

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil



## **Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie

Civil

**Thème**

*Caractérisation et classification géomécanique des  
massifs rocheux d'Ait yahia Moussa*

*(Etude de cas : Pénétrante tizi-ouzou –Bouira pk12-pk16)*

**Option : Géotechnique**

**Présenté par :**

M<sup>me</sup> SAIDI Chafia

Devant le jury :

M<sup>me</sup> MEZIANI F

président

M<sup>me</sup> AIT BACHIR S

Promotrice

M<sup>me</sup> MOBAREK H

Examinatrice

Année universitaire : 2019/2020

# Remerciements

Je tiens avant tout à remercier le bon Dieu pour j'avoir animés de volonté,  
de force et de santé à fin que nous puissions réussir notre travail.

Nos plus sincères et intenses remerciements

S'adressent à :

Ma promotrice Mme Ait Bachir Samia pour son encadrement, son soutien,  
pour tous ses précieux conseils qui ont été de grande utilité pour moi

Madame MEZIANI F qui nous a fait l'honneur de Présider le jury.

Madame MOBARAK H d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Au personnel du Laboratoire central des Travaux Publics

(LCTP, TIZI OUZOU).

Je remercie Mme BOUZZOUNI Fatima responsable du laboratoire MDS de  
L'université Mouloud Mammeri TIZI OUZOU pour disponibilité et surtout  
sa confiance

Nous tenons à remercier également tous ceux qui on contribué de près ou  
de loin à la réalisation de ce modeste travail.

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents*

*A Mes chères sœurs : Djohar ; radai et Sabrina*

*A Mes chères frères : Mohamad ; Mostapha ; Karim ; Rachid ;*

*Farid ; Mourad ; Aziz*

*A tout les membres de ma famille, petits et grands*

*A tout la famille Takhamte*

*A tout mes amis sans exception*

*Atout la promotion de géotechnique et environnement*

---

Liste des tableaux.....	I
Liste des figures .....	III
Liste des abréviations .....	VI
Notation .....	VII
Introduction générale.....	X

### **Chapitre I : structure et comportement d'un massif rocheux**

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. Aspect géologique.....	4
I.4.3. Description des discontinuités .....	6
I.4.3.1. Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux.....	7
I.4.3.2. Les familles des discontinuités .....	7
I.4.3.3. Les caractéristiques géométriques des discontinuités.....	10
I.5. Conclusion.....	17

### **Chapitre II : les systèmes de classification des massifs rocheux**

II.1. Introduction.....	18
II.2. Les classifications géomécaniques .....	18
II.2.1. Types et buts des systèmes de classification .....	18
II.3. Les différents systèmes de classification.....	19
II.3.1. Rock Qualité Désignation (RQD) .....	20
II.3.2. Système RMR (Rock Mass Rating) .....	22
II.3.3. Le Q –Système.....	25

---

II.3.4. Le Géological Strenght Index (GSI).....	27
II.3.5. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating).....	28
II.4. Commentaire sur les systèmes de classification.....	32
II.5. Conclusion .....	33

### **CHAPITRE III : présentation de la zone d'étude**

III.1. Introduction .....	34
III.2. Présentation de la pénétrante de Tizi ouzou- Bouira .....	34
III.2.1. Consistance physique de la pénétrante.....	35
III.2.2. Situation géographique.....	35
III.3. Hydrogéologie .....	35
III.3.1. Définition de l'Hydrologie .....	35
III.3.2. l'Hydrologie de la région d'étude .....	35
III.4. Contexte géologique de La zone d'étude.....	36
III.4.1. Cadre Géologique régionale.....	36
III.4.1.1. Le Tell .....	37
III.4.1.1.a. Les Kabyldes .....	38
III.4.1.1.b. Le domaine de flyschs .....	49
III.4.1.1.c. Le domaine externe .....	49
III.4.1.2. Sismotectonique .....	40
III.4.1.2.a. Evolution tectonique.....	41
III.4.2. Géologie locale.....	42
III.4.3. Sismicité .....	44
III.5. Conclusion .....	45

---

**Chapitre IV : propriétés physico-mécaniques des roches**

IV. 1. Introduction .....	46
IV. 2. Les propriétés physiques des roches .....	46
IV .2.1. Teneur en eau W% [NF P94- 050] .....	46
IV. 2.1.1. Définition .....	46
IV. 2.1.2. Exécution de l'essai .....	46
IV. 2.2. La masse volumique.....	47
IV. 2.2.1. La masse volumique naturelle $\rho_h$ [NF P 94-053] .....	47
IV. 2.2.2. La masse volumique sèche $\rho_d$ [NF P94- 064] .....	48
IV. 2.2. 3. La masse volumique saturée $\rho_{sat}$ [NF P94- 064].....	49
IV. 2.3.La masse volumique des particules solide $\rho_s$ méthode du pycnomètre [NF P94- 054] .....	51
IV. 2.3.1. Définition .....	51
IV.2.3.2 Exécution de l'essai .....	51
IV 2.4. Indice des vides et la Porosité.....	53
IV 2.4. 1. Indice des vides (e) .....	53
IV.2.4.2.Porosité(n).....	53
IV.2.5. Essai au bleu de méthylène [NF P94- 068].....	54
IV. 2.5.1. Définition .....	54
IV.2.5.2. Principe de l'essai.....	54
IV.2.5.3. Préparation de la solution.....	54
IV.2.5.4. Expression des résultats.....	56
IV. 3.Les propriétés mécaniques des roches .....	57
IV.3.1. Définition de la rupture .....	57
IV. 3.2.Critère de Mohr Coulomb .....	57
.IV.3.3. Le Critère de Hoek et Brown .....	59
IV.3.4 Résistance en compression.....	61

IV.3.4.1.Essai de compression uniaxiale [NF P94-420] .....	61
IV.3.5.Essai de traction .....	63
IV.3.5.1.les type de traction .....	64
IV.3.5.2. Essai de traction par flexion [NF P 18-407] .....	66
IV. 6.Les analyse chimique .....	70
IV.6.1. la Calcimètre de Bernard .....	70
IV.6.1. 2.Protocole expérimental.....	70
IV.6.1. 3.Essai de corrélation entre le taux de carbonates et la résistance mécaniques des roches .....	74
IV.7. Conclusion.....	76

### **Chapitre V : Caractérisation et classification géomécanique des massifs rocheux d'ait yahia moussa (pk12-16)**

V.1. Introduction .....	77
V.2. Etude des discontinuités .....	77
V.3.Description des discontinuités et des affleurements .....	77
V.3.1. Caractéristiques rocheuse .....	78
V.3.2.Mesure de l'orientation des discontinuités.....	80
V.3.3.La projection stéréographique .....	81
V.3.4.La présentation des données et des mesures .....	82
V.3.4 .1.Le premier affleurement : le calcaire .....	82
V.3.4 .2.Le deuxième affleurement : le marbre .....	85
V.4. Classification Géomécanique des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa.....	89
V.4.1.Classification RQD.....	89
V.4.2. Système RMR (Rock Mass Rating) .....	90
V.4.3. Système Q.....	93
V.4.4. Système du GSI ( Geological Strength Index) .....	94
V.4.5. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating) .....	94
V.5.Conclusio n.....	96

Conclusion Générale .....97

Références bibliographiques

Annexes

Liste des Figures

**Figure I.1.** Cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols [9]..... 2

**Figure I.2.** Structure géométrique du massif rocheux de calcaire ..... 3

**Figure I.3.** Différentes structures géométriques des massifs rocheux fracturés. [15] ..... 5

**Figure I.4.** Types de structures des massifs rocheux avec les représentations statistiques correspondantes. [16] ..... 6

**Figure I.5.** Les joints stratigraphiques [40] ..... 7

**Figure I.6.** Les diaclases [37]. ..... 8

**Figure I.7.** Les failles ..... 9

**Figure I.8.** Les plis ..... 9

**Figure I.9.** . Schistosité au niveau des micaschistes du massif rocheux d’Ighil N’Touila [37]. ..... 10

**Figure I.10.** Orientation d’un plan de discontinuité [15] ..... 10

**Figure I.11.** Représentation stéréographique ..... 11

**Figure I.12.** Projection stéréographique d’une faille inverse [3]. ..... 12

**Figure I.13.** Mesure de l’espace [41]..... 13

**Figure I.14.** Mesure de la fréquence des discontinuités ..... 14

**Figure I.15.** Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de..... 15

**Figure I.16.** Persistance de différents ensembles de fractures(11) ..... 16

**Figure I.17.** Fissure ouverte et remplie [11]. ..... 17

**Figure II.1** .Un caisse la carotte de calcaire d’Ait Yahia moussa ..... 21

**Figure II.2.** Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR [15]. ..... 22

**FigureII.3.**Orientation d’une pente de type plane. [35].....30

**Figure III.1.** Présentation sommaire du projet de la pénétrante Tizi Ouzou –Bouira[5] .. .34

**Figure III.2.** Localisation de la zone d’étude. [38] ..... 35

**Figure III.3.** Carte schématique montrant les domaines géomorphologiques en Algérie.[40].37

**Figure III.4.** Orogène alpin périméditerranéen [20] ..... 38

**Figure III.5.** Schéma structural simplifié des Maghrébides [39] ..... 39

**Figure III.6.** Coupe générale présentant les chevauchements dans les maghrébides [25]..... 39

**Figure III.7.** Carte sismo-tectonique du nord de l’Algérie montrant les principales structures actives observées dans le Tell [6] ... .....41

<b>Figure III.8.</b> Extrait de la carte géologique de la région d'étude(feuille N°44 Dra El Mizane, e : 1/50000).....	43
<b>Figure III.9.</b> La zone d'étude le tronçon PK12 au PK16. [38] .....	44
<b>Figure III.10.</b> Carte schématique des zonages sismiques de l'Algérie [32].....	44 .
<b>Figure IV.1.</b> Préparation les échantillons dans le panier de la pesée hydrostatique.....	48
<b>Figure IV.2.</b> Equipement de l'essai.....	52
<b>Figure IV.3.</b> Masse humide des prises d'essai. <b>Figure IV.4.</b> Essai au bleu de méthylène...	55
<b>Figure IV.5.</b> Gestion du dosage du bleu de Méthylène.....	55
<b>Figure IV.6.</b> Essai du bleu de méthylène sur le papier filtre.....	56
<b>Figure IV.7.</b> Rupture d'un sol [4].....	57
<b>Figure IV.8.</b> Représentation de la droite de Mohr-Coulomb [10].....	58
<b>Figure IV.9.</b> Diagramme contrainte-déformation. [10].....	59
<b>Figure IV.10.</b> Dispositif expérimental .....	61
<b>Figure IV.11.</b> Essai de compression simple sur les roches étudiées (laboratoire Béton UMMTO) .....	62
<b>Figure IV.12.</b> Machine de l'essai de traction par flexion (Laboratoire de Béton UMMTO).	63
<b>Figure IV.13 :</b> Machine d'essai de traction bi axiale .....	64
<b>Figure IV.14</b> Machine de traction par torsion .....	65
<b>Figure IV.15.</b> Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (4 points).....	66
<b>Figure IV.16.</b> Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion (3 points).....	67
<b>Figure IV.17.</b> Essai de traction par flexion à trois points.....	68
<b>Figure. IV.18</b> .Calcimètre de Bernard .....	70
<b>Figure. IV.19.</b> préparation la mesure (a-pesé de l'échantillon, b- introduction de l'échantillon . et l'HCL dans l'erlenmeyer) .....	71
<b>Figure. IV.20</b> .mise à niveau de l'ampoule et de la burette.....	72
<b>Figure V.1.</b> Conseil pour l'orientation des ensembles de discontinuités .....	80
<b>Figure V.2.</b> Projection stéréographique des discontinuités .....	81
<b>Figure V.3.</b> La photo du premier affleurement (calcaire cubique).....	82
<b>Figure .V.4.</b> Projection stéréographique des discontinuités du massif de Calcaire (cubique)	83
<b>Figure V.5.</b> La photo du premier affleurement (calcaire, cylindrique) .....	83

<b>Figure V.6.</b> Projection stéréographique des discontinuités du massif de Calcaire (cylindrique) .....	85
<b>Figure V.7.</b> Photos du deuxième affleurement (marbre cubique) .....	85
<b>Figure V. 8.</b> Projection stéréographique des discontinuités du massif de Marbre (cubique)..	86
<b>Figure V.9.</b> Photos du deuxième affleurement (marbre cylindrique).....	87
<b>Figure V. 10.</b> Projection stéréographique des discontinuités du massif de Marbre. ....	88
<b>Figure V.11.</b> Photos de la mesure RQD de calcaire .....	89
<b>Figure V.12.</b> Photos de la mesure RQD de marbre .....	89

---

**LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau I.1.</b> Description de l'espace des discontinuités [41].....	13
<b>Tableau I.2.</b> Classification des discontinuités selon leur extension [41] .....	16
<b>Tableau I.3.</b> Classification d'ouverture des discontinuités [41] .....	17
<b>Tableau II.1.</b> Systèmes de classification du massif rocheux [30] ; [12].....	19
<b>Tableau II.2.</b> Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux.....	22
<b>Tableau II.3.</b> Classification RMR(Bieniawski).....	24
<b>Tableau II.4.</b> Classe de rocher suivant la classification de Z.BIENIAWSKI après application de la note d'ajustement .....	25
<b>Tableau II.5.</b> Évaluation de la cote Q et de la qualité du massif [14] .....	27
<b>Tableau II.6.</b> Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI [15].....	28
<b>Tableau II.7.</b> Le Tableau de classification de Romana [31] .....	30
<b>Tableau II.8.</b> Les différentes classe de stabilité par la valeur du SMR .....	31
<b>Tableau II.9.</b> Les suggestions de soutènement selon la classe du SMR .....	31
<b>Tableau IV.1.</b> La teneur en eau (échantillon cubique).....	46
<b>Tableau IV.2.</b> La teneur en eau (échantillon cylindrique) .....	47
<b>Tableau IV.3.</b> La masse volumique naturelle (échantillon cubique) .....	47
<b>Tableau IV.4.</b> La masse volumique naturelle (échantillon cylindrique).....	47
<b>Tableau IV.5.</b> Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche. ....	48
<b>Tableau IV.6.</b> La masse volumique sèche (échantillon cubique) .....	49
<b>Tableau IV.7.</b> La masse volumique sèche (échantillon cylindrique).....	49
<b>Tableau IV.8.</b> La masse volumique saturée (échantillon cubique) .....	50
<b>Tableau IV.9.</b> La masse volumique saturée ( échantillon cylindrique).....	50
<b>Tableau IV.10.</b> Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides. 52	
<b>Tableau IV.11.</b> Résultats de la détermination de l'indice des vides. ....	53
<b>Tableau IV.12.</b> Résultats de la détermination de la Porosité. ....	54
<b>Tableau IV.13.</b> Classe des sols en fonction du VBS. [27].....	55
<b>Tableau IV.14.</b> Résultats d'essai au bleu de méthylène.....	56
<b>Tableau IV.15.</b> Valeurs de la constante du matériau $m$ de quelques types de roches. [39] ....	60
<b>Tableau IV.16.</b> La résistance à la compression.....	62

<b>Tableau IV.17.</b> Classification des roches en fonction de la résistance à la compression. [38] .....	63
<b>Tableau IV.18.</b> La résistance à la traction par flexion trois points (Echantillon cubique).....	68
<b>Tableau IV.20.</b> Classification des roches en fonction de la résistance à la traction. [38].....	69
<b>Tableau IV.21.</b> Classification des massifs rocheux du tronçon PK12-PK16 en fonction de la résistance à la traction. ....	69
<b>Tableau. IV.22.</b> Différence de volume d'eau (la compression).....	72
<b>Tableau IV.23.</b> Différence de volume d'eau (la traction).....	72
<b>Tableau IV.24.</b> La teneur en caco3 (compression) .....	73
<b>Tableau IV.25.</b> La teneur en caco3 (traction) .....	74
<b>Tableau V.1.</b> Critère d'estimation de la résistance de la roche.....	79
<b>Tableau V.2.</b> Degrés d'altération de la roche. ....	80
<b>Tableau V.3.</b> RQD des différents massifs (cubique).....	91
<b>Tableau V.4.</b> RQD des différents massifs (cylindrique).....	91
<b>Tableau V.5.</b> Classification RMR de Calcaire. ....	92
<b>Tableau V.6.</b> Classification RMR de marbre .....	92
<b>Tableau V.7.</b> Classification RMR Bieniawski (1989) de Calcaire.....	93
<b>Tableau V.8.</b> Classification RMR Bieniawski (1989) de Marbre. ....	93
<b>Tableau V. 9.</b> Classification RMR des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa .....	94
<b>Tableau V.10.</b> Classification Q-système des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa. ....	94
<b>Tableau V.11.</b> Classification GSI des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa. ....	95
<b>Tableau V.12.</b> Les valeurs du SMR. ....	96

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

AFTES : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain.

