK6+400 au PK6+600	62.1	64.8	37.6	2.57	2.57
	N°02 : PK6+400 au PK6+600	45.5	47.3	27.3	2.54	
	N°03 : PK6+400 au PK6+600	36.1	38.4	21.9	2.6	
	N°04 : PK6+400 au PK6+600	46.4	50.3	27.8	2.57	

IV.2.2.3 La masse volumique des particules solide ρ_s méthode du pycnomètre [NF P94- 054]

a) Définition

Elle est le quotient de la masse sèche de ces particules M_s par leur volume V_s . Vu l'hétérogénéité du sol, l'essai permet la détermination de la masse volumique moyenne des particules et éléments solides constituant un échantillon.

b) Exécution de l'essai

On prend une quantité de la roche concassée à la main et le passer au tamis 2mm, ensuite on prend 50g du tamisa et le mettre dans une coupelle de masse connue M. l'ensemble est introduit dans une étuve réglée à 105°C. On pèse le pycnomètre et son bouchon secs et propre M1 puis on pèse le pycnomètre et son bouchon plus l'échantillon M2. Le ballon du pycnomètre est ensuite rempli d'eau distillée ou déminéralisée maintenue à la température ambiante et pesé M3. et on pèse M4 qui est la masse du pycnomètre avec son bouchon plus eau.

Dans cette expérience on a opté pour la méthode d'élimination des bulles d'air par ébullition à la plaque chauffante. La masse volumique des particules solides est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w \frac{M_2 - M_1}{M_4 + M_2 - M_1 - M_3}$$

Avec :

M_1 : Masse du pycnomètre vide.

M_2 : Masse du pycnomètre avec échantillon.

M_3 : Masse du pycnomètre + eau + échantillon.

M_4 : Masse du pycnomètre plein d'eau.

ρ_w : Masse volumique de l'eau égale à $1(g/cm^3)$.

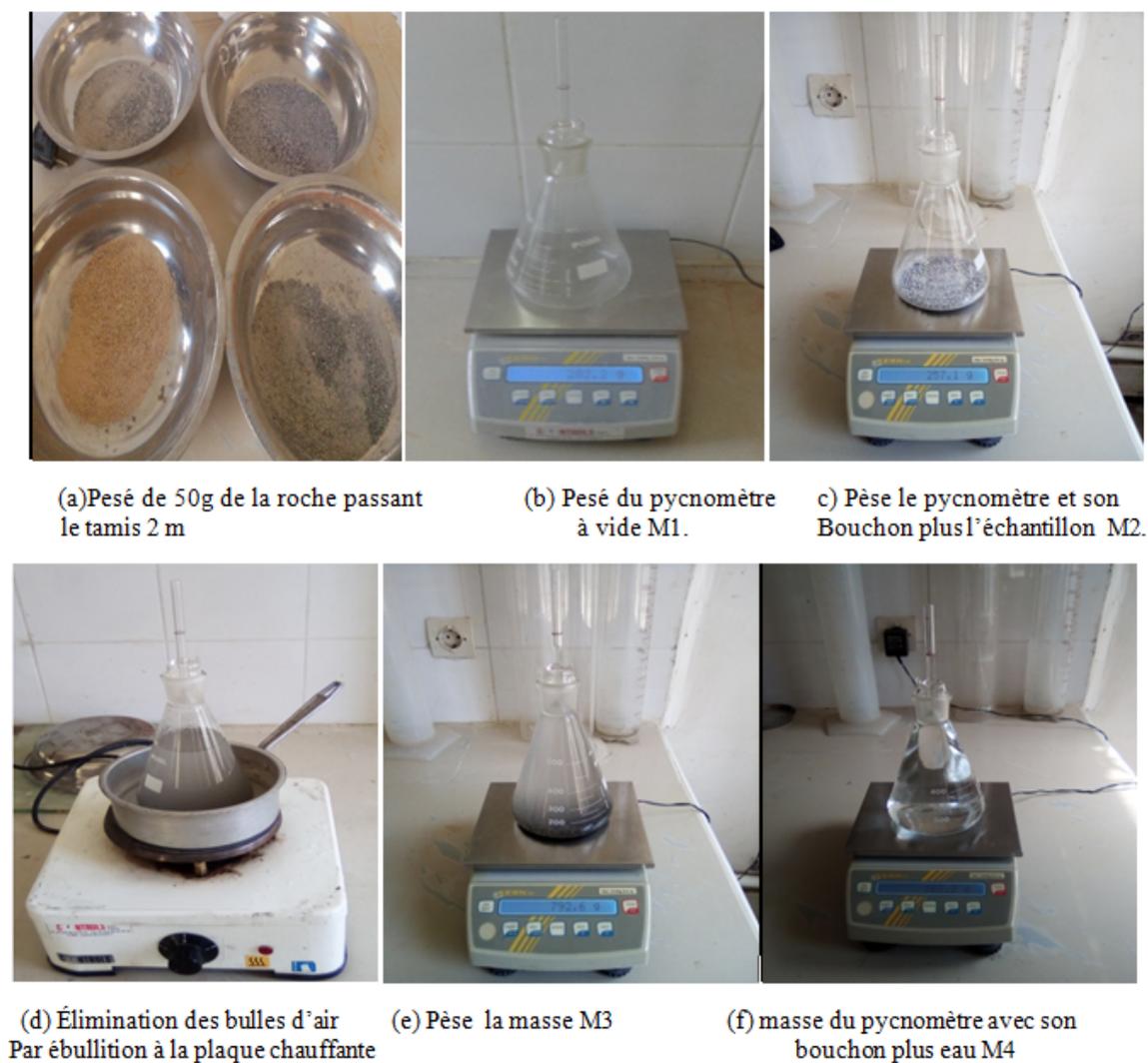


Figure IV.2 – Equipement de l'essai.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.6 suivant :

Tableau IV.6 – Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides.

Roche	M1	M2	M3	M4	ρ_s (g/cm ³).
Grès	205.9	256.2	782.8	754.8	2.25
Micaschiste	206.9	256.8	789.5	762.8	2.15
Gneiss	205.9	256	784.8	754.8	2.49
Marbre	206.9	257	788.9	762.8	2.08

IV.2.3 Indice des vides et porosité

IV.2.3.1 Indice des vides (e)

L'indice des vides est défini comme étant le rapport entre le volume des vides et le volume des particules solides. Il permet de savoir si notre matériau est serré ou lâche. Il est déterminé par la relation suivante :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés (ρ_d et ρ_s) selon la formule :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

Vu que les masses volumiques sont déterminées, on déduit l'indice des vides par la deuxième relation. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.7 suivant :

Tableau IV.7 – Résultats de la détermination de l'indice des vides

Roche	l'indice des vides e(%)
Grès	6.13
Micaschiste	0.47
Gneiss	2.04
Marbre	0.97

IV.2.3.2 Porosité n

Dans les roches la matière minérale forme un squelette solide qui ne remplit pas tout l'espace, et dont le complément est appelé vide. La proportion de vide est appelée porosité. La forme des vides, leur taille, leur répartition, leurs liaisons ou au contraire l'isolement de certains, influent sur le comportement mécanique du massif rocheux. C'est le rapport du volume des vides V_v de la roche au volume total V :

$$n = \frac{V_v}{V}$$

La porosité varie de quelque % à plus de 40 % dans les roches sédimentaires, dans les roches magmatiques, elle est plus faible, souvent inférieure à 1 %.

La porosité a une signification analogue à celle de l'indice des vides. Elles sont liées par la formule :

$$n = \frac{e}{(e + 1)}$$

Selon la porosité, les roches sont classées en [30] :

- Roches de faible porosité : $0 < n < 5$ %.

- Roches de porosité moyenne : $5 < n < 10$ %.
- Roches de porosité élevée : $10 < n < 20$ %.
- Roches de grande porosité : $n > 20$ %.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.8 suivant :

Tableau IV.8 – Résultats de la détermination de la Porosité.

Roche	Porosité (n)
Grès	5.77
Micaschiste	0.46
Gneiss	1.99
Marbre	0.96

✓ **Interprétation des résultats.**

On constate que les roches (Micaschiste, marbre, gneiss) sont des roches de faible porosité, le grès est une roche de porosité moyenne.

IV.3 Les propriétés mécaniques des roches

IV.3.1 Définition de la rupture.

La résistance au cisaillement d'un sol est la résistance interne par unité de surface qu'un sol peut offrir pour résister à une rupture ou à un cisaillement le long d'un plan. La contrainte appliquée qui peut causer la rupture doit être déterminée et elle est située sur un plan critique donné → Cercle de Mohr [4].

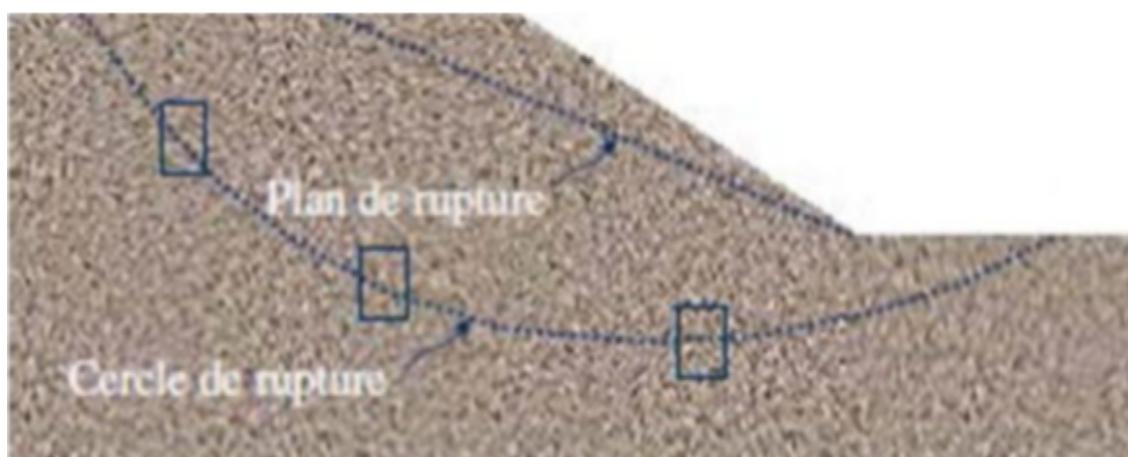


Figure IV.3 – Rupture d'un sol [4].