RQD: Rock Quality Designation.(degré de fracturation )

RMR: Rock Mass Rating.

Q –Système :mass Quality ou tunnelling Quality index

GSI: Geological Strength Index.

SMR: Slope Mass Rating

.

SACSIR: South African Council of Scientific and Industrial Research.

NGI: Norwegian Geotechnique Institute.

SRF: Stress Réduction Factor.

C.F.M.R : comité français de mécanique des roches

JRC : joint roughness coefficient (coefficient de rugosité du joint)

## NOTATIONS

E : Est.

S : Sud.

O : Ouest.

N : Nord.

(s) : Direction

(d) : Pendage

(p) : Grand cercle et pôle

$\sigma_1$  et  $\sigma_2$  : les contraintes horizontales

$\sigma_3$  : contrainte verticale

$\Phi$  : Angle de frottement interne.

C: cohésion

L : la longueur de levé

A1 : Résistance en compression uniaxiale de la roche intacte;

A2: *Rock Quality Index* (RQD)

A3 : Espacement des diaclases

A4 : Condition des joints

A5 : L'état d'infiltration d'eau souterraine

A6 : Orientation des discontinuités.

J n: Nombre de familles de joints.

Jr: Indice de rugosité des joints.

J a: Indice de l'altération des joints

J w: Facteur de réduction pour la présence d'eau.

F1, F2, F3: Sont des facteurs d'ajustement liés à joint orientation par rapport à l'orientation des pentes.

F4 : facteur de correction.

$\alpha_s$  : Direction des pendage du talus

$\alpha_j$  : direction des pendage des joints

$\beta_s$  : pendage du talus

$\beta_j$  : pendage du joints

W : La teneur en eau

E : Module de Young [KN /m<sup>2</sup>]

$\nu$  : coefficient de poisson.

M<sub>h</sub> : La masse naturelle

M<sub>s</sub> : La masse de matériau sec

$\rho_h$  : La masse volumique naturelle

V<sub>t</sub> : Le volume de l'échantillon

$\rho_d$  : La masse volumique sèche

M<sub>r</sub> : Masse de la roche

M<sub>rp</sub> : Masse de la roche paraffinée

M'<sub>rp</sub> : Masse de la roche paraffinée dans l'eau

$\rho_p$  : Masse de la paraffine

$\rho_w$  : Masse volumique de l'eau

$\rho_{sat}$  : La masse volumique saturée

M<sub>sat<sub>r</sub></sub> : Masse de la roche saturée

M<sub>sat<sub>rp</sub></sub> : Masse de la roche saturée paraffinée à l'air libre

M<sub>str<sub>rp</sub></sub> : Masse de la roche saturée paraffinée dans l'eau

$\rho_d$  : La masse volumique des particules solides

M<sub>1</sub> : Masse du pycnomètre vide.

M<sub>2</sub> : Masse du pycnomètre avec échantillon.

M<sub>3</sub> : Masse du pycnomètre + eau + échantillon.

M<sub>4</sub> : Masse du pycnomètre plein d'eau.

e : Indice de vides

n : Porosité

VBS : Valeur au bleu

$\varepsilon$  : déformation

R<sub>c</sub> : La résistance en compression uni axiale.

$\sigma_n$ : 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

$\tau$ : Contrainte de cisaillement.

R<sub>c</sub>: La résistance à la compression

R<sub>t</sub> : La résistance à la traction

# *Introduction Générale*

## Introduction générale

Un massif rocheux sur lequel ou dans lequel on va faire une caractérisation est, a priori, un objet parfaitement défini. Ses caractéristiques lithologiques, structurales, géomécaniques sont des données dont les variations dans le temps et l'espace obéissent à des lois objectives accessibles à l'observation et à la mesure. Toutefois, en pratique, cette connaissance est toujours très imparfaite. Elle résulte de l'interprétation et de la synthèse d'un ensemble de données résultant :

- De la connaissance de l'histoire géologique du site,
- De l'examen des affleurements,
- Des reconnaissances par méthodes géophysiques,
- Des données de sondages,
- Des résultats d'essais de laboratoire et d'essais in situ.

Le problème de stabilité des massifs rocheux peut être résolu seulement à condition de connaître de façon approfondie et détaillée la structure du site étudié, cette connaissance doit avoir deux aspects également importants : d'une part, il y a la matrice rocheuse avec ses caractéristiques spécifiques (le type de la roche, la composition minéralogique, ses propriétés physico-mécaniques...etc.) et de l'autre, on doit considérer le massif rocheux qui subit l'instabilité avec ces spécificités comme la structure géologique, les familles de discontinuités composant ce massif et leurs caractéristiques géomécaniques.

Pour cela on a abordé Les différents systèmes de classification qui sont généralement utilisées afin d'assigner une valeur numérique pour définir les caractéristiques et les 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 présente étude se propose d'étudier le massif rocheux d'Ait Yahia Moussa (Wilaya de Tizi ousou –au Sude - Est d'Alger) . De notre part nous nous intéressons au tronçon PK12-PK16 une partie de la pénétrante Tizi ousou –Bouira. De ce fait la caractérisation et la classification du massif rocheux d'Ait Yahia Moussa est indispensable afin de spécifier les zones à défaillance et stoppé les problèmes et risques de stabilité pouvant être encourus. Pour atteindre ces objectifs on a structuré notre travail de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation du comportement du massif rocheux ainsi que sa structure qui est affectée par les discontinuités.
- Le second chapitre est réservé à la présentation des différents systèmes de classification des massifs rocheux
- Le troisième chapitre se portera sur la présentation générale de la région d'étude Ait Yahia Moussa
- Le quatrième chapitre consiste en la détermination des différents paramètres physiques , mécaniques et chimiques des formations rocheuses des différents massifs
- Le dernier chapitre est consacré à la caractérisation et la classification géomécaniques des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa suivi d'une conclusion générale.

# Chapitre 1

## **Structure Et Comportement D'un Massif Rocheux**

**Chapitre I : structure et comportement d'un massif rocheux****I.1. Introduction :**

La limite qui différencie un sol d'une roche est assez étroite et complexe à la fois. En ce chapitre nous présentons brièvement les principales limites entre sol et roche. Mais notre intérêt se dirige vers le comportement des massifs rocheux dont la structure est affectée par des surfaces qui interrompe la continuité physique du milieu sain appelé discontinuités. De ce fait l'étude des discontinuités des massifs rocheux est indispensable pour la classification de ces massifs. Cette étude nécessite une analyse statistique pour pouvoir différencier toutes les familles de discontinuités qui affectant 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 de grains minéraux qui peuvent être séparé par un moyen doux; comme L'agitation dans l'eau est un sol. Alors que les grains minéraux d'une roche sont liées par des forces de cohésion fortes et permanentes [9].

➤ Les sols comportent des matériaux granulaires non cimentés (donc meubles et sans cohésion et pratiquement pas de résistance à la compression simple) comme le sable et des matériaux argileux de faible cohésion [9].

➤ 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 [9].

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.

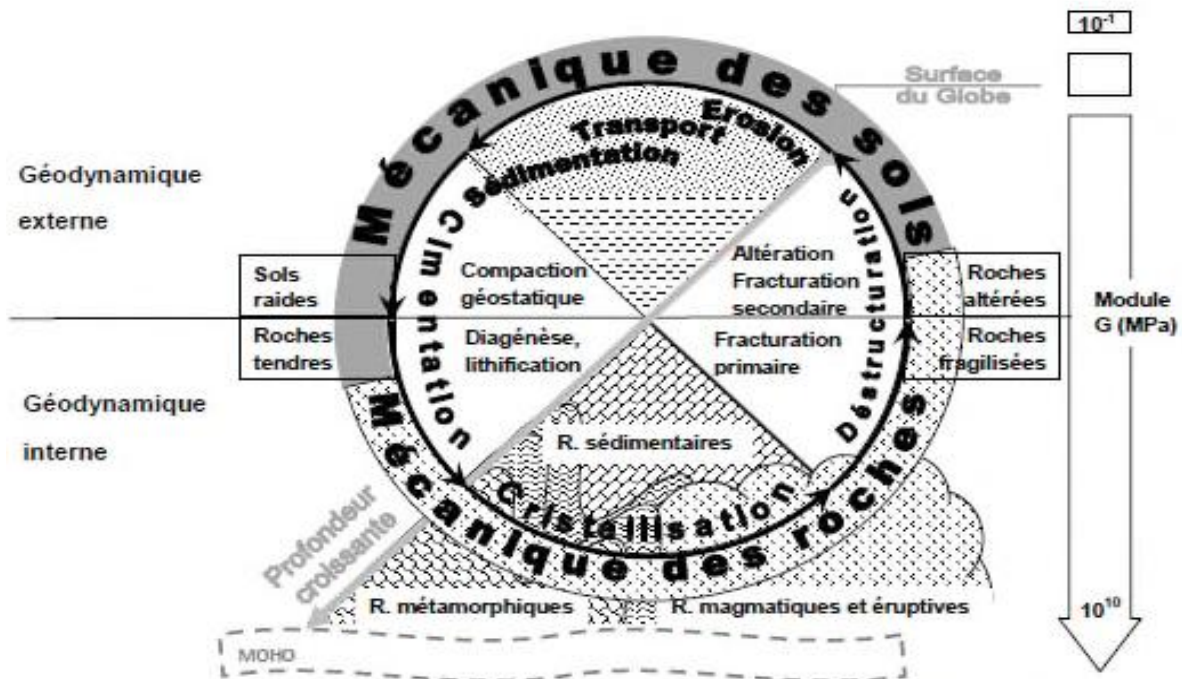


Figure I.1. Cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols [9].

### 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 [1]:

- 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 roches carbonatées.
- Les roches sédimentaires : sont formées par la décomposition (mécanique, chimique ou biologique) des matériaux suivie 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.

#### **I.4. Structure géométrique des massifs rocheux**

##### **I.4.1. Description des massifs rocheux**

Formés d'une juxtaposition de matériaux hétérogènes, les massifs rocheux sont déstructurés très complexes. Ils sont assimilés à un assemblage de blocs appelés matrice rocheuse lesquels sont délimités par des discontinuités constituées de fissures, de fractures ou de failles ou encore de limites stratigraphiques [15].



**Figure. I.2:** Structure géométrique du massif rocheux de calcaire

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 [15]

**I.4.2. Aspect géologique**

Pour étudier le comportement mécanique ou hydraulique d'un massif rocheux, il est essentiel de connaître son degré de fracturation ainsi que la répartition des discontinuités dans l'espace. Des mesures in-situ permettent de définir les diverses familles de discontinuités et leurs paramètres de façon statistique.

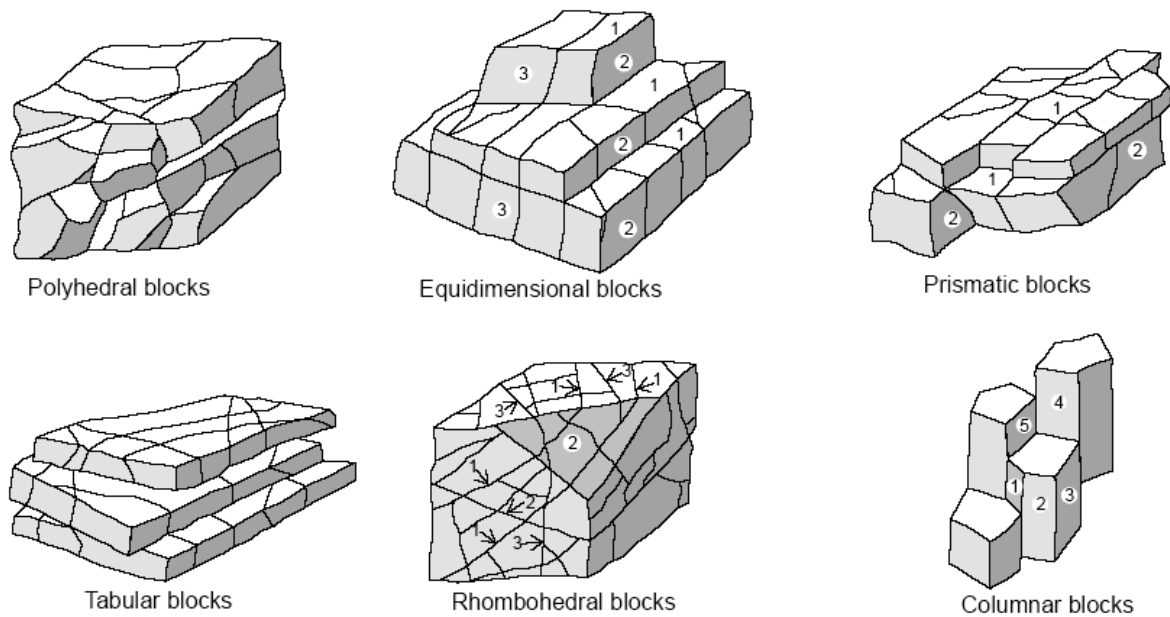
L'ensemble des discontinuités dans un massif rocheux est le résultat de la superposition de différentes familles. Chaque famille peut avoir des lois de distribution et des caractères statistiques différents. Donc, pour ajuster les lois de distribution d'une famille, il faut distinguer cette famille dans l'ensemble des discontinuités. La méthode classique de classification est celle de la projection stéréographique [15]

L'objectif principal d'une étude géométrique des discontinuités est de déterminer :

- Si elles sont classables en familles (orientations voisines)
- Si elles structurent le massif rocheux en blocs (continuité et connectivité importantes).

Le premier classement des discontinuités observées sur le terrain consiste à les grouper en Populations homogènes du point de vue structural ; il faut donc préciser la nature géologique et tectonique de tous les éléments structuraux relevés.

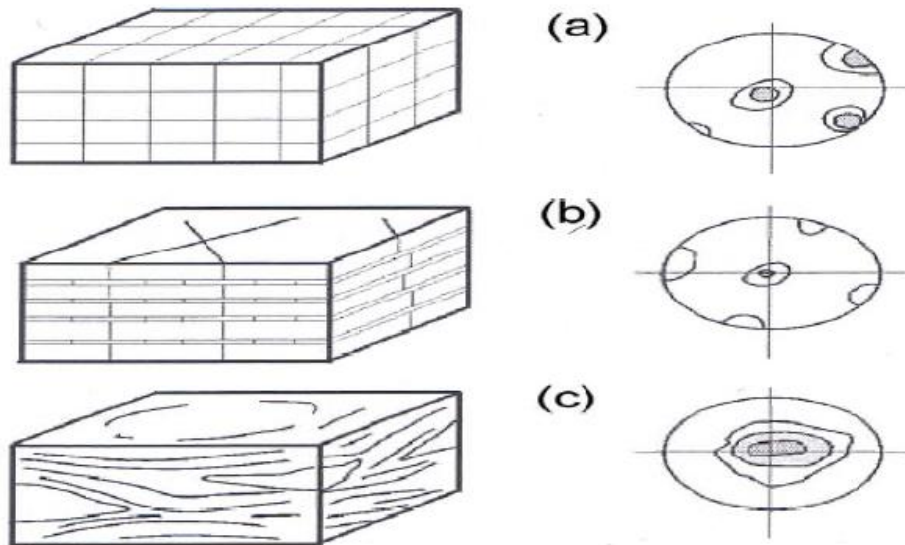
Divers auteurs ont essayé de regrouper les structures géométriques des massifs rocheux dans des catégories bien définies. La figure 1.3 illustre une série de massifs rocheux citée par Palmström [1995]. Nous distinguons les massifs à blocs polyédriques, equidimensionnels, prismatiques ou en colonnes, les massifs à bancs minces dont l'épaisseur est moins épaisse que leur longueur et les massifs comprenant plusieurs familles de fractures [15]



**Figure. I.3 :** Différentes structures géométriques des massifs rocheux fracturés. [15]

- 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 (Fig I.3) Formés de blocs parallélépipédiques (Fig I.4-a), beaucoup de granites et de calcaires massifs montrent trois familles de fractures trirectangulaires. Tous les joints sont continus. Afin de calculer les propriétés mécaniques d'un tel massif, des solutions analytiques sont possibles. Toutefois il faut noter que cette forme géométrique paraît très idéalisée.
- Le schéma de la figure (I.4-b) représente un massif à caractère 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 grés et de marnes des formations appelées flysch ou des roches schisteuses. Les observations montrent que l'espacement entre les bandes est souvent équivalent à la taille des diaclases ou à sa moitié. Ces types de massifs sont très courants mais non accessibles à des traitements analytiques simples; le recours à des méthodes d'homogénéisation numériques nous semble très pertinent. Du point de vue géométrique, la structure de ces massifs est définie 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 (Fig. I.4-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- Roche massive 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.4.** Types de structures des massifs rocheux avec les représentations statistiques correspondantes. [16]

### I.4.3. Description des discontinuités

On définit une discontinuité dans un massif rocheux par une surface qui interrompt la continuité physique du milieu sain [2]. L'identification géologique, géométrique et mécanique des discontinuités, à toutes les échelles est indispensable dans l'étude de comportement du massif. elle nécessite une analyse statistique, pour pouvoir différencier toutes les familles de discontinuités qui affectent le massif. Chaque famille est alors analysée à part pour déterminer la distribution des différents paramètres géométriques

**I.4.3.1. Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux**

- De couper la roche en plaques, blocs et coins (libres de tomber et de bouger);
- D'agir comme plan de faiblesse pour le glissement;
- De faciliter l'écoulement d'eau et créer des réseaux d'écoulement;
- D'entraîner de grandes déformations;
- De changer la distribution et l'orientation des contraintes [40].

**I.4.3.2. Les familles des discontinuités**

**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



**Figure I.5.** Les joints stratigraphiques [40]

**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 [2].



**Figure I.6.** Les diaclases [37].

**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 [2].

**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 [2].



**Figure I.7.** Les failles

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

Les plis ne sont généralement pas considérés comme éléments du massif rocheux. Ils sont souvent associés à un haut degré de fracturation et à des roches relativement faibles et tendres [40].



**Figure I.8.** Les plis

**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 [33].



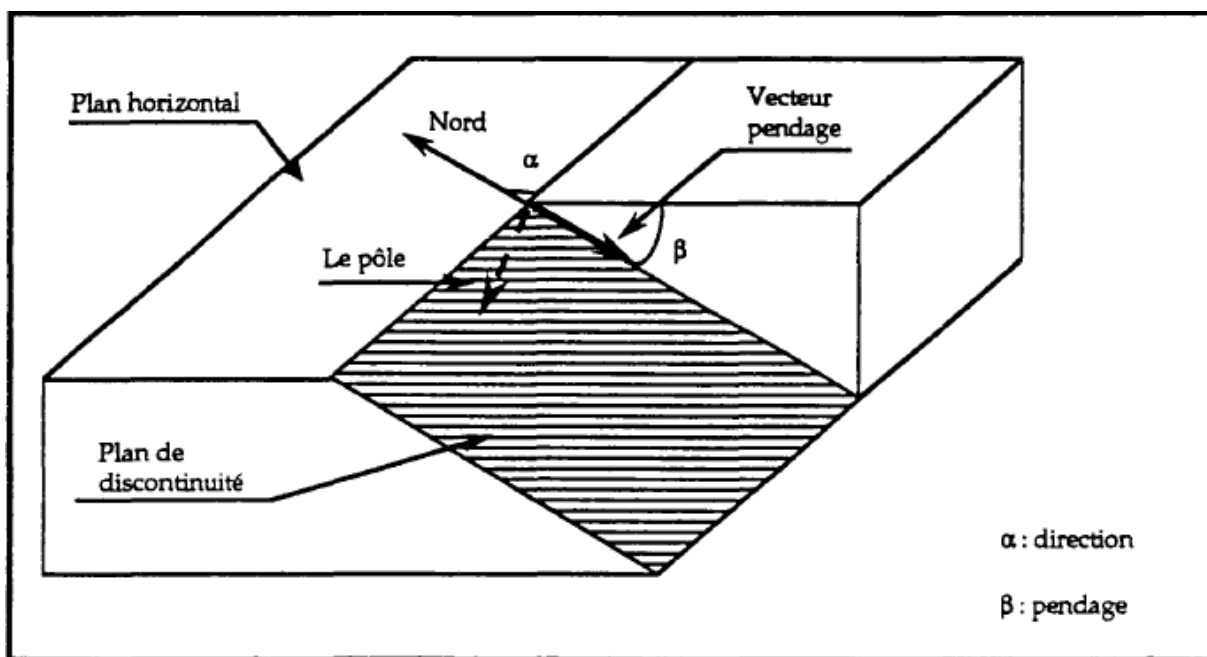
**Figure I.9.** . Schistosité au niveau des micaschistes du massif rocheux d'Ighil N'Touila [37].

### I.4.3.3. Les caractéristiques géométriques des discontinuités

Les caractéristiques géométriques les plus importantes des discontinuités, qui ont une influence sur le comportement du massif rocheux. Ont été présentées telles que :

**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.

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 [2].



**Figure I.10.** Orientation d'un plan de discontinuité [15]

On représente aussi une discontinuité par:

- le vecteur pendage : qui matérialise la ligne de plus grande pente du plan de discontinuité. Il est défini par l'azimut de sa trace sur le plan horizontal et son pendage ;
- le vecteur perpendiculaire au plan de discontinuité [2].

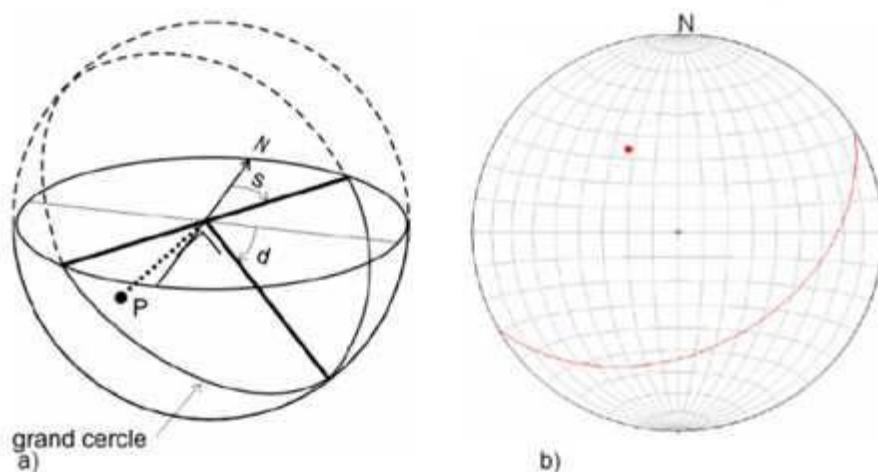
La projection stéréographique des discontinuités permet de faire un classement des discontinuités en familles directionnelles. La représentation des plans se fait habituellement en utilisant les diagrammes polaires.

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 Wolf (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 [24]

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.11.** Représentation stéréographique

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

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

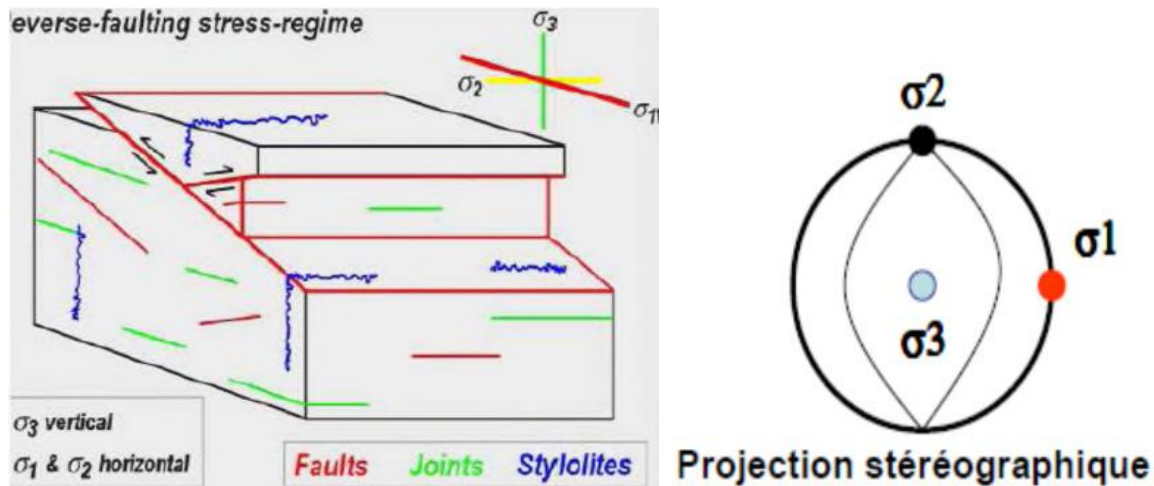


Figure I.12. Projection stéréographique d'une faille inverse [3].

La détermination des contraintes verticale  $\sigma_3$  et horizontales  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  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  $\Phi$ , la cohésion  $C$  et le domaine de rupture du massif [3].

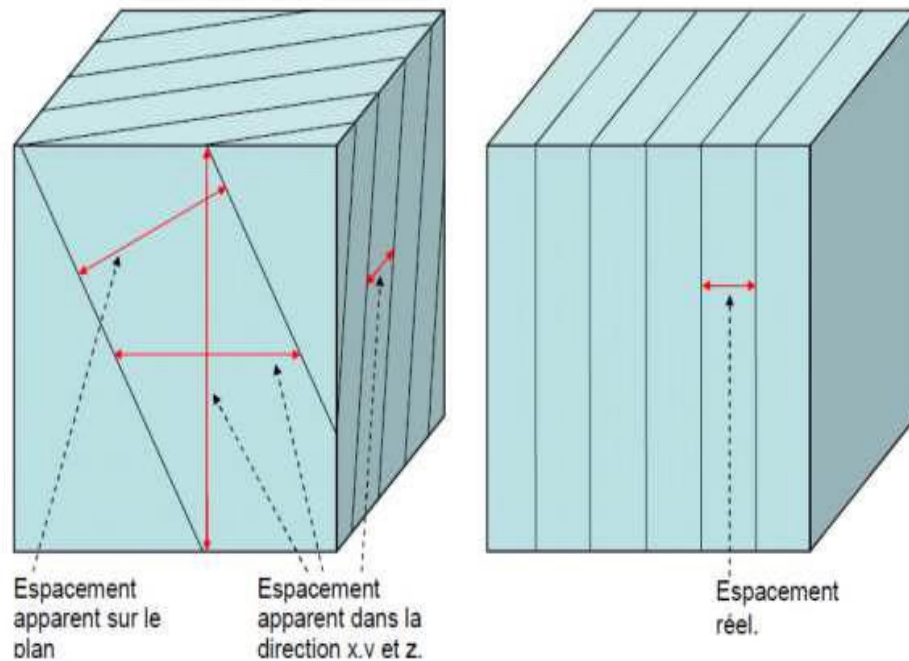
### B- Extension :

La taille des fractures conditionne, avec leur orientation et leur espacement, leur probabilité d'intersection. Par conséquent, elle joue un rôle essentiel dans la connectivité des blocs. Une fracture est souvent assimilée à une forme géométrique simple dont une dimension particulière définit son extension (exemple : diamètre d'un disque dans l'espace, longueur d'un segment dans un plan). Cette dimension n'est pas accessible directement ; il faut la déduire de la continuité des traces observées sur l'affleurement. Les diamètres peuvent suivre une loi exponentielle décroissante ou log-normale. [2]

**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 et de la blocométrie in-situ du massif. La distribution de l'espacement est souvent exponentielle [2].