IV.3.2 Critère de Mohr Coulomb

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité). Les trois autres sont (c, σ et Φ) respectivement, la cohésion, l'angle de frottement et l'angle de dilatance. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité. Le critère de Mohr-Coulomb s'exprime sous la forme :

$$\tau = c + \sigma \tan \Phi$$

τ : contrainte de cisaillement

c : cohésion

σ : contrainte normale

Φ : angle de frottement interne.

✓ En ce qui concerne le **critère de rupture Mohr coulomb** :

Pour des échantillons d'une même roche, on fait varier expérimentalement σ_1 et σ_3 et on note les valeurs provoquant la rupture et l'angle de rupture correspondant.

La représentation graphique dite du Cercle de Mohr situe le domaine de la rupture par rapport aux valeurs des contraintes σ_1, σ_3 et à la contrainte tangentielle τ exercée sur le plan de rupture. Par convention, on prend des valeurs négatives de σ_3 dans le cas de la traction. Le cercle de Mohr permet donc de prévoir la résistance à la rupture d'un matériau, les conditions limites de la rupture et l'angle de rupture correspondant pour des valeurs données de σ_1, σ_3 et τ [10].

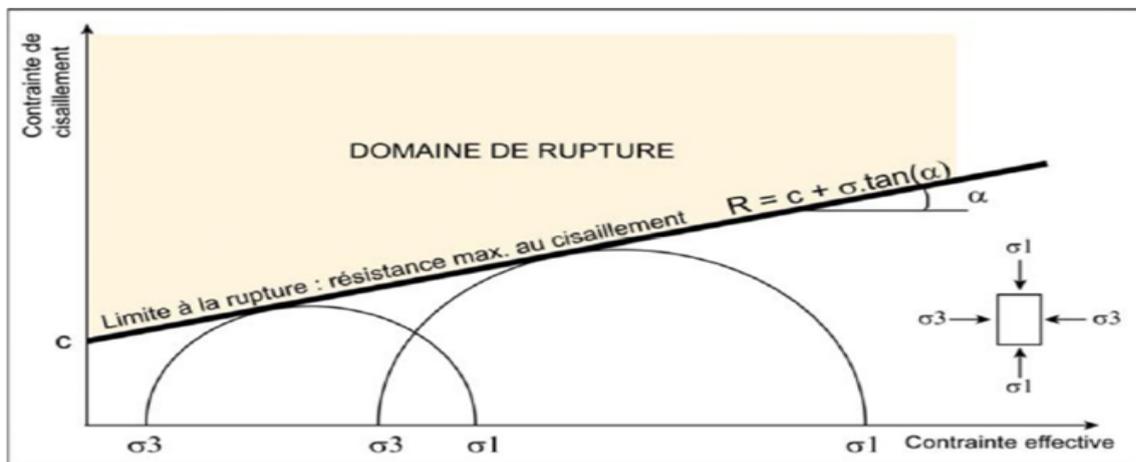


Figure IV.4 – Présentation graphique du cycle de mohr.

✓ **Module d'Young** :

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne.

Le module de Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau (il doublerait donc de longueur), si l'on pouvait l'appliquer réellement : dans les faits, le matériau se déforme de façon permanente, ou se rompt, bien avant que cette valeur soit atteinte [10]

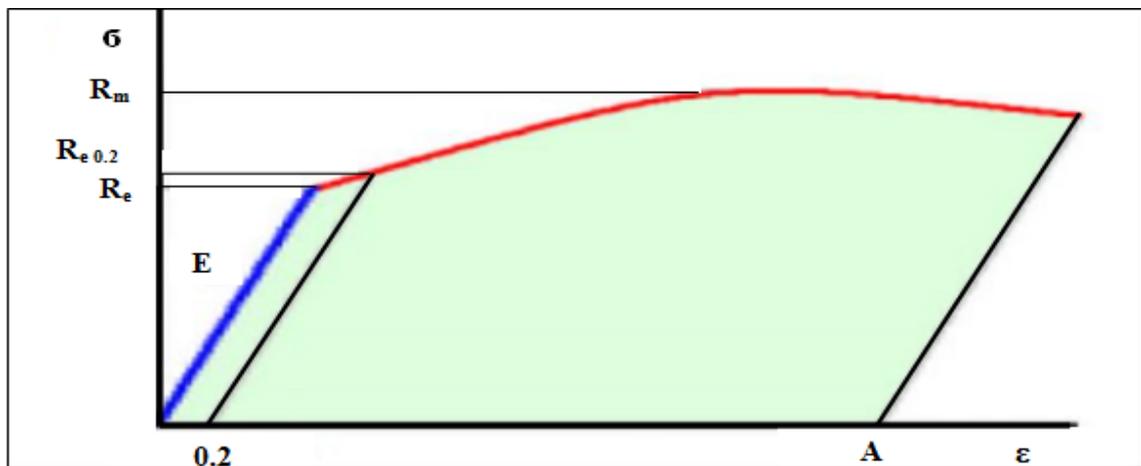


Figure IV.5 – Diagramme contrainte-déformation [10].

Avec :

σ est la contrainte (en unité de pression).

E est le module de Young (en unité de pression).

ϵ est l'allongement relatif, ou déformation (adimensionnel).

IV.3.3 Le Critère de Hoek et Brown

Lorsqu'on étudie un massif rocheux fracturé, on se rend compte assez rapidement des limitations imposées par les modèles du type linéaire Mohr-Coulomb. En effet, les tests effectués en laboratoire (essais de résistance, détermination des paramètres mécaniques) permettent en général de dresser un profil de résistance de la matrice rocheuse, qui ne correspond pas à celui du massif rocheux in situ.

Pour rendre compte du comportement réel du massif rocheux, il est donc nécessaire d'inclure aux modèles constitutifs l'influence des discontinuités, la fracturation interne ayant un effet notable sur la réponse mécanique des matériaux. Hoek et Brown (1980) ont proposé une technique permettant d'obtenir une estimation de la résistance mécanique pour des roches fracturées, basée sur une évaluation de l'assemblage et des conditions de surface entre les blocs rocheux. Conçu initialement pour l'étude des milieux rocheux moyennement à fortement fracturés, le critère non linéaire (purement empirique) de Hoek-Brown est sensé décrire une grande variété de roches et massifs rocheux.

Du fait de l'absence d'autres alternatives dans l'étude des milieux rocheux fracturés, ce critère a été fréquemment utilisé et il a été révisé à plusieurs reprises afin de pouvoir accroître son domaine d'application.

Désormais, le critère de rupture généralisé de Hoek-Brown (1994) permet de décrire le comportement des roches de très mauvaise qualité, qui pourraient presque être classées en tant que sols.

Le principe de ce critère de rupture est dans le fait que la contrainte de cisaillement tangentielle τ appliquée sur une facette augmente moins vite avec la contrainte normale σ_N qu'avec le critère habituel de Mohr-Coulomb [10].

$$\tau = A.Rc(\sigma_N Rc - T)^B$$

Où :

- A et B sont des constantes qui définissent la forme de l'enveloppe dans le plan de Mohr.

- R_c : la résistance à la compression unie axiale de la roche.

- τ : la résistance au cisaillement.

- σ_N : la contrainte normale.

- T est lié au massif rocheux et qui se calcule par la formule suivante :

$$T = ((m - \sqrt{m^2 - 4s}))$$

Avec :

- m : est un paramètre de forme.

- s : le coefficient de fracturation.

Tableau IV.9 – Les valeurs de la constante du matériau m de quelques types de roches.

Valeur de m	Types de roches	Exemple de roches
≈ 7	Roches carbonatées avec clivage cristallin bien développé	Dolomite, Calcaire, Marbre
≈ 10	Roches sédimentaires à grain fin et à faible degré métamorphique	Silts, Schiste, Ardoise
≈ 15	Roches sédimentaires à grain grossier et clivage cristallin faiblement développé	Grès, Quartzite
≈ 17	Roches cristallines ignées à grain fin	Andésite, Dolérite, Diabase, Rhyolite, Basalte.
≈ 25	Roches ignées à grain grossier et roches Métamorphiques	Gabbro, Diorite, Granite, Gneiss.

IV.3.4 Résistance en compression

IV.3.4.1 Essai de compression uni axiale [NF P94-420]

Dans cet essai, l'échantillon analysé est pris sous formes : éprouvette cubique, avec deux faces planes, lisses et parallèles obtenues par une rectification soignée. L'échantillon est ensuite placé entre les plateaux d'une presse.

On appelle résistance à la compression (notée R_c) la contrainte maximale supportée par l'échantillon avant la rupture lors d'un essai de compression [28].

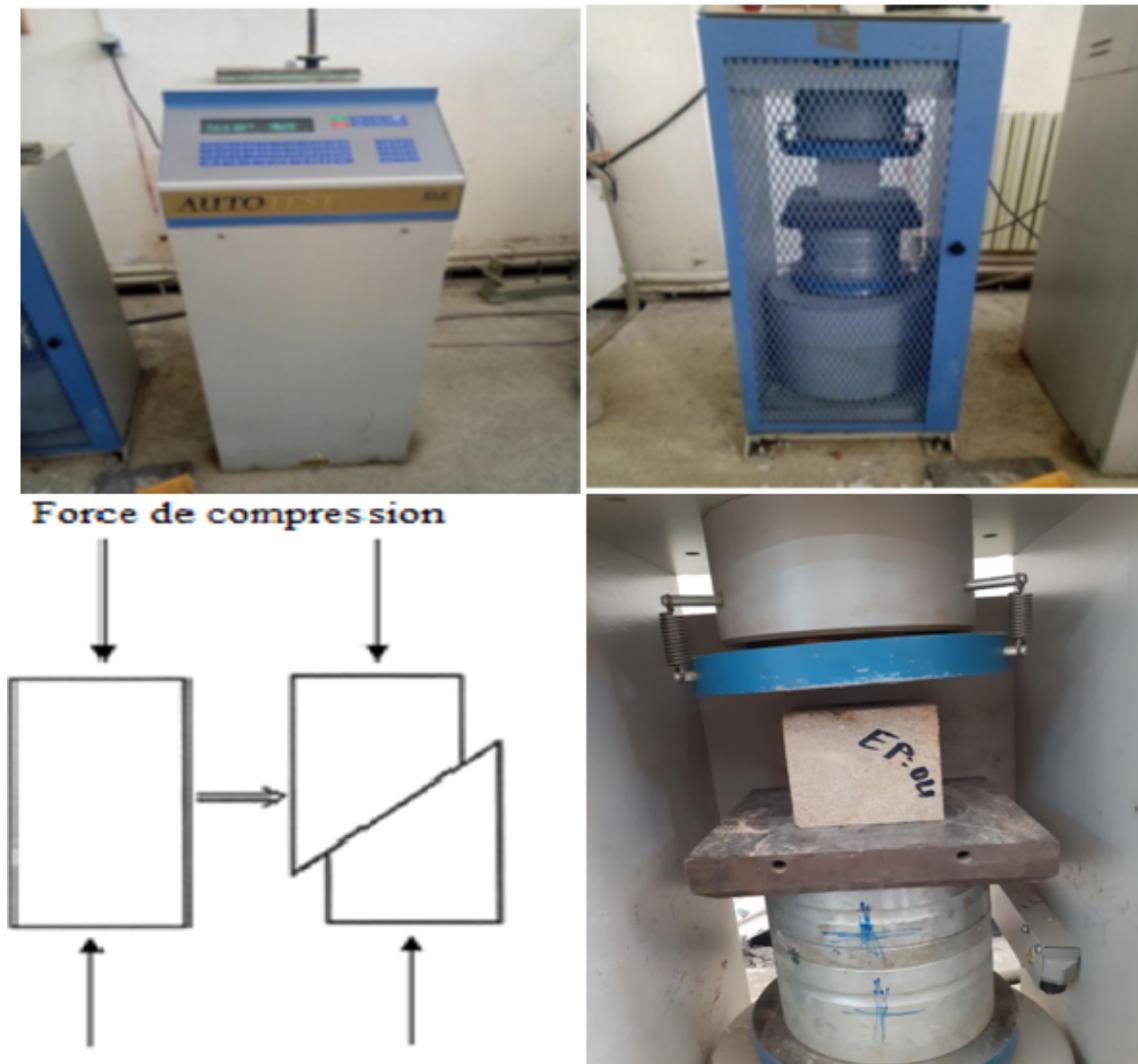


Figure IV.6 – Le dispositif expérimental.

La résistance à la compression est donnée par la formule Suivante :

$$R_c = FS(MPa)$$

Avec :

- F : effort (charge) maximale atteinte (juste avant la rupture) ;
- S : section ou surface sur laquelle on applique l'effort.

Les images suivantes, montre les résultat des essais de compression qu'on a effectué sur les roches de notre études.



Figure IV.7 – Essai de compression simple sur l'éprouvette cubique de grès (laboratoire Béton UMMTO).



Figure IV.8 – Essai de compression simple sur l'éprouvette cubique de marbre(laboratoire Béton UMMTO).



Figure IV.9 – Essai de compression simple sur l'éprouvette cubique de mica-schiste(laboratoire Béton UMMTO).



Figure IV.10 – Essai de compression simple sur l'éprouvette cubique de gneiss (laboratoire Béton UMMTO).

✓ **Expression des résultats**

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.10 :

Tableau IV.10 – La résistance de nos échantillons à la compression

Roches	L'échantillon	Dimension			Charge F (KN)	La résistance à la compression RC (MPa)
		A	B	H		
Grès	Eprouvette N° : 01	10	10	10	184.4	18.44
	Eprouvette N° : 02	10	10	10	109.9	10.99
	Eprouvette N° : 03	10	10	10	722.6	72.26
	Eprouvette N° : 04	10	10	10	256.9	25.69
	Eprouvette N° : 05	10	10	10	673.2	67.32
	Eprouvette N° : 06	10	10	10	214.2	21.42
	Eprouvette N° : 07	10	10	10	244.3	24.43
	Eprouvette N° : 08	10	10	10	531.9	53.19
Gneiss	Eprouvette N° : 01	10	10	10	364.3	36.43
	Eprouvette N° : 02	10	10	10	479	47.90
	Eprouvette N° : 03	10	10	10	604.3	60.43
	Eprouvette N° : 04	10	10	10	369.3	36.93
	Eprouvette N° : 05	10	10	10	138	13.8
Micaschiste	Eprouvette N° : 01	10	10	10	195.7	19.57
	Eprouvette N° : 02	10	10	10	324.9	32.49
	Eprouvette N° : 03	10	10	10	435	43.5
	Eprouvette N° : 04	10	10	10	339.1	33.91
	Eprouvette N° : 05	10	10	10	329.1	32.91
Marbre	Eprouvette N° : 01	10	10	10	139.3	13.93
	Eprouvette N° : 02	10	10	10	166	16.60
	Eprouvette N° : 03	10	10	10	131.5	13.15
	Eprouvette N° : 04	10	10	10	162.8	16.28
	Eprouvette N° : 05	10	10	10	93.5	9.35

IV.3.4.2 Traitement statistique de la valeur de la résistance à la compression

Introduction

Les paramètres géotechniques mesurés in situ et en laboratoire présentent une dispersion dans l'espace qui est à l'origine d'incertitudes sur les grandeurs représentatives de ces paramètres et sur la représentativité des résultats finaux des calculs géotechniques. Si la mesure, expression d'une vérité unique en un point, est bien déterministe, la valeur représentative de ce paramètre sur le volume intéressé par une fondation est inconnue et un recours aux méthodes statistiques de l'estimation semble indispensable.

Pour ce, il faut donc trouver une valeur représentative de la résistance mécanique à la compression (et à la traction) pour chaque massif rocheux étudié. Cette valeur sera par la suite utilisée dans le calcul des différents paramètres de classification de ces derniers Pour chaque type de roche on a donc calculé la moyenne, la médiane, l'écart type et la variance (Tableau IV.11 et Tableau IV.13)

Tableau IV.11 – Traitement statistique des valeurs de la Résistance à la compression.

Roche	Moyenne	Médiane	écart-type	variance	La valeur prise
Grès	36,71	25.06	5.82	162.2	25.06
Gneiss	39.09	36.93	1.08	303.85	36.93
Micaschiste	32.47	32.91	0.217	234.40	32.04
Marbre	13.86	13.93	0.034	42.70	13.79

Le tableau IV.12 donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la Compression.

Tableau IV.12 – Classification des roches en fonction de la résistance à la compression [30].

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

Tableau IV.13 – Classification du massif rocheux de la déviation et de la modernisation de la RN25 en fonction de la résistance à la compression

Roche	Rc (MPa)	Qualité de la roche
Grès	25.06	Moyenne
Gneiss	36.93	Moyenne
Micaschiste	32.04	Moyenne
Marbre	13.79	Faiblement résistantes

✓ **Synthèse et conclusion** D'après les résultats obtenus dans les tableaux ci-dessus, on constate que les différents types de la roche Micaschiste, Grès et Gneiss sont classés comme étant une roche moyennement résistante par contre le Marbre est faiblement résistant.

IV.3.5 La résistance à la traction

La résistance à la traction est un excellent indice de qualité des matériaux fragiles comme les roches. La rupture se produit suivant le mode I de la mécanique de

la rupture, le plus dangereux et le plus redouté pour un matériau fragile. Il est caractérisé par l'ouverture directe des fissures qui se développe à partir des défauts existants, fissures intra ou inter cristallines, cavités, lacunes ou contacts imparfaits entre agrégats et liants.

La résistance à la traction reste cependant l'une des caractéristiques des moins bien définies, notamment à cause de l'absence d'une technique expérimentale qui soit à la fois économique et fiable tout en restant parfaitement rigoureuse au point de vue mécanique.



Figure IV.11 – Machine de l'essai de traction par flexion (Laboratoire de Béton UMMTO).

IV.3.5.1 Essai de traction par flexion [NF P 18-407]

a) Flexion quatre points

La flexion Quatre-points, représente le cas d'une poutre posée sur deux appuis simples (appuis linéaires rectilignes) et soumise deux charges concentrées appliquées au milieu de la poutre avec elle aussi un contact simple.



Figure IV.12 – Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (4 points).