**Figure I.13.** Mesure de l'espacement [41]

On décrit l'espacement selon les mesures des discontinuités :

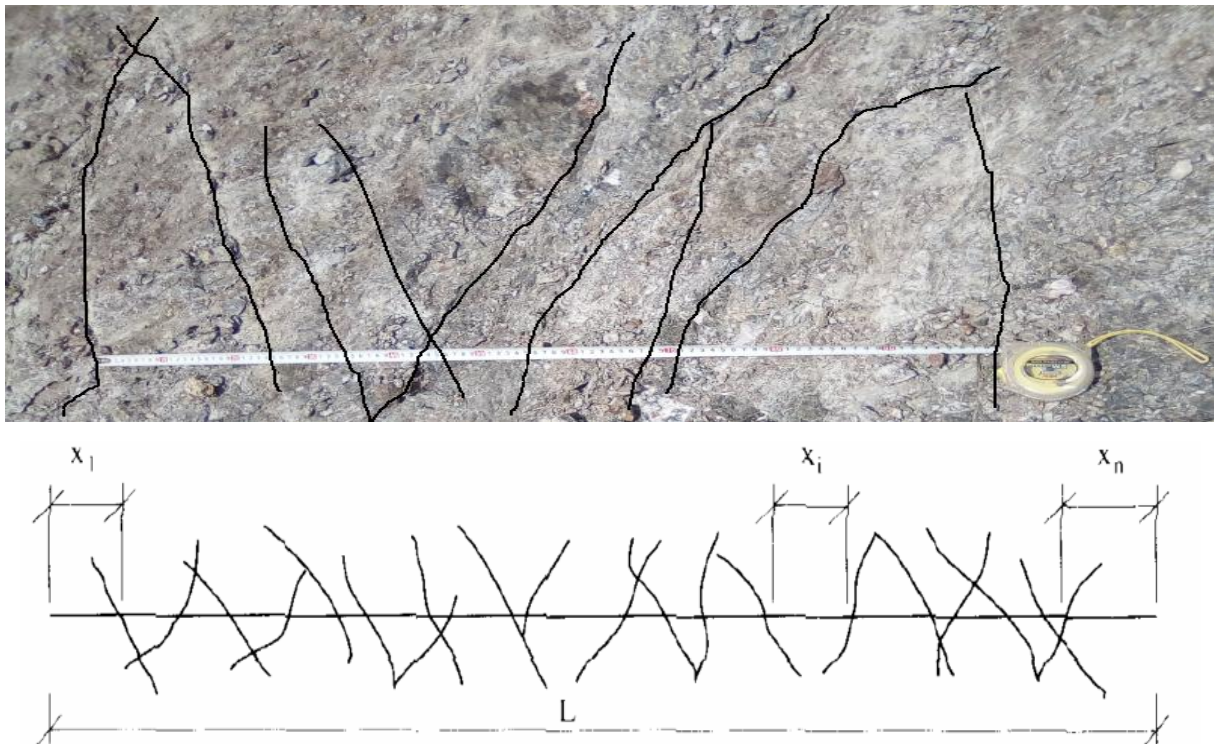
**Tableau I.1.** Description de l'espacement des discontinuités [41]

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

Si, le long de la ligne du levé,  $N$  est le nombre de discontinuités et  $L$  la longueur du levé, la fréquence ( $\lambda$ ) 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 [21].



**Figure I.14.** Mesure de la fréquence des discontinuités

**e. Degré de fracturation:** lorsque des forages carottés sont disponibles, cette qualité est désignée par RQD (Rock Qualité Désignation) (Der, 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. La rugosité :** Elle correspond à la forme de la surface de discontinuité d'un ensemble individuel à petite échelle. Elle doit être évaluée sur la base des critères visuel et sensoriel. Pour décrire la rugosité, il convient d'utiliser les termes suivants:

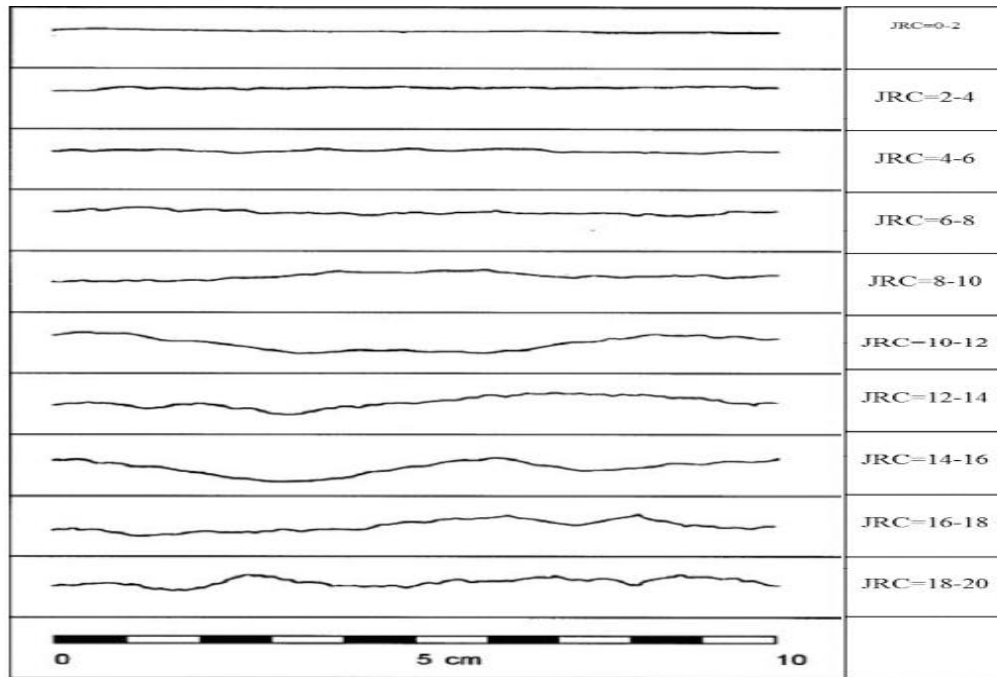
- **Très rugueuse :** la surface est très rugueuse et présente d'importantes aspérités visuelles, semblables à du gravier fin ou de calibre moyen.
- **Rugueuse :** lorsqu'on passe la frôle du doigt, la surface est rugueuse comme du papier de verre à gros grain. Les aspérités peuvent être visuelles.

- **Légèrement rugueuse** : la surface est rugueuse comme du papier de verre à grain plus fin. Les aspérités ne sont pas visibles à l'œil nu.

- **Lisse** : la surface est plutôt lisse, comme du papier.

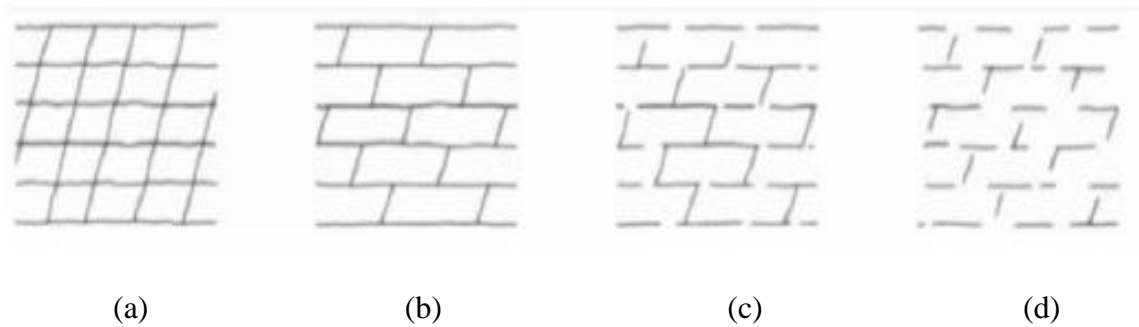
- **Miroir de faille** : la surface est très lisse, voire polie, et présente une striation due à un déplacement en cisaillement.

Un coefficient de rugosité du joint (JRC) peut être adapté : il va de 0, pour une surface plane et lisse, à 20, pour une surface très rugueuse.



**Figure I.15.** Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de Rugosité du joint (JRC) [21]

**g. La persistance** : La persistance est l'extension spatiale où la longueur d'une discontinuité peut être directement mesurée en observant les longueurs des traces des discontinuités sur les affleurements [41]



**Figure I.16.** Persistence de différents ensembles de fractures(11)

(a): Deux ensembles de diaclases persistants avec persistance élevée ;

(b): Un ensemble de diaclases avec persistance élevée + un ensemble de diaclases discontinues avec persistance moyenne ;

(c) : Deux ensembles de diaclases discontinus avec persistance moyenne ;

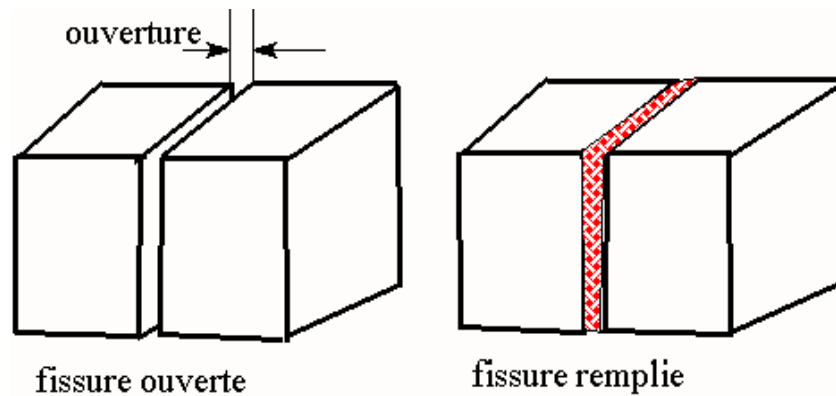
(d) : Deux ensembles de diaclases discontinus avec faible persistance.

On classe les persistances des discontinuités selon la longueur de leurs traces

**Tableau I.2.** Classification des discontinuités selon leur extension [41]

Persistance	Longueur de la trace (m)
Persistance très faible	<1
Persistance faible	1-3
Persistance moyenne	3-10
Persistance élevée	10-20
Persistance très élevée	> 20

**H .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 [41].



**Figure I.17.** Fissure ouverte et remplie [11].

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,..).

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

**Tableau I.3.** Classification d'ouverture des discontinuités[41]

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	Largement ouvert
1-10 centimètre	Très largement ouvert
10-100 centimètre	Extrêmement ouvert
>1 mètre	Caverneux

### I.5.Conclusion

Les massifs rocheux sont présentés comme un milieu discontinu, composé de discontinuités et de la matrice rocheuse.

La présence des discontinuités peut avoir une grande influence sur le comportement et la structure du massif.

L'étude des massifs rocheux ne sont donc pas seulement basée sur la caractérisation de la roche saine, mais on doit se basé sur la caractérisation géométrique des discontinuités.

# *Chapitre II*

## **Les systèmes de classification des massifs rocheux**

## Chapitre II : Les systèmes de classification des massifs rocheux

### II.1. Introduction

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

#### II.2.1. Types et buts des systèmes de classification

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

Les systèmes de classification prennent en considération plusieurs facteurs affectant la stabilité des massifs rocheux. Ces facteurs sont reliés notamment à la résistance de la matrice rocheuse, la présence de l'eau et la description des discontinuités (nombre de familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage...). 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.
- 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 [15]

### II.3. Les différents systèmes de classification

Ces systèmes de classification ont été développés à une époque où la plupart des ouvrages d'excavation sont réalisés par technique d'essai-erreur. De nos jours, l'utilité de ces systèmes n'est plus recommandée et des précautions doivent être appliquées lorsque ces documents sont consultés, car ces systèmes sont développés pour des conditions d'utilisation particulière ou bien calibrés d'après un nombre très limité d'études de cas documentés. Actuellement, il existe plusieurs systèmes de classification modernes dans la littérature. Le Tableau 1 énumère ceux-ci, ainsi que les systèmes plus anciens.

**Tableau II.1.** Systèmes de classification du massif rocheux [30] ; [12]

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

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

Les systèmes le plus utilisés sont sans doute le "Rock Quality Designation" (RQD), "Rock Mass Rating" (RMR) et "Rock Mass Quality" (système Q), ainsi que le GSI. 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.2.2. Rock Qualité Désignation (RQD)

Deere (1964) propose un paramètre évaluant la qualité du roc de la masse rocheuse selon un index intitulé RQD (Rock Qualité Désignation). Obtenu à partir de carotte de forage géologique, cet indice représente l'évaluation du pourcentage des carottes récupérées sur une longueur de course précise. Basée sur un procédé qualitatif, seule la somme des longueurs de morceaux de plus de 10 Cm est conservée et cette somme est divisée par la longueur de course de la carotte de forage. Ce paramètre est défini comme suit [26]

$$\text{RQD} = \frac{\sum \text{longueur des morceaux} \geq 10\text{cm}}{\text{Longueur du forage}} * 100$$



Figure II.1 .Un caisse la carotte de calcaire d'Ait Yahia moussa

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

$$\text{RQD} = 115 - 3.3J_v \quad (\text{II.2})$$

Où  $J_v$  est la densité volumique des joints, c'est-à-dire la somme du nombre de joints par  $\text{m}^3$ , pour toutes les familles de discontinuités présentes, Ce paramètre permet de déterminer les dimensions des blocs dans un système rocheux fracturé.

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

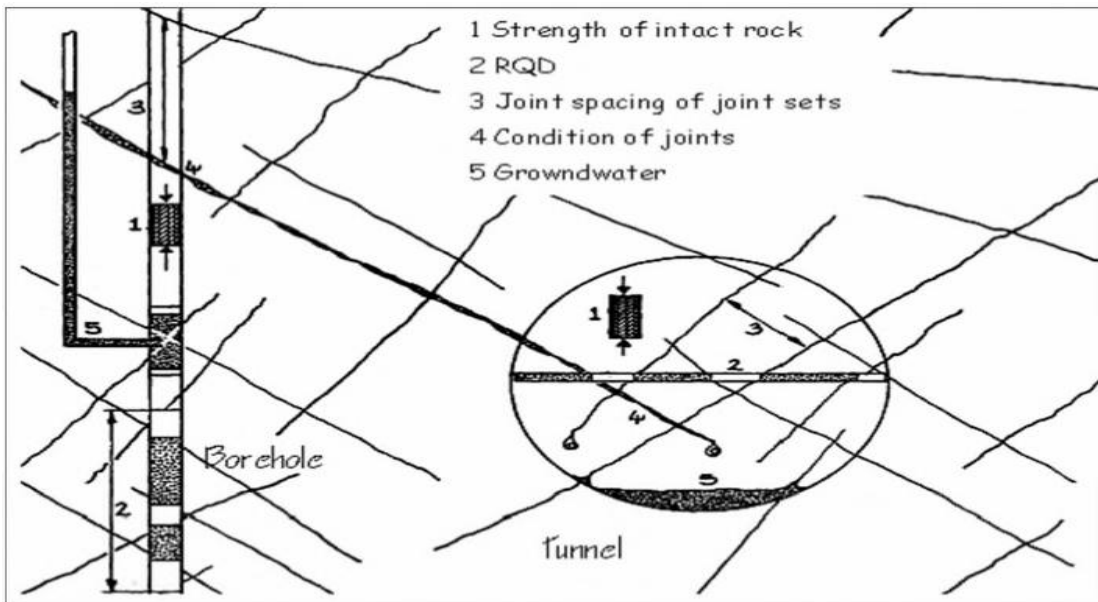
**Tableau II.2.** Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux

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

### II.2.3. Système RMR (Rock Mass Rating)

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

Le RMR résulte de la somme de cinq notes de caractérisation (d'A1 à A5) et d'une note d'ajustement. Ces paramètres sont illustrés sur la figure II.2.



**Figure II.2.** Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR [15].

La somme de ces notes attribue une valeur comprise entre 0 et 100 au massif. Cette valeur utilise à plus de 70% la fracturation et elle accorde 15% d'influence aux propriétés de la matrice rocheuse et 15% à la présence d'eau [1].

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

- A1 (Straight of intact rock matériel): 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 Qualité Désignation RQD): il caractérise la qualité des carottes de sondage en calculant le rapport entre la longueur cumulée des carottes supérieures à dix centimètres et la longueur totale considérée note: de 3 à 20).
- A3 (Spacing of discontinuités): dan l 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 discontinuité) : 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).

La somme des cinq premiers indices caractérise le RMR de base. Quant aux travaux souterrains, il faut ajouter l'effet du facteur correctif [1] (Bieniawski [1989]).

Le RMR<sub>89</sub> s'écrit alors :

$$\text{RMR}_{89} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B$$

La version 1976 de système de classification (RMR 76) l'utilisation de RMR se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants et leurs pondérations

- A1 : la résistance en compression uniaxial de la roche intacte
- A2 : RQD
- A3 : Espacement des diaclases
- A4 : condition des joints
- A5 : l'état l'infiltration d'eau souterraine
- A6 : orientation des discontinuités

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

Chacun des paramètres précédents aura une note, la somme des notes, après avoir été ajustée par une note relative à l'orientation (Tableau II.2), nous donne une appréciation générale de la qualité du rocher (Tableau II.3).

**Tableau II.3.**Classification RMR(Bieniawski).

PARAMETRES			COEFFICIENTS						
1	Résistance de la Roche (MPa)	Indice Franklin (MPa)	>10	4-10	2-4	1-4	Indice Franklin non utilisable (MPa)		
		Résistance à la compression (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Note	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D.		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Note		20	17	13	8	3		
3	Espacement des Joints		>2m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2m	<0,06 m		
	Note		20	15	10	8	5		
4	Nature des joints		Surfaces très rugueuses non continue Eponte en contact Eponte non	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte non Altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte Altérées	Surfaces lustrées ou Remplissage <5 mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	Remplissage mou>5 mm ou joints ouverts>5 mm joints continus		

		Altérées					
Note		30	25	20	10	0	
5	Venues d'eau	Débit sur 10 m	Aucune venue d'eau	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min
		Pression d'eau contrainte principale	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
	Hydro-Géologie	Complètement sec	Humide	Suintements (eau interstitielle)	Pression d'eau Modérée	Problèmes sérieux de venues d'eau	
Note		15	10	7	4	0	

**Tableau II.4.** Classe de rocher 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 rocher	II bon rocher	III rocher moyen	IV rocher médiocre	V rocher 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

**II.2.4. Le Q –Système**

Barton et al. (1974) ont introduit le système Q, un indice permettant de décrire la qualité de la masse rocheuse pour l'excavation de tunnels. Le système de classification se nomme Rock Mass Quality ou Tunneling Quality Index (système Q) ou tout simplement système du NGI en hommage de l'Institution Géotechnique Norvégienne

Le système Q juge important d'évaluer, en tant que paramètres de classification, six caractéristiques particulières du massif rocheux :[14]

$$Q = \frac{RQD}{jn} \cdot \frac{jr}{ja} \cdot \frac{jw}{SRF}$$

- 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);
- Facteur de réduction pour les contraintes in situ (SRF).

La valeur des différents paramètres de cette classification, ainsi que des notes explicatives supplémentaires permettant d'évaluer ceux-ci plus adéquatement

Le calcul de la cote Q se fait comme suit et varie sur une échelle logarithmique de 0,001 à 1000

$$Q = \left(\frac{RQD}{JN}\right) \cdot \left(\frac{JR}{JA}\right) \cdot \left(\frac{JW}{SRF}\right)$$

Les trois quotients de la formule représentent des caractéristiques particulières du massif rocheux, 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;
- 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.

La cote Q permet d'évaluer qualitativement la masse rocheuse selon neuf catégories de qualité pour la construction de tunnels. Le Tableau II.6 présente cette qualification:

**Tableau II.5.** Évaluation de la cote Q et de la qualité du massif [14]

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

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

$$\text{RMR} = 9 \log Q + 44$$

Le RMR et le Q-system ne prennent pas en considération les mêmes paramètres et donc, elles ne sont pas équivalentes.

### II.2.5. Le Géological Strenght Index (GSI)

Introduit par Hoek et al. [1995] puis amélioré par Hoek et Brown [1997], le Geological Strength Index ne présente pas une classification géo mécanique en soi. Cependant, il constitue un lien entre le RMR (Q-system) et la détermination des paramètres de déformabilité et de résistance des massifs rocheux.

Afin d'estimer le GSI, il est nécessaire de calculer le RMR de base et le Q' qui sont des valeurs modifiées de RMR et de Q. Le RMR de base est calculé en retenant une valeur 15 pour le coefficient relatif à l'eau (A5) et une valeur nulle pour le coefficient de correction relatif à l'orientation des discontinuités A6

$$RMR_{Base} = A1 + A2 + A3 + A4 + 15$$

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

$$Q' = \frac{RQD}{JN} \cdot \frac{JR}{JA}$$

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

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

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

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, 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. [22]

**Tableau II.6.** Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI [15].

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

### II.3. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)

Introduit par Romana en 1985, Le SMR est davantage orienté vers la stabilité des pentes rocheuses. 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 [17]

$$SMR = RMR_{base} + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4$$

F1, F2 et F3 : 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).

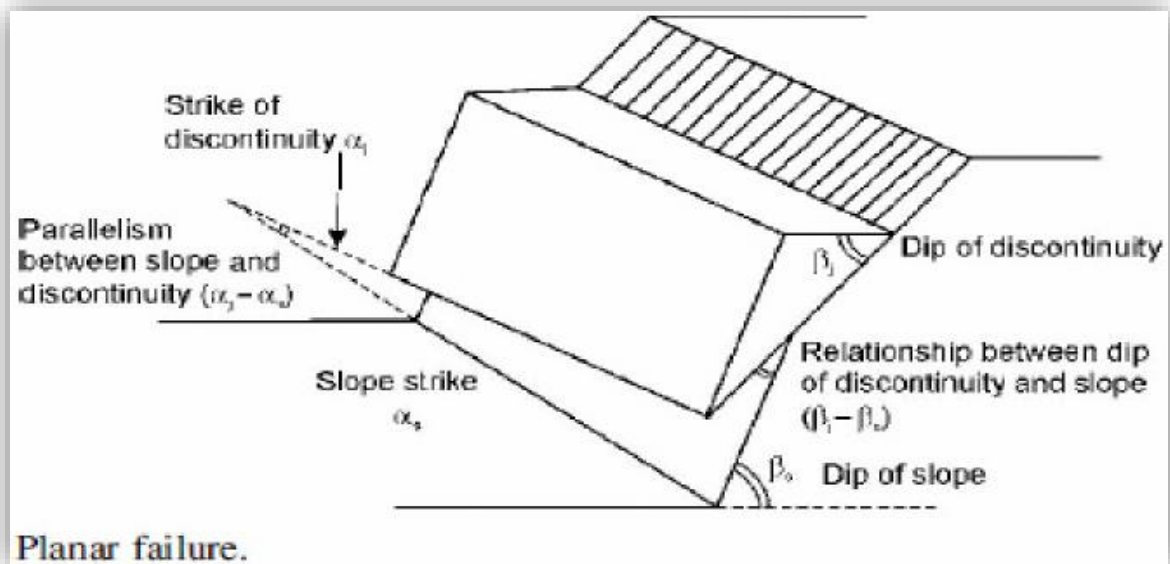
$$F1 = (1 - \sin A)^2$$

A est l'angle entre les directions des joints 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 est également été établi empiriquement par l'équation suivante :

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

$\beta_j$  est le pendage des joints.



**Figure II.4.** Orientation d'une pente de type plane. [35]

- 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 telles la végétation; F4=15
  - La roche prédécoupée augmente également la stabilité; F4=0
  - 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); F4= -8
  - L'excavation mécanique par arrachage dans les roches très fracturée n'augmente ni ne diminue la stabilité du talus. F4=0

Tableau II.7. Le Tableau de classification de Romana [31]

TYPE OF FAILURE		VERY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	UNFAVORABLE	VERY UNFAVORABLE		
P	A	$ \alpha_j - \alpha_s $	$>30^\circ$	30-20°	20-10°	10-5°		
T							$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $	
W								
P/T/W	F <sub>1</sub>		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00	
P/W	B	$ \beta_j  \text{ ó }  \beta_j $	$<20^\circ$	20-30°	30-35°	35-45°	$>45^\circ$	
P/W			F <sub>2</sub>		0.15	0.40	0.70	0.85
T	1.00							
P	C	$ \beta_j - \beta_s $	$>10^\circ$	10-0°	0°	0-(-10°)	$<(-10^\circ)$	
W			$ \beta_j + \beta_s $	$<110^\circ$	110-120°	$>120^\circ$	-	-
T				F <sub>3</sub>		0	-6	-25
P/T/W								
<b>EXCAVATION METHOD (F<sub>4</sub>)</b>								
Natural slope			+15	Blasting or mechanical		0		
Presplitting			+10	Deficient blasting		-8		
Smooth blasting			+8					
P: planar failure; T: toppling failure; W: wedge failure.								

Selon les valeurs SMR, Romana (1985) a défini cinq classes de stabilité. Ceux-ci sont décrits dans le tableau II.9. Il a déduit du tableau que les pentes avec une valeur inférieure à 20 SMR peuvent échouer très rapidement. Aucune pente n’a été enregistrée avec une valeur de SMR en dessous de 10, parce que cette pente ne pourrait exister physiqu[31]

**Tableau II.9.** Les différentes classe de stabilité par 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	Grand plan	Chute de Blocs	Pas de chute
Probabilité de chute	0.9	0.6	0.4	0.2	0

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

**Tableau II.9.** 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.4. Commentaire sur les systèmes de classification

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

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

- 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.5. Conclusion**

Les systèmes de classifications des massifs rocheux sont des méthodes empiriques qui déterminent les propriétés du massif en fonction de plusieurs facteurs affectent sa stabilité.

Leur rôle consiste à combiner de manière structurée les informations provenant d'observation de mesure ou encore de l'expérience de manière à fournir des estimations quantitative et qualitative sur la situation de massifs et le type de soutènement adéquat.

# CHAPITRE III

## **Présentation de la zone d'étude**

## Chapitre III

### Présentation de la zone d'étude

#### III.1. Introduction

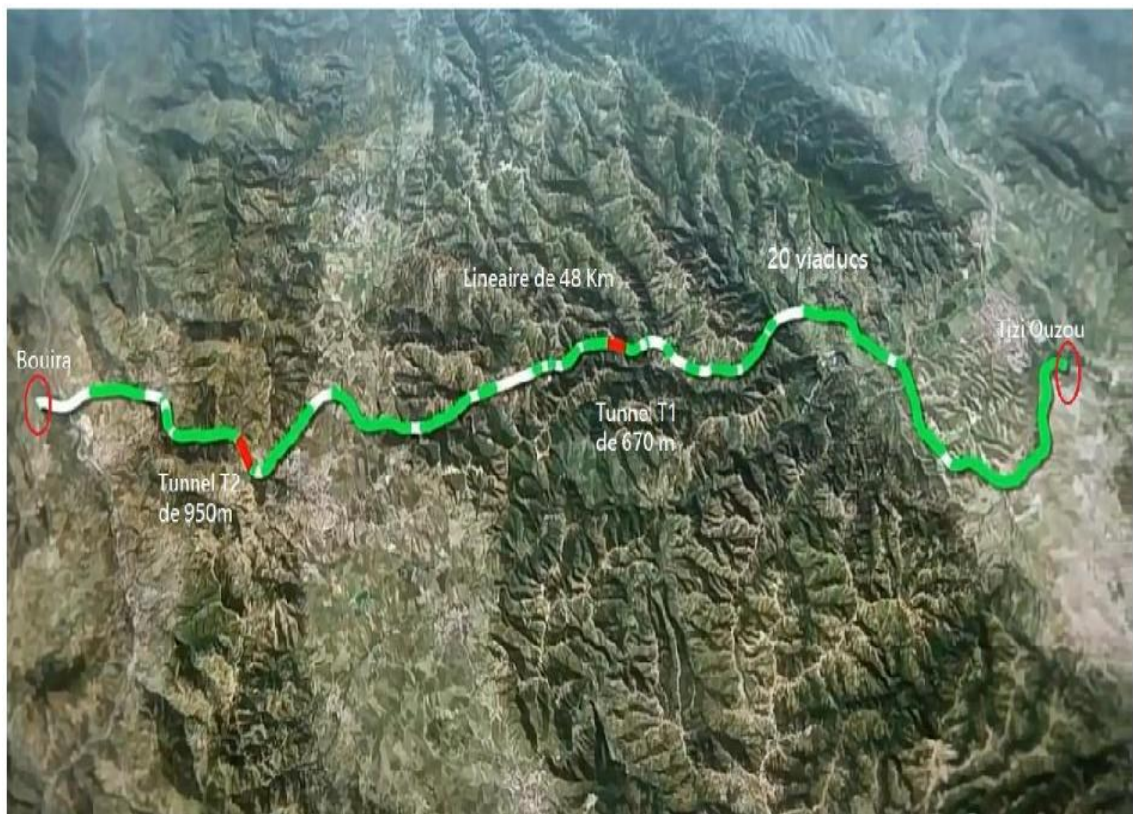
Le vaste chantier de l'autoroute Est-Ouest algérien destiné à améliorer le réseau routier national, ne traverse pas toutes les grandes villes telles que Tizi-Ouzou. Pour pallier à cet isolement, des pénétrantes telle que celle reliant la ville Tizi-Ouzou à celle de l'autoroute Est Ouest ont été planifiées et mises en exécution.

La commune d'Ait Yahia Moussa s'inscrit dans le cadre de cette pénétrante. Dans ce chapitre, nous allons caractériser quelques massifs rocheux abritant une partie de ce projet.

#### III.2. Présentation de la pénétrante de Tizi ouzou- Bouira

Le tracé de la pénétrante de Tizi-Ouzou à l'Autoroute Est-Ouest est scindé en deux sections : section 1, elle prend naissance au raccordement avec l'évitement sud de la ville de Tizi-Ouzou jusqu' à la limite de la commune de Draa El Mizan.

Pour la section 2, débute de la limite de la commune de Draa El Mizan dans la wilaya de Tizi- Ouzou et se termine au raccordement avec l'autoroute Est-Ouest dans la commune de Djebahia Wilaya de Bouira (Figure III.1)



**Figure III.1.** Présentation sommaire du projet de la pénétrante Tizi Ouzou –Bouira[5]

### III.2.1. Consistance physique de la pénétrante

Linéaire de l'axe principal de l'autoroute: 48KM

Profil en Travers: 2x3 voies

Nombre total d'ouvrages: 41 Unités répartis sur 10 KM.

Nombre de viaducs: 21 Unités répartis sur 09 KM.

Nombre d'ouvrages hydrauliques: 51 Unités

Nombre de tunnels: 02 Unités en Bitube réparti sur 1.620 KM

Nombre d'échangeurs: 08 Unités.

### III.2.2. Situation géographique

Les massifs rocheux qui constituent le cas d'étude dans ce mémoire font partie de la section 1 de cette pénétrante, ils sont réalisés dans le cadre du projet de la pénétrante reliant la wilaya de Tizi-Ouzou à l'autoroute Est-Ouest (Section 1). Ce terrain d'étude fait partie administrativement de la commune d'Ait Yahia Moussa, appartenant à la Daïra de Draa El Mizan et est située à 20 km au Sud-ouest de la Wilaya de Tizi-Ouzou et à 115km au sud-est d'Alger, accessible à partir de la RN25. Il se situe exactement aux points kilométriques **Pk 12 - Pk 16** de l'axe de la pénétrante (Figure III.2)



Figure III.2. Localisation de la zone d'étude. [38]

### III.3. Hydrogéologie

#### III.3.1. Définition de l'Hydrologie

L'hydrologie peut être définie brièvement comme la science qui étudie le cycle d'eau dans la nature et l'évolution de celle-ci à la surface de la terre et dans le sol tout en faisant appel à de nombreuses sciences. Elle est devenue aujourd'hui une technique importante de l'art de l'ingénieur intéressé par l'exploitation et le contrôle des eaux naturelles.