La résistance à la flexion (4 points) est calculée selon l'équation Générale :

$$Rf = \frac{Ff * l}{b * h^2}$$

Avec :

- Rf : Résistance à la flexion (4 pts) en [MPa].
- Ff : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion [KN].
- L : Longueur qui sépare les deux appuis.
- b : Côte de l'éprouvette.

b) Flexion à trois points

La flexion à trois points est un essai mécanique classique. Il représente le cas d'une poutre posée sur deux appuis simples (appuis linéaires rectilignes qui, dans un problème plan, équivalent à une liaison ponctuelle) et soumise à une charge concentrée appliquée au milieu de la poutre avec elle aussi un contact simple. Dans notre étude on a procédé à cet essai (flexion à trois points) au niveau du laboratoire de RDM.



Figure IV.13 – Essai de traction par flexion à trois points sur les roches étudiées.

La résistance à la flexion (3 points) est calculée selon l'équation Générale :

$$Rf = \frac{1.5 * Ff * l}{b * h^2}$$

Dans le cas b= h d'où l'équation devient :

$$Rf = \frac{1.5 * Ff * l}{b^3}$$

Avec :

- Rf : Résistance à la flexion (3 pts) en [MPa].
- Ff : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion [KN].
- l : Longueur qui sépare les deux appuis égale à 110mm.
- b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm. ✓ **Expression des résultats**

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.14 suivant :

Tableau IV.14 – Les résultats des essais de la résistance à la traction par flexion trois points.

Roche		Dimension			Charge Ff [KN]	Résistance à la flexion Rf [MPa]
		b	h	l		
Grès	01	40	40	110	2.228	5,74
	02	40	40	110	2.08	5,36
	03	40	40	110	1.204	3,10
	04	40	40	110	2.199	5,66
	05	40	40	110	2.466	6,35
	06	40	40	110	1.127	2,90
	07	40	40	110	1.318	3,39
	08	40	40	110	1.314	3,38
Micaschiste	01	40	40	110	6.986	18,01
	02	40	40	110	3.401	8,76
	03	40	40	110	1.774	4,57
	04	40	40	110	4.081	10,52
	05	40	40	110	0.581	1,49
Gneiss	01	40	40	110	7.174	18,49
	02	40	40	110	1.161	2,99
	03	40	40	110	0.483	1,24
	04	40	40	110	3.648	9,40
	05	40	40	110	0.452	1,16
	06	40	40	110	0.237	0,61
	07	40	40	110	5.21	13,43
	08	40	40	110	6.597	17
Marbre	01	40	40	110	2.056	5,30
	02	40	40	110	0.215	0,55
	03	40	40	110	1.035	2,66
	04	40	40	110	1.404	3,61
	05	40	40	110	0.582	1,50
	06	40	40	110	1.827	4,71
	07	40	40	110	1.855	4,78

IV.3.5.2 Traitement statistique des données de la résistance à la traction par flexion

Le tableau IV.15 suivant résume le traitement statistique des résultats obtenues des essais effectués sur nos échantillons.

Tableau IV.15 – Traitement statistique des valeurs de la Résistance à la traction.

Roche	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Variance	Valeur prise
Grès	4.96	5.51	0.27	5.53	4.42
Micaschiste	9.05	8.76	0.14	17.09	8.76
Gneiss	5.17	1.24	1.96	2.91	1.24
Marbre	3.45	3.61	0.081	2.65	3.29

Lassification des roches en fonction de la résistance à la traction et Classification du massif rocheux de la déviation de RN25 en fonction de la résistance à la traction sont présentées dans les tableaux IV.16 et IV.17 respectivement [30].

Tableau IV.16 – Classification des roches en fonction de la résistance à la traction [30].

Roches	Faiblement Résistantes	Moyennes	Résistantes	Très résistantes
Rt (MPa)	0,40	1,50	4,00	>20

Tableau IV.17 – Classification du massif rocheux de la déviation de RN25 en fonction de la résistance à la traction.

Roche	Rt(MPa)	Qualité de la roche
Grès	4.42	Résistantes
Micaschiste	8.76	Résistantes
Gneiss	1.24	Faiblement Résistantes
Marbre	3.29	Moyennes

✓ Synthèse et conclusion

D'après les résultats obtenus dans les tableaux ci-dessus, on constate que le grès, Micaschiste et Marbre sont classés comme étant une roche résistante, par contre les Gneiss sont classés comme étant une roche faiblement résistante.

IV.4 Conclusion

De la prédiction d'éventuels problèmes de stabilité vis-à-vis des massifs rocheux, la composition minéralogique, les propriétés physiques et mécaniques sont toujours déterminés suite à des essais effectués au laboratoire et des formules empiriques mais aussi et inévitablement sur la base des critères de ruptures.

Chapitre V

Caractérisation et classification des massifs rocheux de la déviation de la modernisation de la RN25

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons le sujet des méthodes de classification géomécaniques des massifs rocheux. En premier lieu, nous présentons les types de classification existante, puis nous exposons quatre classifications géomécaniques largement utilisées dans le domaine de la Mécanique des Roches (RQD, RMR, Q système, GSI) ainsi que les SMR qui détermine la stabilité des pentes et suggère des soutènements selon leurs classes, Les avantages et les limitations de chacune de ces dernières sont ensuite détaillés.

Nous présentons ce chapitre dans l'objectif de faire apparaître les avantages que peuvent apporter les méthodes d'homogénéisation numériques par rapport aux méthodes d'identification des paramètres mécaniques que nous avons déjà mentionnées.

V.2 Etude des discontinuités

L'acquisition de données liées aux discontinuités améliorera l'interprétation et la compréhension de la structure et des conditions géotechniques de la masse rocheuse, cette activité est donc fondamentale à la planification des travaux d'excavation. Pour obtenir les données qu'on va les voir après on a utilisé :

- Une boussole géologique ;
- GPS et autres appareils de mesure/localisation ;
- Une règle pliante ;
- Un appareil photo ;
- Un marteau ;
- Un cordeau ;
- Des sacs à échantillons.

V.2.1 Caractéristiques rocheuse

Les caractéristiques de la masse rocheuse de l’affleurement. Décrive le principal type de roche, le degré d’altération, les caractéristiques de la stratification et estimez la résistance de la roche. Le rapport doit reprendre :

- **Type de roche**
On note les principaux types de roches observées dans l’affleurement. En utilisant les options données.
- **Caractéristiques de la stratification rocheuse**
Où on fait la distinction entre :
 - Massivité (pas de stratification),
 - Stratification irrégulière,
 - Stratification régulière et ondulation.
- On estime la **résistance** de la roche conformément au tableau V. 1
- **Degré d’altération de la roche** suivant la classification du tableau V.2

Tableau V.1 – Critère d’estimation de la résistance de la roche.

Degré	Terme	Critère d’évaluation	Exemples
R6	Extrêmement Résistante	Le marteau de géologue ne fait qu’ébrécher l’échantillon	Basalte, diabase, gneiss, granite, quartzite frais
R5	Très résistante	L’échantillon doit recevoir de nombreux coups de marteau de géologue avant de se fracturer	Amphibolite, grès, basalte, gabbro, gneiss, granodiorite, calcaire, marbre, rhyolite, tuf
R4	Résistante	L’échantillon doit recevoir plus d’un coup de marteau de géologue avant de se fracturer	Calcaire, marbre, phyllithe, grès, schiste métamorphique, schiste sédimentaire, grès fin
R3	Moyennement Résistante	L’échantillon ne peut être éraflé ou pelé avec un canif, mais peut être fracturé d’un seul coup de marteau de géologue	Argilite, charbon, béton, schiste métamorphique, schiste sédimentaire, grès fin
R2	Friable	L’échantillon ne peut être que difficilement écaillé avec un canif; réalisation d’une marque superficielle en le frappant d’un coup sec avec la pointe d’un marteau de géologue	Craie, halite, potasse
R1	Très friable	L’échantillon s’effrite s’il est frappé d’un coup sec avec la pointe d’un marteau de géologue; il peut être écaillé à l’aide d’un canif	Roche extrêmement altérée/ Dégradée
R0	Extrêmement Friable	L’échantillon se marque sous la pression de l’ongle	Salbande rigide

Tableau V.2 – Degrés d'altération de la roche.

Degré	Terme	Description
I	Fraiche	Aucun signe d'altération du matériau rocheux. Légère décoloration au niveau des principales surfaces de discontinuité.
II	Légèrement altérée	La décoloration indique une altération du matériau rocheux et une discontinuité de sa surface. L'ensemble du matériau rocheux peut être décoloré par l'altération et donc être un peu plus fragile que la normale.
III	Modérément altérée	Moins de la moitié du matériau rocheux s'est décomposé et/ou désagrégé en sol résiduel. Présence de roche fraîche ou décolorée en continu ou en boules.
IV	Très altérée	Plus de la moitié du matériau rocheux s'est décomposé et/ou désagrégé en sol résiduel. Présence de roche fraîche ou décolorée de façon discontinue ou en boules
V	Complètement altérée	L'ensemble du matériau rocheux s'est décomposé et/ou désagrégé en sol résiduel. La structure initiale de la masse demeure en grande partie intacte.
VI	Sol résiduel	L'ensemble du matériau rocheux s'est transformé en sol résiduel. La structure de la masse est détruite. On observe un important changement de volume, mais le sol n'est pas essentiellement formé sur des matériaux transportés.

V.2.2 Mesure de l'orientation des discontinuités

L'orientation d'une discontinuité est définie par sa direction de pendage (azimut) et son angle de pendage. L'azimut et le pendage sont mesurés à l'aide d'une boussole géologique. La direction de pendage ou l'azimut est la direction de la ligne d'inclinaison maximale. Sa trace horizontale est mesurée. La direction de pendage est toujours perpendiculaire à la direction d'un plan. Le pendage est l'angle maximal d'un plan par rapport à l'horizontale. Le pendage et la direction de pendage sont mesurés en degrés (°).

On mesure l'orientation des éléments structuraux autant que possible. Comme leurs caractéristiques sont contenues dans l'affleurement solide plutôt dans la roche allochtone ou flottante, il est important de déterminer l'orientation des discontinuités (foliation, diaclases, failles et structures) aussi souvent que possible. Pour chaque élément.

On note toujours :

- Le type : d = diaclase, s = plan de stratification, f= plan de faille.

Le pendage et direction de pendage - au moins 7 mesures par ensemble. On note ces données sous la forme suivante : "direction de pendage/pendage".



Figure V.1 – L'orientation des ensembles de discontinuités.

V.3 La présentation des données et des mesures

V.3.1 Le premier affleurement : Micaschiste

La figure suivante présente le premier affleurement.

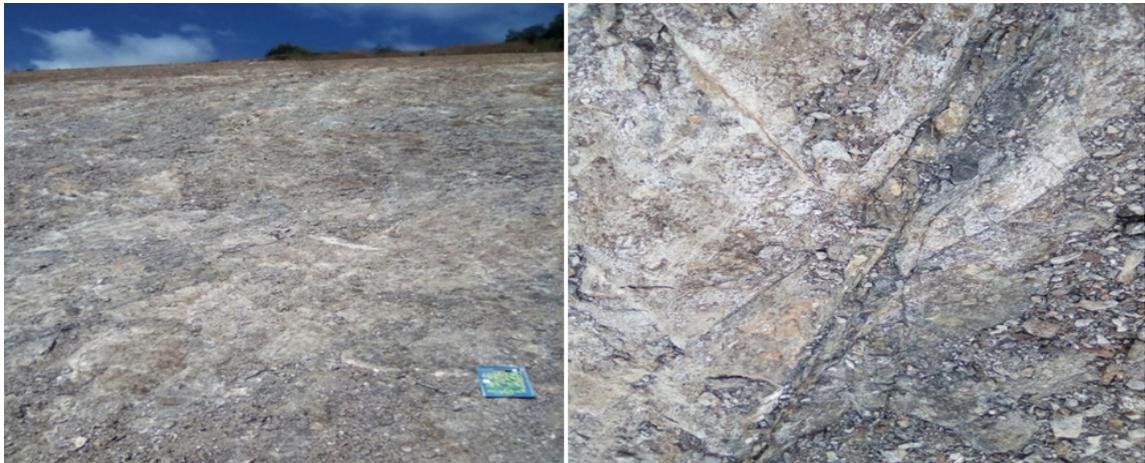


Figure V.2 – Photos du premier affleurement

le tableau suivant montre les mesures et remarques que nous avons pris sur le premier massif rocheux de micaschiste.

Tableau V.3 – Mesure de l'orientation des discontinuités

Localisation / ID	X:	Y:	DATE: //2022
Type de roche	Caractéristiques de la stratification rocheuse	La résistance de la roche(R0-R6)	Le degré d'altération de la roche
Micaschiste	Massivité	R4ouR3	II

	Type	Dip Dir [°]	Dip [°]	Espacement [m]	Persistance [m]	Rugosité	JRC	Ouverture [mm]	Remplissage
D1	J			1.450	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	4-6	9	Quartz
D2	F			0.400	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	4-6	10	Quartz
D3	J			0.300	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	4-6	15	Quartz

D1	D2	D3
145/39 SW	220/60NW 220/30NW	99/80SW 111/82SW 110/85SW 300/82SW

✓ **La projection stéréographique** : En géométrie et en cartographie, la projection stéréographique est une projection cartographique azimutale permettant de représenter une sphère privée d'un point sur un plan.

On convient souvent que le point dont on prive la sphère sera un des pôles de celle-ci ; le plan de projection peut être celui qui sépare les deux hémisphères, nord et sud, de la sphère, qu'on appelle plan équatorial. On peut également faire une projection stéréographique sur n'importe quel plan parallèle au plan équatorial pourvu qu'il ne contienne pas le point dont on a privé la sphère.

Soit S le point situé au pôle sud de la sphère à projeter. L'image Z' d'un point Z de cette sphère sera définie par l'intersection entre le plan équatorial et la droite (SZ), (Cette projection revient à observer la sphère à partir du pôle sud).

Deux propriétés importantes :

- Tout cercle sur la sphère hormis ceux passant par le pôle sud sera transformé en un autre cercle dans le plan équatorial ;
- Les angles sont conservés pendant la transformation (transformation conforme). Grâce au logiciel Stereonet 9.5 on a pu représenter les discontinuités et faire une

projection stéréographique qui nous permet de définir le vecteur moyen afin qu'on puisse déterminer le SMR (Slope Mass Rating).

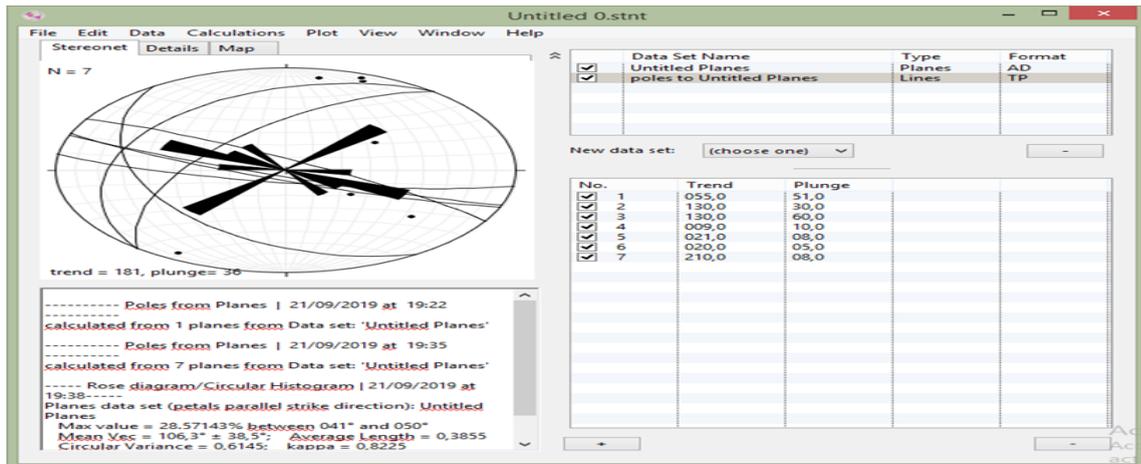


Figure V.3 – Projection stéréographique des discontinuités du massif de Micaschiste.

D'après la projection stéréographique on a obtenu les résultats suivant :

- La valeur du vecteur moyen (des discontinuités) est de direction 181°
- Sa plongée est de 36°

V.3.2 Le deuxième affleurement : Grès

La figure ci-dessous présente l'affleurement des grès



Figure V.4 – l'affleurement des grès.

Nous avons pris ces mesures et ces remarques sur le premier massif rocheux de Grès :

Tableau V.4 – Mesure de l'orientation des discontinuités

Localisation / ID	X:	Y:	DATE: //2022
Type de roche	Caractéristiques de la stratification rocheuse	La résistance de la roche(R0-R6)	Le degré d'altération de la roche
Grès	Stratification régulière et ondulation .	R4ouR5	II

	Type	Dip Dir [°]	Dip [°]	Espacement [m]	Persistance [m]	Rugosité	JRC	Ouverture [mm]
D1	J			3.20	Persistance élevée 10-20	Légèrement rugueuse	2-4	1
D2	J			2.20	Persistance élevée 10-20	Légèrement rugueuse	2-4	2
D3	J			2.00	Persistance élevée 10-20	Légèrement rugueuse	2-4	2

D1	D2	D3
300/80 NW	330/45NW 300/40NW	220/80SW 210/85SW 210/89SW 210/87SW

✓ **La projection stéréographique** : La figure suivante illustre la projection stéréographique sous le logiciel Stereonet 9.5.

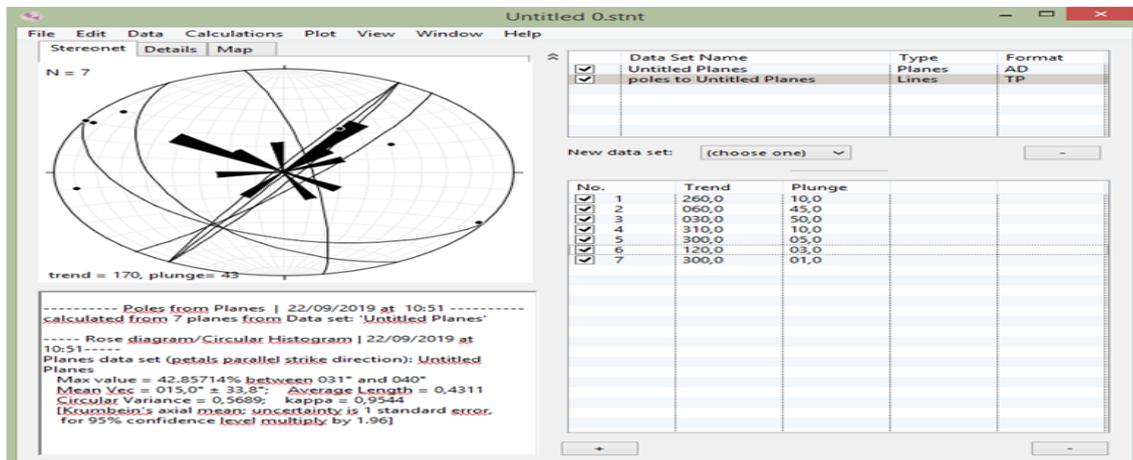


Figure V.5 – Projection stéréographique des discontinuités du massif de Grès.