#### III.3.2. l'Hydrologie de la région d'étude

Le réseau hydrographique de la région d'étude est caractérisé par :

- Un Oued principale (Oued Guergour) : Oued Guergour est une rivière qui coule à l'ouest de la ville de Tizi Ouzou. Elle est alimentée par des rivières en amont du sud de Tizi Ouzou qui drainent également à Oued Guergour du sable et du gravier. En effet, l'Oued Guergour se jette dans l'Oued Sebaou qui déferle lui aussi des crêtes les plus élevées de la Grande Kabylie. C'est une rivière difficile à traverser en hiver.

- Les oueds secondaires, dont le principal est Acif Tleta et Acif Tala Imeddrane.

Les données hydrogéologiques sont à prendre en considération dans l'étude d'un tracé autoroutier car, comme nous avons pu le constater dans le chapitre II, l'eau peut avoir une grande influence sur la résistance des roches.

Dans le cadre de ce projet, l'influence de l'eau sur les travaux peut être importante.

. Les différents types de massifs rocheux rencontrés sont perméables.

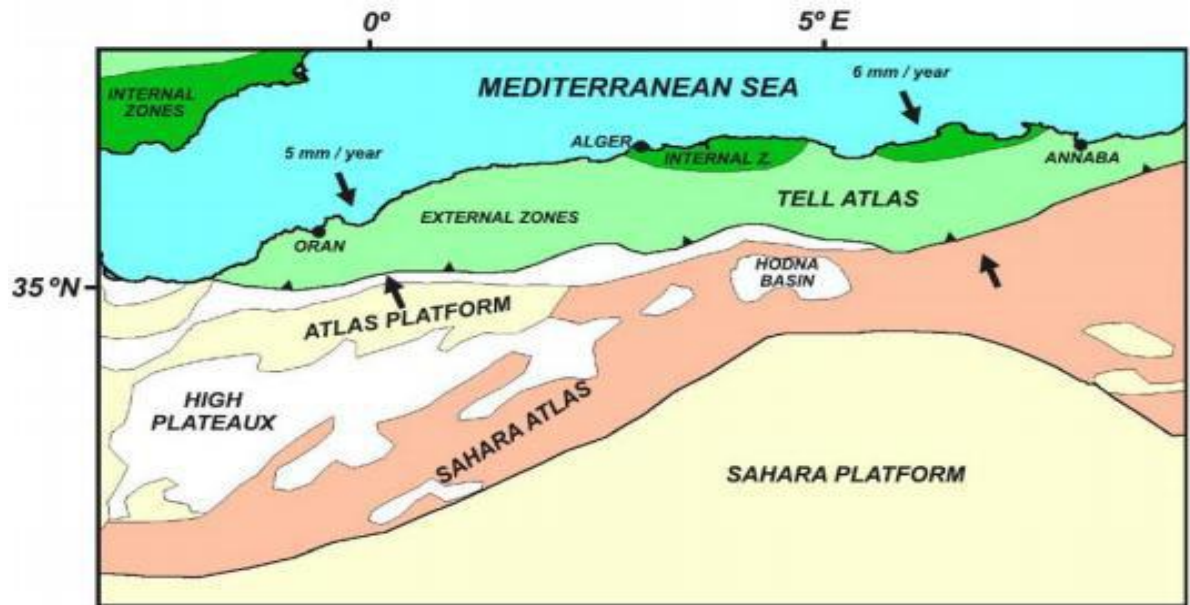
Cette perméabilité sera fonction du degré de fracturation de la roche.

#### III.4. Contexte géologique de la zone d'étude

Les massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa sont localisés dans la partie septentrionale du pays, qui est connue pour sa complexité géologique, et ses différentes régions montagneuses, principalement localisés dans l'Atlas Tellien (encore appelé Tell) et plus précisément dans les Kabyliques. Pour arriver à cerner cette complexité géologique, nous allons tout d'abord nous intéresser à l'Atlas tellien qui est la région dans laquelle sera réalisé le projet au niveau de la commune d'Ait Yahia Moussa, puis nous intéresserons à une zone plus réduite qu'est celle du tronçon PK12 au PK16.

### III.4.1. Cadre Géologique régionale

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 Kabylides, des flyschs et des nappes telliennes) et le système de l'Atlas intracontinental (au sud).



**Figure III.3.** Carte schématique montrant les domaines géomorphologiques en Algérie.[40]

#### III.4.1.1. 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 les 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) s'exprime (Figure III.3).

### III.4.1.1.a. Les Kabyliques

Les kabyliques ou zones internes (Tell septentrional), comprenant d'Ouest en Est, les massifs du Chenoua et d'Alger, la Grande Kabylie et la Petite Kabylie (voir Figure III.4) sont composées de socle métamorphique cristallophyllien paléozoïque (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes) qui provient de la fragmentation de l'AlKaPeCa (Alboran, Kabyliques, Peloritain, Calabre) et la dorsale Kabyle (ou Chaîne calcaire Méso- Cénozoïque) qui est découpée en trois principales unités (interne, médiane et externe), (voir Figure III.5) . Ces différentes unités se différencient par le faciès et l'épaisseur des calcaires. Bien qu'elle soit appelée "Chaîne calcaire" à cause de l'importance du Jurassique inférieur calcaire, cette dorsale contient également d'autres formations telles que les schistes primaires, des grès permien, du nummulitique supérieur.

La dorsale Kabyle se présente sous forme d'écaillés chevauchant les nappes de flyschs le long d'un grand chevauchement à grand pendage nord, et est affectée de plis récents (Cénozoïque) longitudinaux (Chenoua, Djurdjura) [20]

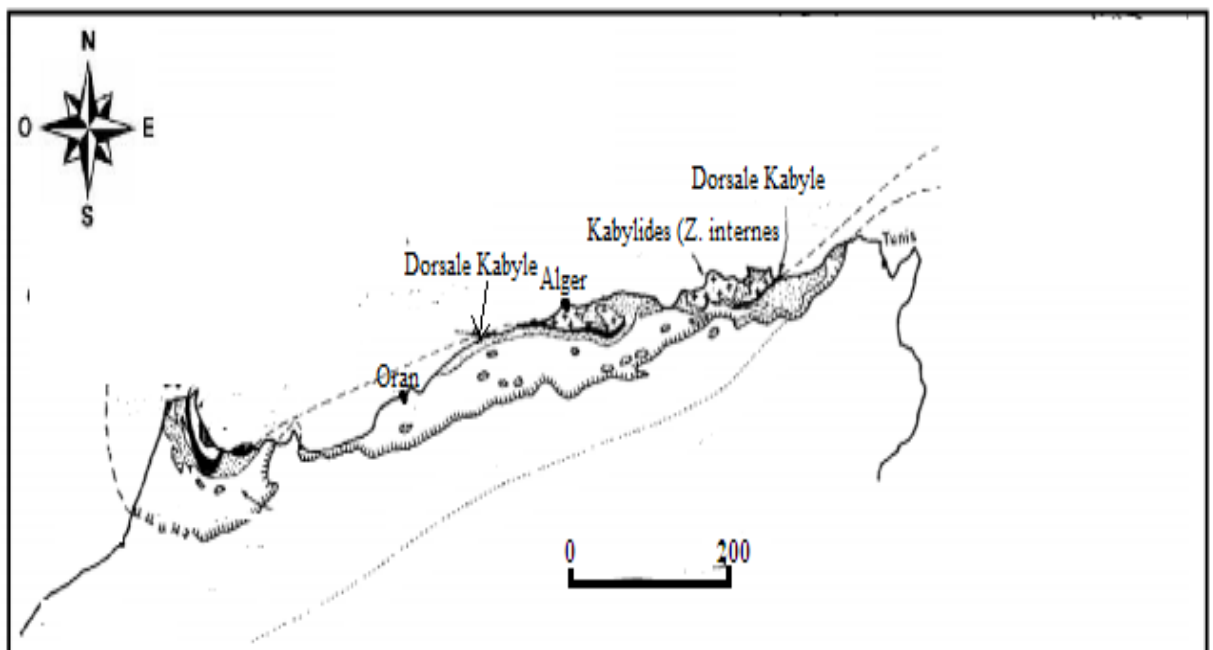
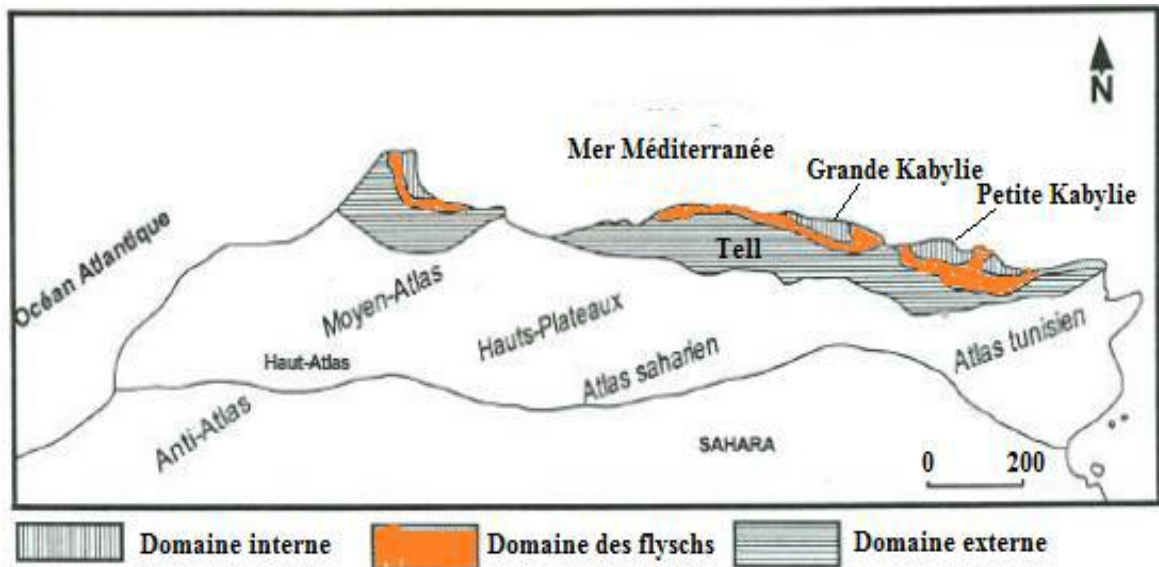
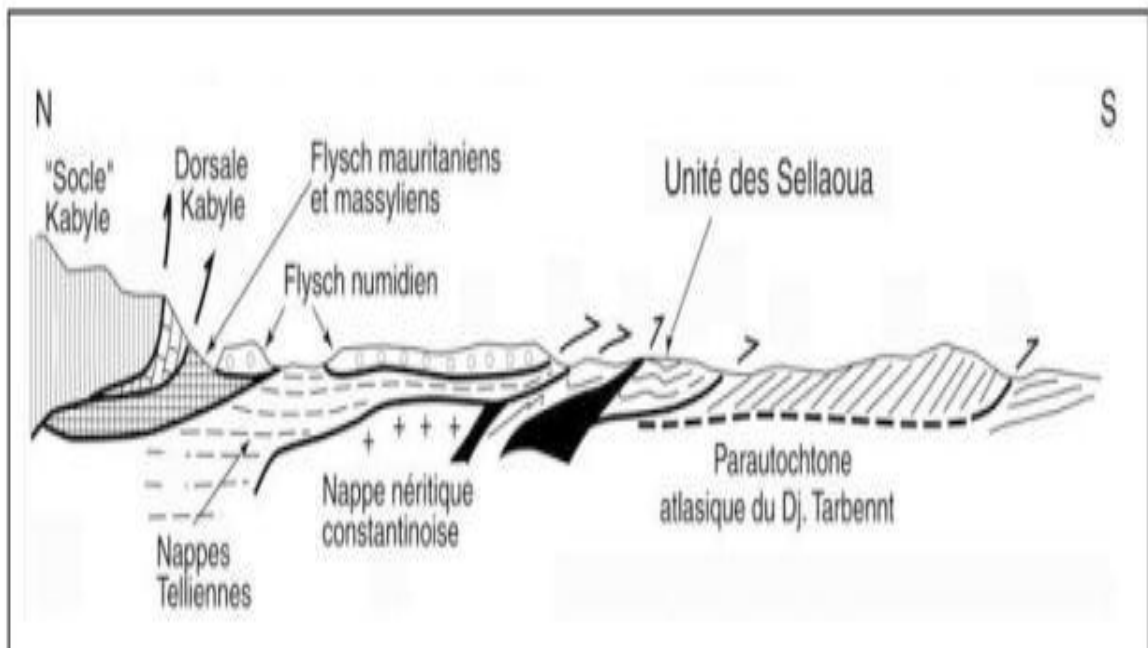


Figure III.4. Orologène alpin périméditerranéen [20]



**Figure III.5.** Schéma structural simplifié des Maghrébides [39]

Pour bien comprendre l'agencement de ces différentes unités, on se réfère à la (Figure III.6).



**Figure III.6.** Coupe générale présentant les chevauchements dans les maghrébides [25]

#### III.4.1.1.b. Le domaine de flyschs

Selon (Domzig, 2006), ce domaine est constitué par des nappes de Flyschs qui, sont composées de conglomérats et autres matériaux détritiques. Les nappes de Flyschs sont également retrouvées du Maroc à la Sicile, en passant par la péninsule ibérique, associées aux zones internes.

En Algérie, ces nappes (voir Figure III.6) sont soit en position interne, c'est-à-dire rétrocharriées sur les zones internes (flyschs Nord-kabyles ou maurétaniens), soit en position relativement externe à la bordure Sud de la Dorsale Kabyle (flyschs Sud-kabyles), soit totalement externes, charriées jusqu'à une centaine de kilomètres au Sud, « flottant » sur le Tell externe. [37]. Il existe également d'autres classifications proposées par Bouillin et al (1986) présentées dans (Domzig, 2006) : les flyschs maurétaniens (en position interne), les flyschs massyliens (les plus externes), et les flyschs numidiens (surimposées en partie aux flyschs massyliens). Ces dernières (d'âge Oligocène supérieur-Burdigalien inférieur) sont plus récentes.