D'après la projection stéréographique on a obtenu les résultats suivant :

- La valeur du vecteur moyen (des discontinuités) est de direction 170°
- Sa plongée est de 43°

V.3.3 Le troisième affleurement : Marbre



Figure V.6 – l'affleurement des marbres.

Nous avons pris ces mesures et ces remarques sur le premier massif rocheux de Marbre :

Tableau V.5 – Mesure de l'orientation des discontinuités

Localisation / ID	X:	Y:	DATE: //2022
Type de roche	Caractéristiques de la stratification rocheuse	La résistance de la roche(R0-R6)	Le degré d'altération de la roche
Marbre	Stratification régulière et ondulation	R4ouR5	IV

	Type	Dip Dir [°]	Dip [°]	Espacement [m]	Persistance [m]	Rugosité	JRC	Ouverture [mm]	Remplissage
D1	F			3.60	Persistance très élevée > 20	Rugueuse	4-6	2.5	Calcite
D2	J			3.00	Persistance très élevée > 20	Rugueuse	4-6	1	Calcite
D3	J			0.23	Persistance très élevée > 20	Rugueuse	4-6	1.5	Calcite
D4	J			0.50	Persistance très élevée > 20	Rugueuse	4-6	1	Calcite
D1		D2		D3		D4			
170/80ES		40/30ES		40/31NE 35/20NE 40/28NE		55/80NE 100/70NE			

✓ La projection stéréographique

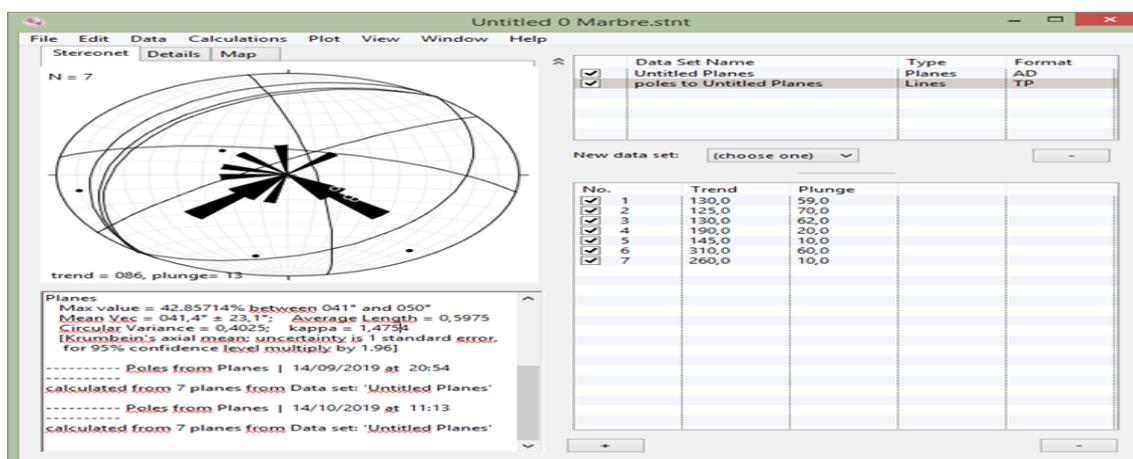


Figure V.7 – Projection stéréographique des discontinuités du massif de Marbre.

V.4 Classification géomécaniques des massifs rocheux de la déviation et de la modernisation de la RN25

V.4.1 Système du RQD (Rock Quality Designation)

Dans le but de la reconnaissance géologique des terrains ou bien l'identification de leurs nature géotechnique (Etat de fracturation, RQD, caractérisation mécanique, etc.) des sondages d'exploration ont été réalisés sur le site de la déviation et de la modernisation de la RN25.

Les valeurs du RQD pour les sondages réalisés sur le site d'étude, les valeurs obtenues pour les différentes couches de massifs sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.6 – RQD des différents massifs

Roches	Profondeur(m)	RQD (%)	Qualité de la roche
Micaschiste	00 → 9.00	33.5	Pauvre
Grès	6.5 → 13	50.5	Moyenne
Marbre	9.5 → 13.80	20.69	Très Pauvre
Gneiss	00 → 5.00	33.74	Pauvre

✓ **Synthèse et conclusion**

D'après l'analyse du paramètre RQD, on constate que les massifs sont formés principalement par quatre roches (Micaschiste, Grès, Gneiss, Marbre) dont la qualité varie de très pauvre à moyenne.

Tableau V.7 – Classification RMR Bieniawski (1989) de Grès.

Couches	Grès					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR De Base
Mesure	25.06	50.5	Surface Lustrées ou remplissage <5mm ou joint ouvert 1 à 5 mm	>2m	Humide	57
Valeurs extrêmes de la classification	25-50	25-50	joints continus			
Note	4	13	10	20	10	

Tableau V.8 – Classification RMR Bieniawski(1989) de micaschiste.

Couches	Micaschiste					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR De Base
Mesure	32.04	33,5	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Eponte Altérées	0,2-0,6 m	Pression d'eau modérée	46
Valeurs extrêmes de la classification	25-50	25-50				
Note	4	8	20	10	4	

Tableau V.9 – Classification RMR Bieniawski(1989) de Marbre.

Couches	Marbre					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR De Base
Mesure	13.79	20.69	Surface Lustrées ou remplissage < 5mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	0.2-0.6m	Complètement sec	50
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	<25				
Note	2	13	10	10	15	

Tableau V.10 – Classification RMR Bieniawski(1989) de Gneiss.

Couches	Gneiss					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR De Base
Mesure	36.93	33.74	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm	0.06-0.2m	Complètement sec	60
Valeurs extrêmes de la classification	25-50	25-50	Eponge Altérées			
Note	4	8	25	8	15	

Tableau V.11 – Classification RMR du massif rocheux.

Les Couches	RMR de base	Classe du massif Rocheux	Description du massif rocheux
Grès	57	III	Rocher moyen
Micaschiste	46	III	Rocher moyen
Marbre	50	III	Rocher moyen
Gneiss	60	III	Rocher moyen

✓ Synthèse et conclusion

D'après les résultats du RMR de base, on déduit que le massif rocheux a une qualité moyenne. Les caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR :

a) La cohésion :

Céq (kPa) \approx 5RMR

b) L'angle de frottement :

$$\phi \text{ éq}(\text{°}) \approx 0,5 \text{ RMR} + 8,3 \pm 7,2$$

c) Le module de Young :

$$(\text{RMR}-10) / 40$$

$$E \text{ éq}(\text{GPa}) \approx 10$$

Tableau V.12 – Les caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR

Roches	La cohésion C (bar)	L'angle de frottement Φ (Degré)	Le module de Young E(GPa)
Grès	2.85	36,8	14.96
Micaschiste	2.3	31.3	7.94
Marbre	2.5	33.3	10
Gneiss	3	38.5	17.78

V.4.2 Système Q

Tableau V.13 – Classification Q-système du massif rocheux

Paramètres	Grès	Micaschiste	Gneiss	Marbre
RQD	50.5	33.5	33.74	20.69
Jn	0.5	1	1	1
Jr	1.5	1.5	1,5	1,5
Ja	3	0.75	2	0,75
Jw	1	1	1	1
SRF	5	5	5	5
Q	10.1	13.4	5.06	8.28
Qualité du massif rocheux	Bonne	Bonne	Moyenne	Moyenne

✓ Synthèse et conclusion

D'après les résultats du Q-système, on déduit que les roches de Micaschiste et de Grès ont une bonne qualité. En revanche, les autres roches de Gneiss et de Marbre sont de qualité moyenne.

V.4.3 Système du GSI (Geological Strength Index)

L'estimation de la valeur de GSI se base sur le critère de Hoek et Brown qui s'appuie sur une observation directe de la structure du massif rocheux (voir annexes 03).

Ayant calculé RMR' le GSI se détermine comme suit :

$$GSI = RMR'_{89} - 5 \text{ Si } RMR'_{89} > 23$$

Tableau V.14 – Classification GSI du massif rocheux

Les Couches	RMR de base	RMR'89	GSI	Description du massif rocheux
Micaschiste	46	57	52	Rocher moyen
Grès	57	62	57	Bon Roche
Gneiss	60	60	55	Rocher moyen
Marbre	50	50	45	Rocher moyen

✓ Synthèse et conclusion

D'après les résultats du GSI, on déduit que les roches de Grès ont une bonne qualité. En revanche, les autres roches de Micaschiste, Gneiss et de Marbre sont de qualité moyenne

V.4.4 Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)

La formule générale du SMR est calculée comme suit :

$$SMR = RMR_{Base} + (F1 * F2 * F3) + F4$$

Sachant que les directions de la pente de la falaise allant de direction et de pendage sont présentées dans le tableau V.15 suivant :

Tableau V.15 – les directions de la pente de la falaise

Le massif	La direction		Le pendage	
	Direction du pendage du talus α_s	Direction du pendage des joints α_j	Pendage du talus β_s	Pendage du Joints β_j
Micaschiste	220°	200°	30°	60°
Grès	250°	300°	40°	70°
Marbre	50°	55°	30°	40°

Les résultats sont résumés dans les tableau V.16 et V.17 suivants :

Tableau V.16 – Les valeurs du SMR

Le massif	RMR _{base}	F1	F2	F3	F4	SMR
Micaschiste	46	1	1	0	0	46
Grès	57	1	1	0	0	57
Marbre	50	1	1	0	0	50

Tableau V.17 – La différente classe de stabilité par la valeur du SMR

Le massif	SMR	Classe	Description	Stabilité	Chute	Probabilité de chute
Micaschiste	46	III	Normal	Partiellement stable	Quelques joints Ou beaucoup de dièdre	0.4
Grès	57	III	Normal	Partiellement stable	Quelques joints Ou beaucoup de dièdre	0.4
Marbre	50	III	Normal	Partiellement stable	Quelques joints Ou beaucoup de dièdre	0.4

✓ Synthèse et conclusion

A partir des résultats on peut résumer les principales caractéristiques de la pente : On a obtenu dans les trois massifs Micaschiste, Grès et Marbre les valeurs du SMR comme suit : 46, 57, 50.

On voit que la valeur du SMR dans les trois massifs Micaschiste, Grès et Marbre appartient à la même classe III on conclue que la pente est d'une qualité Normal

et Partiellement stable on peut prédire Quelques joints Ou beaucoup de dièdre avec une probabilité de chute égale à 0,4 voir le Tableau V.17.

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a calculé le RQD, RMR, Q et GSI qui nous a permis de caractériser, classer et définir la qualité des massifs de de la déviation et de la modernisation de la RN25 qui est de moyen qualité pour le massif de Micaschiste, Gneiss et Marbre et une bonne qualité pour le Grès.

Le calcul du SMR confirme l'existence du deuxième problème que rencontre ces massifs notre résultat affirme que les pentes de les falaises de Grès est Partiellement stable (classe IIIa) ce qui implique un important soutènement et des grands ouvrages à faire à savoir Boulonnage systématique et béton projeté et la pente de la falaise de Marbreet Micaschiste sont Partiellement stable (classe IIIb) ce qui implique un important soutènement et des grands ouvrages à faire à savoir Boulonnage systématique, ancrage, béton projeté et mur de soutènement cités dans le Tableau II.11 chapitre II.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de ce travail est de caractériser et classer le massif rocheux de la déviation de la modernisation de la RN25 et du CW 128 dans la wilaya de Tizi-Ouzou ainsi que l'étude de stabilité de la pente, ce massif représente des problèmes et des dangers qui menacent la déviation.

Le comportement mécanique des massifs rocheux dépend de la structure géométrique des discontinuités ainsi que de leurs propriétés mécaniques et de celles de la matrice rocheuse.

Ces derniers sont utilisés pour la classification du massif.

L'analyse structurale que nous avons effectuée sur le terrain à l'échelle de l'affleurement nous a permis d'identifier les différentes familles directionnelles de discontinuités qui disloquent les différents massifs. Grâce au systèmes de classification géomécaniques (RQD, RMR, Q et GSI) on a réalisé que Micaschiste, Gneiss et Marbre sont de qualité moyenne quant aux grés, il se classe dans la catégorie : Bonne qualité.

Le SMR nous a permis de définir la qualité de la pente des massifs étudiés, ces dernières s'avèrent instables (classe IV) vu l'hétérogénéité des formations du terrain et l'intensité de la fracturation ce qui implique un important soutènement et des grands ouvrages à faire à savoir : Béton projeté renforcé, mur de soutènement ou excavation et drainage profond.

Cette étude constitue une ébauche pour la classification géomécaniques des massifs rocheux de la région de TIZI-OUZOU, et afin de permettre de mieux caractériser cette zone on suggère des études approfondies au sens géotechnique et de stabilités.

Annexe A

Caractéristique du massif suivant Q systèmes

A.1 paramètre J_r (paramètre de rugosité des joints), (Barton et al. 1974)

(a) Epontes en contact (b) Epontes en contact après cisaillement de moins de 10 cm	J_r	(c) Epontes hors contact après cisaillement	J_r
Joint discontinu	4	Zone argileuse d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact	1.0
Joints ondulés, rugueux ou irréguliers	3		
Joints ondulés, lisses	2		
Joints ondulés, striés (lisses, luisants, polis)	1.5		
Joints plans, rugueux ou irréguliers	1.5		
Joints plans, lisses	1.0	Zone sableuse, graveleuse ou broyée d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact	
Joints plans, striés	0.5		
Note : (i) Les descriptions se réfèrent à des éléments de petites ou moyennes dimensions dans cet ordre.		Note : (i) Majorer la valeur de 1.0 si l'espacement moyen des joints de la famille principale est supérieur à 3 m. (ii) $J_r = 0.5$ si les joints plans et striés comportent des linéations orientées de telle sorte qu'elles peuvent amorcer une rupture.	

A.2 Paramètre Ja (paramètre d'altération des joints), (Barton et al 1974)

	Caractère du joint		Conditions	Ja
	Epontes en contact	Joints propres	Joints serré, recimenté	Remplissage de quartz, épidote,.....etc.
Epontes non altérées			Pas d'enduit.	1
Epontes légèrement altérées			Enduit minéral non radoucissant, grains sans argile	2
Enduits ou remplissage		Enduit a frottement	Sable, silt, calcite, ...etc. (non radoucissant)	3
		Enduit a cohésion, Epaisseur < 1-2 mm	Argile, chlorite, talc,etc. (radoucissant)	4
Epontes en contact	Remplissage	Type	Ja	
	Matériaux frottant	Sable, Silt, Calcite,.....ect..	4	
	Remplissage fortement sur-consolidé, Epaisseur < 5mm	Remplissage compact d'argile, chlorite, talc...ect.	6	
	Remplissage légèrement sur consolidé, épaisseur< 5 mm	Sur-consolidation légère ou moyenne d'argile, de chlorite , talc....ect.	8	
	Remplissage d'argiles gonflantes, épaisseur< 5mm	Matériaux gonflants (ex montmorillonite)	8-12	
Epontes séparées	Condition d'éponte	Ja		
	Zones de roche concassée	6		
	Roche et argile	8-12		
	Zone silteuses, Sableuses, avec une faible fraction d'argile	5		
	Zone ou bandes épaisses d'argile	10-13		

A.3 Paramètre Jw (paramètre hydraulique), (Barton et al, 1974)

Influence de l'eau en charge	Jw	Pression d'eau approximative (Kgf/cm ²)
- Excavation à sec ou faibles venues d'eau (<5l/mn localement)	1.00	<1.0
- Venues d'eau ou pressions faibles, débouillage occasionnel au droit d'un joint	0.66	1.0-2.5
- Forte venue d'eau ou pression importante dans du rocher de bonne tenue à joints sans remplissage	0.5	2.5-10.0
- Fortes venues d'eau ou pression importante, débouillages fréquents	0.3	2.5-10.0
-très fortes venues d'eau lors des tirs, diminuant ensuite avec le temps	0.2-0.1	>10.0
-Très fortes venues d'eau ou pressions très importantes sans réduction notable avec le temps	0.1-0.05	>10.0
Note :		
(i)	Les 4 derniers indices sont des estimations grossières. Augmenter la valeur de JW en cas de mise en place d'un dispositif de drainage ;	
(ii)	Les problème particuliers liés à la formation de glace ne sont pas pris en compte.	

A.4 Paramètre de J_n (nombre de famille de discontinuités), (Barton et al, 1974)

Nombre de famille de diaclases	J_n
Massif, peu ou pas de diaclases	0.5-1
Une famille de diaclases	2
Une famille et diaclases aléatoires	3
Deux familles de diaclases	4
Deux familles et diaclases aléatoires	6
Trois familles de diaclases	9
Trois familles et diaclases aléatoires	12
Quatre familles et plus, diaclases aléatoire très nombreuses	15
Roches concassée, semblable à un sol	20

Note :

1. Pour une intersection, utilisez $3xJ_n$
2. Pour un portail, utilisez $2xJ_n$

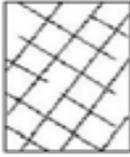
A.5 Paramètre de SRF (paramètre de réduction relatif aux contraintes), (Barton et al.1974).

Ouvrage recoupant des zones de faiblesse provoquant la décompression de la roche lors du percement	Zones de faiblesse fréquentes, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement, rocher environnant très décomprimé (toutes profondeurs).			SFR= 10	
	Zones de faiblesse individuelles, contenant de l'argile ou rocher décomposé chimiquement (profondeur de l'excavation <50m)			5	
	Zones de faiblesse individuelles, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement (profondeur de l'excavation >50m)			2.5	
	Nombreuses de zones de cisaillement en rocher sain, sans argile (toutes profondeurs)			7.5	
	Zones de cisaillement individuelles en rocher sain, sans argile (profondeur de l'excavation <50 m)			5	
	Zones de cisaillement individuelles en rocher rigide, sans argile (profondeur de l'excavation >50 m)			2.5	
	Joints ouverts, rocher très fracturé et décomprimé, "morceaux de sucre", ... etc. (toutes profondeurs)			5	
(i) Réduire l'indice SFR de 25% à 50 % si les zones de cisaillement influent sur l'excavation mais ne la traversent pas.					
		σ_c/σ_c	σ_q/σ_c	SFR	
Roche sain, problèmes de contraintes in situ	Contrainte faible, excavation peu profonde		>200	<0,01	2.5
	Contraintes moyennes		200-10	0.01-0.3	1
	Contrainte importante, structure très serré (condition normalement favorable à la stabilité mais peut être défavorable à la tenue des piédroits)		10-5	0.3-0.4	0.5-2
	Mouvement de toit modérer (rocher massif)		5-3	0.5-0.65	5-50
	Quelque chute de toit (rocher massif)		3-2	0.65-1	50-200
	Chutes de toit importantes (rocher massif)		<2	>1	200-400
Note :					
(ii) Si l'état de contraintes est fortement anisotrope : pour $5 < \sigma_1/\sigma_3 < 10$, réduire σ_c à 0,75 σ_c Pour $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, réduire σ_c à 0,5 σ_c					
(iii) Il est rare que la hauteur de couverture au-dessus du toit soit plus faible que la largeur de l'ouvrage. Si c'est le cas, il est suggéré de porter l'indice de SFR de 2,5 à 5.					
			σ_θ/σ_c	SFR	
Rocher poussant	Déformation plastique du rocher sous l'action de fortes contraintes naturelles		Moyennes pressions	1-5	5-10
			Fortes pressions	>5	10-20
Rocher gonflant	Action chimique en fonction de la présence d'eau		Moyennes pressions		5-10
			Fortes pressions		10-15

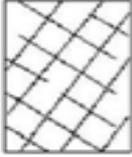
Annexe B

**Caractérisation du massif suivant
le GSI.**

B.1 Couche des Micaschistes.