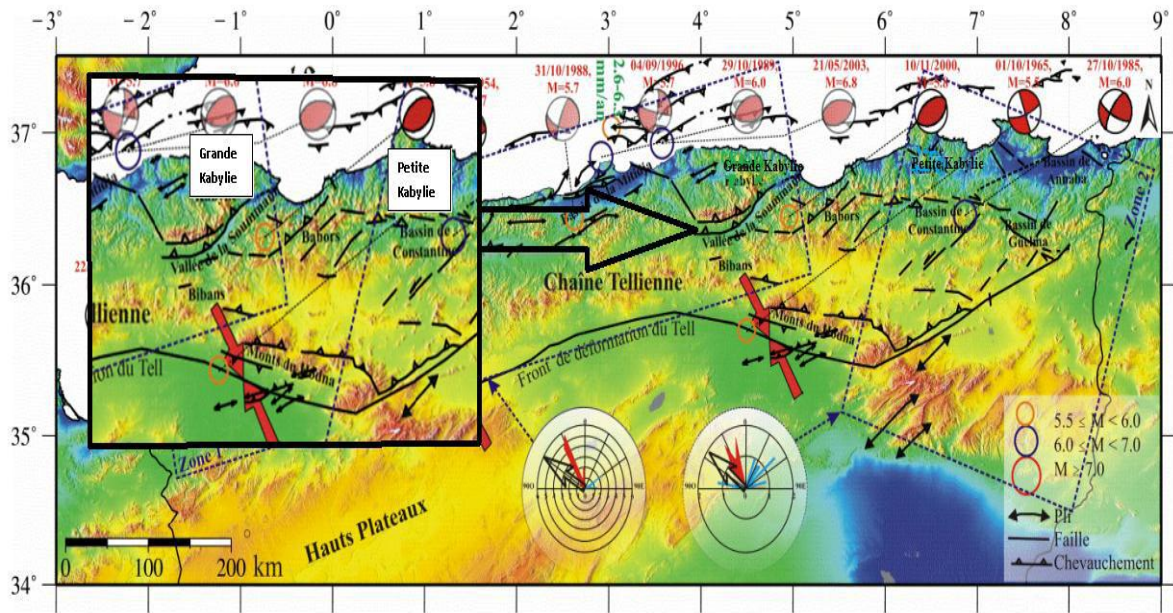
#### **III.4.1.1.c. Le domaine externe**

Il est représenté par d'importantes séries mésozoïques et cénozoïques, à dominante marno-calcaire ou gréseuse. Leur structure tectonique en nappes décollées au-dessus du Trias gypso-argileux, montre une progression vers le Sud en direction des unités allochtones présahariennes des Hautes plaines. Les massifs des Bibans et de l'Atlas blidéen, d'âge crétacé, sont considérés comme autochtones ou parautochtones. [37]

#### **III.4.1.2. Sismotectonique**

Suite à un mouvement de compression à la frontière des plaques tectonique d'Afrique et d'Eurasie, des multitudes de séismes allant de modéré à fort ont conduit à la formation de failles inverses dans le nord d'Algérie.

Le contexte géodynamique régionale a engendré dans le nord de l'Algérie, sur une bande d'environ 200 à 300 km de large, un ensemble de structures tectoniques (plis, failles) de direction générale perpendiculaire à la direction de convergence (NNO-SSE) des plaques tectoniques. Ces structures tectoniques actives sont ainsi responsables de la répartition spatiale de la sismicité de cette région de l'Atlas Tellien. [6].



**Figure III.7.** Carte sismo-tectonique du nord de l'Algérie montrant les principales structures actives observées dans le Tell [6]

On peut observer à partir de cette carte, l'orientation des plis et des failles en direction NE-SO.

#### III.4.1.2.a. Evolution tectonique

Nous tenterons de reconstituer brièvement la chronologie des événements tectoniques importants ayant affectés notre région d'étude après l'installation du socle métamorphique. En se basant sur les travaux réalisés par D.Raymond 1976, D.Delga 1969 et J.P.Gelard 1979. La période pré-orogénique qui commence dès le Trias et se poursuit jusqu'à l'Eocène. Cette phase est caractérisée par plusieurs transgressions sur la partie méridionale de la région avec des dépôts de sédiments argileux, schisteux et gréseux. Les mouvements locaux notés au cours de cette période (discordance, fractures, plissements) ne paraissent pas liés à des phénomènes généraux. La période orogénique va du début de l'Eocène jusqu'à la fin du Miocène. Au lutétien : émergence du socle Kabyle bordé au sud par la dorsale Kabyle. Les premiers mouvements tectoniques se manifestent vers la fin du lutétien par un écaillage, et on assiste à des dépôts très fins de marnes et d'argiles. Durant l'Eocène supérieur et l'Oligocène, on observe des décharges conglomératiques, avec un indice de discordance dans la zone des flysch. De l'Aquitainien au Burdigalien moyen : mise en place de dépôt des séries micacées issues de l'érosion du socle kabyle en continuité de sédimentation marneuse et argileuse. Les déplacements principaux des nappes sont plus récents, ils sont postérieurs

aux dépôts Aquitaniens et antérieurs aux dépôts Burdigalien, après l'écoulement des nappes, deux phénomènes tectoniques ont affecté la région : Le Burdigalien terminal est marqué par un réseau de fracturation très dense (Figure III.7) découpant le Nord-Est de la grande Kabylie, et l'abondance relative des failles dans certains secteurs reflète, en grande partie, la nature lithologique des terrains affectés. Les images de satellite offrent un précieux moyen d'analyse de la fracturation, dans la mesure où elles sont plus objectives que la carte géologique (J.P.Gelard 1979). Deux principales directions affectent la Grande Kabylie - N110 : la zone linéamentaire de Kiria s'étend d'Adekar au Dj Zraib (Nord-Est d'Azazga), elle est formée par des alignements morphologiques correspondant aux crêtes ou aux limites d'affleurement numidiennes du Dj. Toukra, Azrou, Toukouch et enfin Zraib. - N 070 : la zone linéamentaire est composée par la vallée de la soummam, de Sidi Aich à Béjaia, par ligne de Toudja, crêtes numidiennes encadrant Tifra, alignement des Babors d'Akbou. - Autres directions c'est la direction N140 de l'oued Aissi elle décale par la bordure du socle Kabyle et pouvait participer aussi au décrochement apparent senestre du massif de Belloua et de Aissa Mimoun (D.Raymond 1976) La structuration suivant les directions N070, N110, N140 n'est pas superficielle mais bien profonde, puisqu'elle affecte le socle. Là où le socle n'affleure pas des indications indirectes prouvent que certains accidents sont ancrés profondément, c'est le cas des accidents qui sont jalonnés par des sources thermominérales ou les eaux sortent à une température d'environ 40°C (J.P.Gelard). C'est le cas de : -Kiria : les émergences ont lieu à proximité de l'intersection des failles N110 et N140 ; Tifra : la source la plus importante (El Hammam Sillal à quelques kilomètres au Sud-Ouest de Tifra) sort le long d'un miroir de faille de direction N140.

### III.4.2. Géologie locale

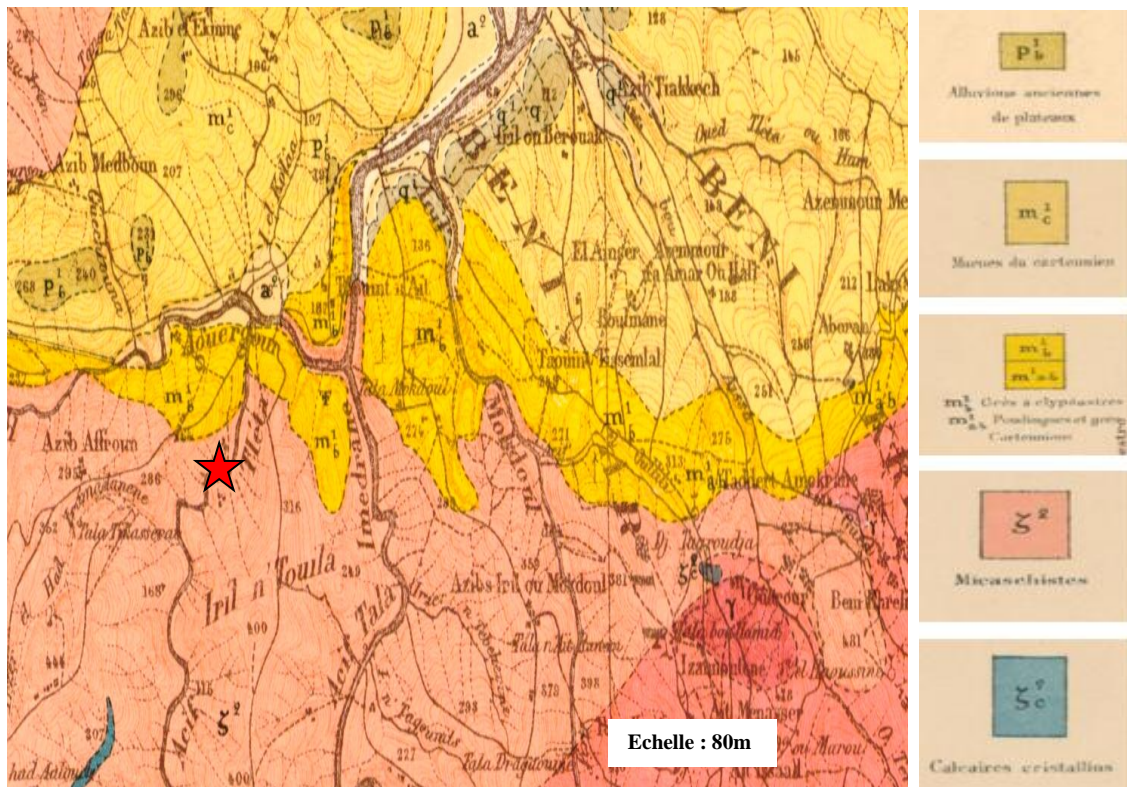
Les massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa se trouvent dans la chaîne des Maghrébides et plus précisément dans les kabyliques.

D'après la carte géologique de la région de Draa El Mizan, feuille N°44 à échelle 1/50 000 du service Géologique de l'Algérie, le tracé routier du projet traverse trois (03) formations distinctes :

- coté Sud (Draa El Mizan), les sols sont représentés par des grès dits de Draa El Mizan puis des argiles et grès Numidiens.
- La partie centrale est constituée de massifs de roches métamorphiques (schistes et phyllades, micaschistes, gneiss et quelques affleurements de calcaire cristallin.

-Au Nord du tracé, les faciès rencontrés sont d'origines sédimentaires, formés d'un niveau gréseux (grès à clypéastes) et d'une épaisse formation marneuse.

Dans les plaines alluviales et dans les lits des oueds, on trouve des dépôts récents de nature alluvionnaire plus ou moins épais.



**Figure III.8.** Extrait de la carte géologique de la région d'étude

(feuille N°44 Dra El Mizane, e : 1/50000)

Les travaux de décapage du terrain du tracé routier (PK 12 au PK 16) notamment la réalisation des fronts de talus du nouveau tronçon autoroutier en question, nous ont permis d'identifier quatre massifs rocheux distincts (figure III.9)

- 1-Un massif rocheux bâti de micaschistes
- 2-Un massif rocheux bâti par des marbres
- 3-Un massif rocheux gréseux
- 4 Un massif rocheux calcaireux

Notre investigation sur site Portera sur les deux formations calcaires au PK12 et Le marbre au niveau du PK16.



Figure III.9. La zone d'étude le tronçon PK12 au PK16. [38]

**III.4.3. Sismicité**

Concernant la sismicité de la région, d'après le RPOA 2008 (Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art), cette région se trouve dans la zone IIA. Selon ce rapport, l'Algérie est divisée en cinq zones de sismicité croissante (voir Figure III.10).

- Zone O : Négligeable ;
- Zone I : Faible ;
- Zone IIA : Moyenne ;
- Zone IIB : Elevée ;
- Zone III : Très élevée.

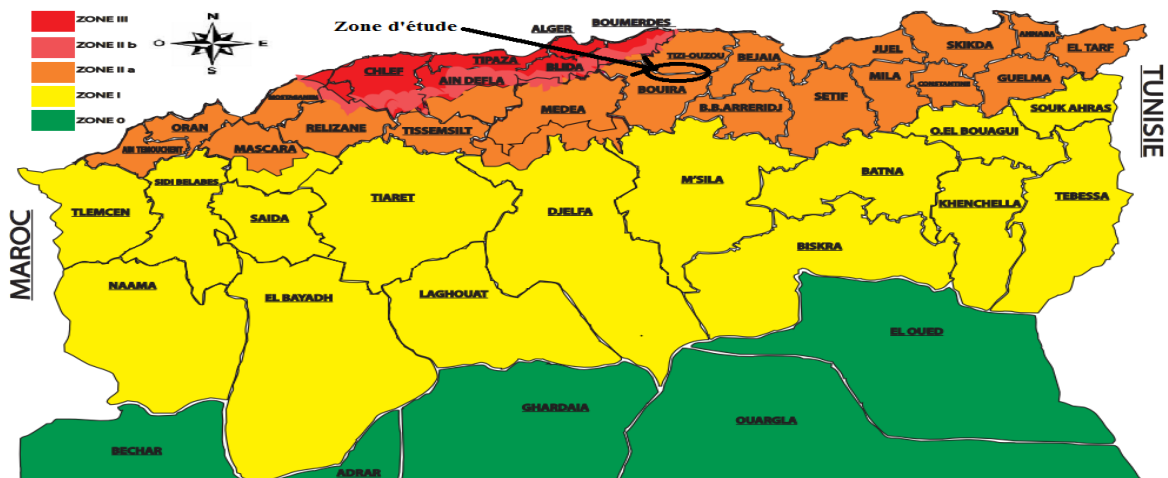


Figure III.10. Carte schématique des zonages sismiques de l'Algérie [32]

### III.5. Conclusion

D'après les données bibliographiques, notre terrain d'étude fait partie d'une zone à moyenne sismicité due à ses structures tectoniques active , 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 PK12 - PK16 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 notamment les calcaires et les marbres .

# *Chapitre IV*

## **Propriétés physico –mécaniques des roches**

## Les propriétés physico-mécaniques des roches

### IV. 1. Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à la description des différents paramètres physiques et mécaniques des roches du marbre et des calcaires du tronçon pk12-pk16 .Les échantillons prélevés sur le terrain sont ainsi :

- Le premier cas : l'échantillon est issu d'un carottage (carotte cylindrique)
- Le deuxième cas : l'échantillon a été prélevé sur la surface de l'affleurement des talus , par la suite on avait confectionné des éprouvettes de forme cubique (10x10x10 cm)

Les propriétés physiques les plus importantes: la teneur en eau, la masse volumique, Indice des vides et porosité,..... etc.

Les propriétés mécaniques de résistance à savoir sont : la résistance à la compression simple, la résistance à la traction.

### IV. 2. Les propriétés physiques des roches

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

##### IV. 2.1.1. Définition

La teneur en eau d'un matériau est le rapport de poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. est exprimée en pourcentage % cette caractéristique permettra par la suite de déterminer d'autres caractéristiques de 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.

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

➤ Expression des résultats

**Tableau IV.1.**La teneur en eau (échantillon cubique)

Roche	Masse(h)	Masse (s)	W%
Calcaire	316 g	314 g	0.63%
Marbre	240 g	238 g	0.84%

**Tableau IV.2.**La teneur en eau (échantillon cylindrique)

Roche	Teneur en eau w%
Calcaire	3.10
Marbra	1.20

**IV. 2.2. La masse volumique**

C'est la masse de l'unité de volume de la roche (g/cm<sup>3</sup>). Suivant l'état du matériau, on définit:  $\rho_s$  la masse volumique absolue ou masse volumique du solide,  $\rho_h$  la masse volumique naturelle,  $\rho_d$  la masse volumique sèche et  $\rho_{sat}$  la masse volumique saturée [11].