<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>						
<p>STRUCTURE</p>		<p>QUALITÉ DÉCROISSANTE </p>						
<p>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DÉCROISSANT </p>		80	70	60	40	30	20	10
 <p>FRACTURÉE – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>								
 <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>			50					
 <p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec plis et/ou failles</p>								
 <p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>								

B.2 Couche du Grès.

<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>STRUCTURE</p>		<p>QUALITÉ DÉCROISSANTE </p>				
 <p>FRACTURÉE – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	<p>80</p> <p>70</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>
 <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>	<p>60</p> <p>50</p>					
 <p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec plisures et/ou failles</p>	<p>40</p> <p>30</p>					
 <p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>	<p>20</p> <p>10</p>					
<p> AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DÉCROISSANT</p>						

B.3 Couche du Marbre.

<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>STRUCTURE</p>		<p>QUALITÉ DÉCROISSANTE </p>				
		<p>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DÉCROISSANT </p>				
 <p>FRACTURÉE – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	80					
 <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>	70	60				
 <p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec plisures et/ou failles</p>		50				
 <p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>		40				
			30			
				20		
					10	

Bibliographie

- [1]] Baud J.P et Gambien M., [2011], « Classification des sols et des roches à partir d'essais d'expansion cylindrique en haute pression », France, 326 pages.
- [2] AFTTES, [2003] , "Caracterisation des massifs rocheux utile a l'etude et la realisation des ouvrage souterrains".
- [3] chalhoub M , [2016]; " Apport des methodes d'homogeneisation numirique a la classification des massif rocheux fractures" . These de doctorat 2006 , Ecole National des mines de Paris , 206 pages.
- [4] Abdelouahed T , [1992] , " Modelisation des massifs [fissures par la methode des elements distincts "These de doctorat de l'Ecole National des ponts et chaussées en geologie de l'ingenieur.
- [5] zhao J , [2007] , " Roches et massifs rocheux " , part 1, cours de mecanique des roches , L'ecole polytechnique federale de Lausanne.
- [6] Thi Thanh Nhan Hoang ,[2010] "Etude du comportement d'un milieu rocheux fracture : Application a la realisation du tunnel de st Beat. Other " ,Ecole des ponts Paristech , france , 273 pages.
- [7] Sanat A.et Zidani N , [2015] , "Etude de stabilite des talus de la carriere d'Ain El Kebira (Wilaya de Setif) vis-a-vis un glissement circulaire " . Memoire de fin d'etude en vue de l'obtention du diplome de master , Universite Abderahmane Mira de Bejai.
- [8] Kimour Mohamed , [2016] " Developpement D'une Mehodologie D'estimation Des Discontinuites Du Massi Rocheux En Vue De Son Utilisation En Conception Miniere "These De Doctorat De Universite Badji Mokhtar-Annaba.
- [9] Schoeder Ch , [2010] "Etude de stabilite des parois rocheuses " Revenue de societe Belge de geologie de l'ingenieur et de mecanique des roches (SBGIMG) , 90 pages.
- [10] Amrani S,[2010] , "Ecole de stabilite des talus de la carriere de Mefteh (Blida) "Memoire de fin d'etude en vue de l'obtention du diplome d'ingenieur d'etat en genie Minier , Ecole nationale polytechnique Alger , 112 pages .
- [11] Zhao J; (2008] , "Proprietes des discontinuites " part 3 , cours de mecanique des roches , L'ecole polytechnique federale de Lausanne.
- [12] Hudson J .A , [1993] "comprehensive rock engineering-principales , practice and projects" rock Testing and Site Characterization , Oxford , vol 3.
- [13] Barton N.et Choubey V, [1977] , " The shear strength of rock joints in theory and practice " , Edition Rock Mech.

- [14] Boucif R. et Tamourt M, [2015] "Etude de stabilité du flanc Nord de la mine de kef Essnoun- Tebessa " Memoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplome de master , Universite Abderrahmane Mira de Bejaia , 148 pages
- [15] Comité Français de Mécanique des Roches."Manuel de mécanique des roches " [2000], Tome 2 : Les applications.Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- [16] Panet M. et al [1976] La mécanique des roches appliquée aux ouvrages civils .Association Amicale des Ingénieurs Anciens de L'E.N.P.
- [17] Palmstrom A."Rmi - A rock mass characterization system for rock engineering purposes" University of Oslo , Ph.D .Thesis,400 p.1995
- [18] 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.
- [19] Melle SADEK Kahina et Melle CHAOUCH Ibtissem .[2016] "Caractérisation et classification du massif rocheux du Djebel de Boukhadra - Tebessa -"Memoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplome de Master en Mines , Universite Abderrahmane Mira de Bejaia .
- [20] Maciej A ., [2012] "Modification des classifications mécaniques pour les massifs rocheux schisteux " . These de maîtrise des sciences appliquées de l'université de Montréal , spécialité génie minier , 163 pages.
- [21] Bieniawski ,Z,T."Engineering rock mass classifications : a complete manual for engineers and geologists in mining, civil , and petroleum engineering " New York John Wiley and Sons .1989.
- [22] Duffaut P . et Homand F . ,[2000] "Manuel de mécanique des roches" Tome 1 . : fondements, Comité français de mécanique des roches ,87 pages .
- [23] DBarton , N,R, Lien , et al (1974)."Engineering classification of rock masses for the design of rock support ."Rock Mechanics 6(189-236).
- [24] Hoek , E, ans E.T.Brown . "Underground Excavations in Rock" , London : Instn .Min.Metall.
- [25] Singh, B. R. K, Goel. "Rock mass classification : à practical approach in Civil Engineering". Oxford, Elsevier Science Ltd. 1999.
- [26] 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.
- [27] Ait Taleb Abdelkader [2017] (Evaluation de la Dégradation chimique des granulats schisteux A l'essai oénométrique et à la boîte de cisaillement) mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en géotechnique ; université de mouloud Mammeri de Tizi -Ouzou
- [28] Chekir Mohammed et Mani Nidal.[2016](caractérisation et classification géomécanique du massif rocheux d'Aokas Bejaia)mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en mines université Abderrahmane mira de Bejaia

- [29] Schroeder Ch., [2010], « Etude de stabilité des parois rocheuses », Revenue de société Belge de géologie de l'ingénieur et de mécanique des roches (SBGIMR), 90 pages
- [30] Amara Idire [2018] (Etude de comportement d'un tronçon du tunnel d'Ait Yahia Moussa) mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en géotechnique, université de Mouloud Mammeri DE Tizi-Ouzou
- [31] ABACHA I (2015) « Etude de la sismicité de la région Nord Est de l'Algérie », thèse de doctorat université Ferhat Abbas de Sétif, Option Sismologie, pp. 21-24
- [32] www.googleearth. Com image Satelliteslandsat/Copernicus 2020.
- [33] DOMZIG A, (2006) « Déformation active et récente, et structuration tectono sédimentaire de la marge sous-marine algérienne », thèse de doctorat, université de Bretagne Occidentale-Ecole Doctorale des sciences de la mer, spécialité géosciences marines, pp.17.
- [34] WASSILA N (2005) « Etude des formations carbonatées du versant Sud du massif de L'Oum Settas : approche quantitative et qualitative; Thèse de doctorat université Mentouri-Constantine option-géologie des substances utiles, pp.4.
- [35] LAGOUAG Mohamed Yacine, (2014) « Etude des lamproies de Nord Est algérien), Thèse de magister, université de Sétif 1, option ?géologie et ressources Minérales, pp.28 .
- [36] MOUSSAOUI N, (2011) « Etude de la micoséismicité de la région de Kharrat, thèse de magister, université Ferhat Abbas de Sétif, option sismologie, pp.5.
- [37] RPOR-2008(Règles parasismique applicables au domaine des ouvrages d'art) Document technique réglementaire de ministère des travaux publics, pp.14-15.
- [38] CHENAF w.et M.ZOUGHEM k, [2006 « Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain el Kebira (Sétif) Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en géologie, université de Ferhat Abbas de sétif ,68 pages [9] Duffaut P. et Homand F., [2000], « Manuel de mécanique des roche », Tome 1 : fondements, Comité français de mécanique des roches, 87 pages.
- [39] hao J., [2008], « Mécanique et propriétés des massifs », part 2, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [40] ANA (agence national des autoroutes) Rapport géologique et géotechnique du projet d'étude du tunnel d'Ait Yahia Moussa. Aout-2016.
- [41] Jean-François SERRATRICE et Jean-Louis DURVILLE (Description des roches et des massives rocheuses exploitations de deux bases de données) bulletin des laboratoires des ponts et chaussées -211-septembre- -octobre 1997- réf.4154-pp.73-87.
- [42] Norme AFNOR la teneur en eau [NF 94-053] .
- [43] Norme AFNOR Densité volumique humide[NE P94-053] .
- [44] Norme AFNOR Densité volumique sèche [NF P94-064].
- [45] Norme AFNOR Densité volumique des grains soles [NF P94 -054] .

- [46] Norme AFNOR Essai de compression un axiale [NF P94-420] .
- [47] Norme AFNOR Essai de traction par flexion [NF P18-407] .