**IV. 2.2.1. La masse volumique naturelle  $\rho_h$  [NF P 94-053]**

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

$M_h$  : la masse naturelle;

$V_t$  : le volume de l'échantillon; cm<sup>3</sup>

**Tableau IV.3.**La masse volumique naturelle (échantillon cubique)

Le type de la roche	Masse (h)	Volume (t)	Masse volumique naturelle
Calcaire	2207 g	10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup>	2.207
Marbre	2206 g	10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup>	2.206

**Tableau IV.4.**La masse volumique naturelle (échantillon cylindrique)

Roche	l'échantillon et la profondeur de prélèvement(m)	Dimension (cm)		La masse (g)	Le volume (cm <sup>3</sup> )	La masse volumique naturelle $\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	La masse volumique naturelle moyenne
		D	H				
Calcaire	N°01 9.20-9.40	9.2	17.9	2980	1189.32	2.50	2.47
	N°02 6.00-6.18	9.2	18.2	3000	1209.25	2.48	
	N°03 20.00-20.50	9.2	18.2	2950	1209.25	2.43	
Marbre	N°01 9.00-9.20	9.2	17.6	2958	1169.39	2.53	2.44
	N°02 9.10-9.28	9.2	18.2	2841	1209.25	2.35	

### IV. 2.2.2. La masse volumique sèche $\rho_d$ [NF P94- 064]

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

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

$M_r$  : 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.

$\rho_p$  : Masse volumique de la paraffine = 0,88 g/cm<sup>3</sup>.

$\rho_w$  : Masse volumique de l'eau = 1 g/cm<sup>3</sup>.

**Tableau IV.5.** Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche.

$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Appréciation
< 1.6	Faible
1.6 – 1.8	Moyenne
> 1.8	Dense

Les résultats obtenus sont représenté dans les tableaux suivent

**Tableau IV.6.** La masse volumique sèche (échantillon cubique)

Roche	l'échantillon	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 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique sèche moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
Calcaire	1	125	128.3	77.7	2.66	2.67
	2	61	64.5	38.3	2.74	
	3	142	146	87.3	2.62	
Marbre	1	76	80	47.7	2.73	2.73
	2	71	74.4	44.3	2.88	
	3	52	52.5	31.7	2.56	

**Tableau IV.7.** La masse volumique sèche (échantillon cylindrique)

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 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique sèche moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
Calcaire	N°01 A la surface	30.5	33.3	17.8	2.47	2.44
	N°02 6.00-6.18	84.5	88.1	49.7	2.46	
	N°03 9.20-9.40	58.2	62.4	33.5	2.41	
Marbre	N°01 A la surface	22.3	23.0	12.0	2.18	2.44
	N°02 9.00-9.20	169.2	170.8	102.7	2.55	
	N°03 9.10-9.28	139.4	145.2	85.2	2.61	

➤ **Interprétation des résultats**

En se référant au tableau IV.6, IV.7 on constate que les roches (marbre, calcaire) sont des roches **denses** dans les deux cas

**IV. 2.2. 3. La masse volumique saturée  $\rho_{sat}$  [NF P94- 064]**

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, repeser le tout plongé dans l'eau, La masse volumique saturée tous les vides sont remplis d'eau sol constitué : grains solides+eau.

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

$$\rho_{sat} = \frac{Msat_r}{\frac{Msat_{rp} - Msat'_{rp}}{\rho_w} - \frac{Msat_{rp} - Msat_r}{\rho_p}}$$

$Msat_r$  : Masse de la roche saturée (24h)

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

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

$\rho_p$  : Masse volumique de la paraffine = 0,88 g/cm<sup>3</sup>.

$\rho_w$  : Masse volumique de l'eau = 1 g/cm<sup>3</sup>.

Les résultats obtenus sont représenté dans les tableaux suivants

**Tableau IV.8.** La masse volumique saturée (échantillon cubique)

Type de la Roche	l'échantillon	Masse de la roche saturée $Msat_r$ (g)	Masse de la roche saturée paraffinée à l'air libre $Msat_{rp}$ (g)	Masse de la roche saturée paraffinée dans l'eau $Msat'_{rp}$ (g)	Masse volumique saturée $\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	volumique saturée Masse moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
Calcaire	1	47	48.7	29.6	2.73	2.74
	2	51	54.3	32.7	2.85	
	3	54	47.6	33.2	2.65	
Marbre	1	41	42.1	25.6	2.68	2.81
	2	52	54.3	33.4	2.84	
	3	43	45.5	28.0	2.93	

**Tableau IV.9.** La masse volumique saturée (échantillon cylindrique)

Roche	l'échantillon et la profondeur de prélèvement(m)	Masse de la roche saturée $Msat_r$ (g)	Masse de la roche saturée paraffinée à l'air libre $Msat_{rp}$ (g)	Masse de la roche saturée paraffinée dans l'eau $Msat'_{rp}$ (g)	Masse volumique saturée $\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	volumique saturée Masse moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
Calcaire	N°01 A la surface	75.1	79.4	45.2	2.56	2.48
	N°02 6.00-6.18	97.7	101.4	56.9	2.42	
	N°03 9.20-9.40	280.5	288.8	166	2.47	

Marbre	N°01 A la surface	35.9	37.5	20.7	2.39	2.44
	N°02 9.00-9.20	248.2	253.5	148.7	2.51	
	N°03 9.10-9.28	40	43.2	23.1	2.42	

### IV.2.3. La masse volumique des particules solide $\rho_s$ méthode du pycnomètre [NF P94- 054]

#### IV. 2.3.1. Définition

La masse volumique des particules solides (  $\rho_s$  ) 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.

#### IV.2.3.2 Exécution de l'essai

On prend une quantité du roche concassée à la main et le passer au tamis 2mm, ensuite on prend 50g du tamisat 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  $M_1$  puis on pèse le pycnomètre et son bouchon plus l'échantillon  $M_2$ . Le ballon du pycnomètre est en suite rempli d'eau distillée ou déminéralisée maintenue à la température ambiante et pesé  $M_3$ . et on pèse  $M_4$  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

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

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.

$\rho_w$ : Masse volumique de l'eau égale à 1(g/cm<sup>3</sup>).



A- Pesé du pycnomètre à vide M1.



B- Pèse le pycnomètre et son bouchon Plus l'échantillon M2



C- Pese la masse M3



D- masse de pycnomètre avec son Bouchon plus eau M4

Figure IV.2. Equipement de l'essai.

➤ Les résultats obtenus :

Tableau IV.10. Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides.

	Roche	M1	M2	M3	M4	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ).
échantillon Cubique	Calcaire	207	257	797	765	2.77
	Marbre	207	257	798	765	2.94
échantillon Cylindrique	Calcaire	207	256.7	797.4	765	2.59
	Marbre	207	256.7	796.5	765	2.47

## IV 2.4. Indice des vides et la Porosité

### IV 2.4. 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 est déterminé par la relation suivante :  $e = \frac{V_v}{V_s}$

Et l'indice des vides dépend aussi des paramètres ( $\rho_d$  et  $\rho_s$ ) selon la formule :  $e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant

**Tableau IV.11.** Résultats de la détermination de l'indice des vides.

Type de la roche		Calcaire	Marbre
l'indice des vides e(%)	Cubique	13.52%	7.69%
	Cylindrique	6.15%	1.23%

### IV.2.4.2.Porosité(n)

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 [38]:

- 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 :  $n > 20$  %

**Tableau IV.12.** Résultats de la détermination de la Porosité.

Roche		Calcaire	Marbre
l'indice des vides e(%)	Cubique	11.9 %	7.14 %
	Cylindrique	5.793%	1.215%

➤ **Interprétation des résultats**

On constate que la roche calcaire dans le cas des échantillons cubiques est une roche de porosité élevée ; dans le cas des échantillons cylindrique est une roche de porosité moyenne, par contre le marbre des échantillons cubiques de porosité moyenne le marbre cylindriques est de faible porosité.

#### **IV.2.5. Essai au bleu de méthylène [NF P94- 068]**

##### **IV. 2.5.1. Définition**

L'essai au bleu constitue un des essais d'identification et de la classification des sols, Il a pour objectif la détermination de la quantité de particules argileuses présentes dans un échantillon de matériau

##### **IV.2.5.2. Principe de l'essai**

Consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50mm. La valeur du bleu du sol est directement liée à la surface des particules constituant le matériau. Ce dernier adsorbera d'autant plus de bleu de méthylène que la quantité d'argile qu'il contient est importante. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différente quantité de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Une goutte de suspension est déposée sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tâche. L'adsorption maximale est attendue lorsqu'une auréole bleu claire persistante apparaît à la périphérie de la tâche.

##### **IV.2.5.3. Préparation de la solution**

On prépare la solution du bleu de méthylène à 10g/l. Utiliser de l'eau distillée ou déminéralisée et du bleu de méthylène, de qualité pharmaceutique référence CODEX, degré de pureté  $\geq 98,5\%$ , présenté sous forme de poudre.

- Verser 500 à 700g d'eau distillée ou déminéralisée dans le récipient à la température  $\leq 50^{\circ}\text{c}$ .
- prendre 10g de la poudre sèche.
- Agiter la contenu en ajoutant lentement la poudre de bleu dans l'eau jusqu'à dissolution complète de la poudre.

- Compléter la masse de la solution d'eau distillée ou déminéralisée jusqu'à  $1000 \pm 5$  g puis agiter pendant 5min.
- Conserver la solution ainsi préparé dans une bouteille en verre teinté et placer à l'abri de la lumière. Cette solution est utilisable après un mois de sa préparation.



**Figure IV.3.** Masse humide des prises d'essai. **Figure IV.4.** Essai au bleu de méthylène

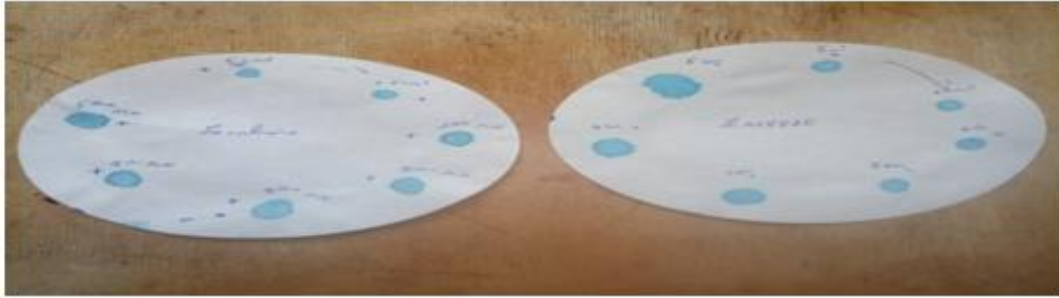


**Figure IV.5.** Gestion du dosage du bleu de Méthylène

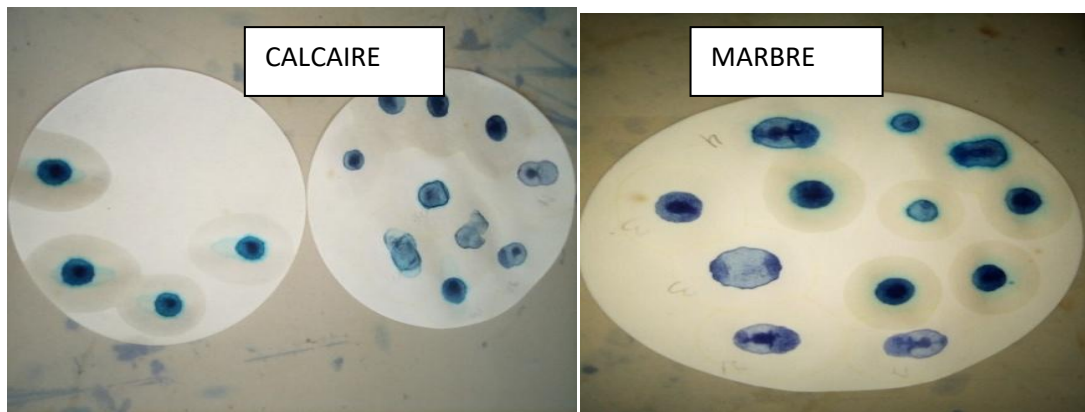
**Tableau IV .13.** Classe des sols en fonction du VBS. [27]

Valeur de VBS	Commentaire
$VBS < 0,1$	Sol sableux insensible à l'eau
$0,1 < VBS < 0,2$	Sol sableux sensible à l'eau
$0,2 < VBS < 1,5$	Sol sablo-argileux
$1,5 < VBS < 2,5$	Sol sablo-limoneux
$2,5 < VBS < 6$	Sol limoneux
$6 < VBS < 8$	Sol argileux
$VBS > 8$	Sol très argileux

## IV.2.5.4. Expression des résultats



A- Essai cubiques



B- essai cylindrique

**Figure IV.6.** Essai du bleu de méthylène sur le papier filtre.

## ➤ Expression des résultats

**Tableau IV.14.** Résultats d'essai au bleu de méthylène

Matériaux /Paramètre	Essai	Teneur en eau du matériau W%	Masse humide de la prise d'essai $M_{h1}$	Masse sèche de la prise d'essai $M_0 = \frac{M_{h1}}{1+W}$	Volume de la solution de bleu nécessaire pour atteindre l'adsorption totale (v)(cm <sup>3</sup> )	Masse de bleu introduite $B = V * 0.01$	Valeur au bleu $VBS = \frac{B}{M_0} * 100$	Observation
Calcaire	Essai 1(cubique)	0.63	60	36.80	5	0.05	0.13	Sol sableux sensible à l'eau
	Essai 2(cylindrique)	3.10	100	24.39	20	0.20	0.82	Sol sablo-argileux

Marbre	Essai 1(cubique)	0.84	60	32.60	5	0.05	0.15	Sol sableux sensible à l'eau
	Essai 2(cylindrique)	1.20	100	45.45	59	0.59	1.29	Sol sablo-argileux

### 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]

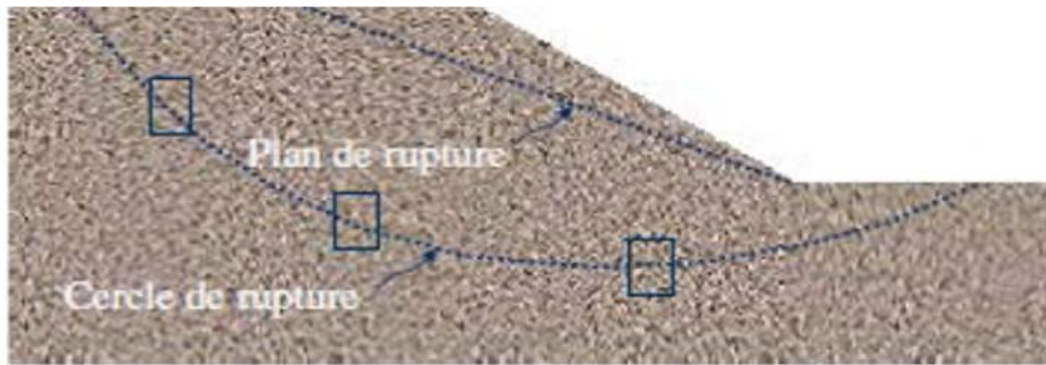


Figure IV.7. Rupture d'un sol [4].

#### IV. 3.2.Critère de Mohr Coulomb

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont E et  $\nu$  (paramètres d'élasticité). Les trois autres sont (c,  $\sigma$  et  $\phi$ ) 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 :

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

$\tau$ : contrainte de cisaillement

c : cohésion

$\sigma$  : contrainte normale

$\phi$  :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  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$ ; 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  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  et à la contrainte tangentielle  $\tau$  exercée sur le plan de rupture. Par convention, on prend des valeurs négatives de  $\sigma_3$  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  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  et  $\tau$  [10].

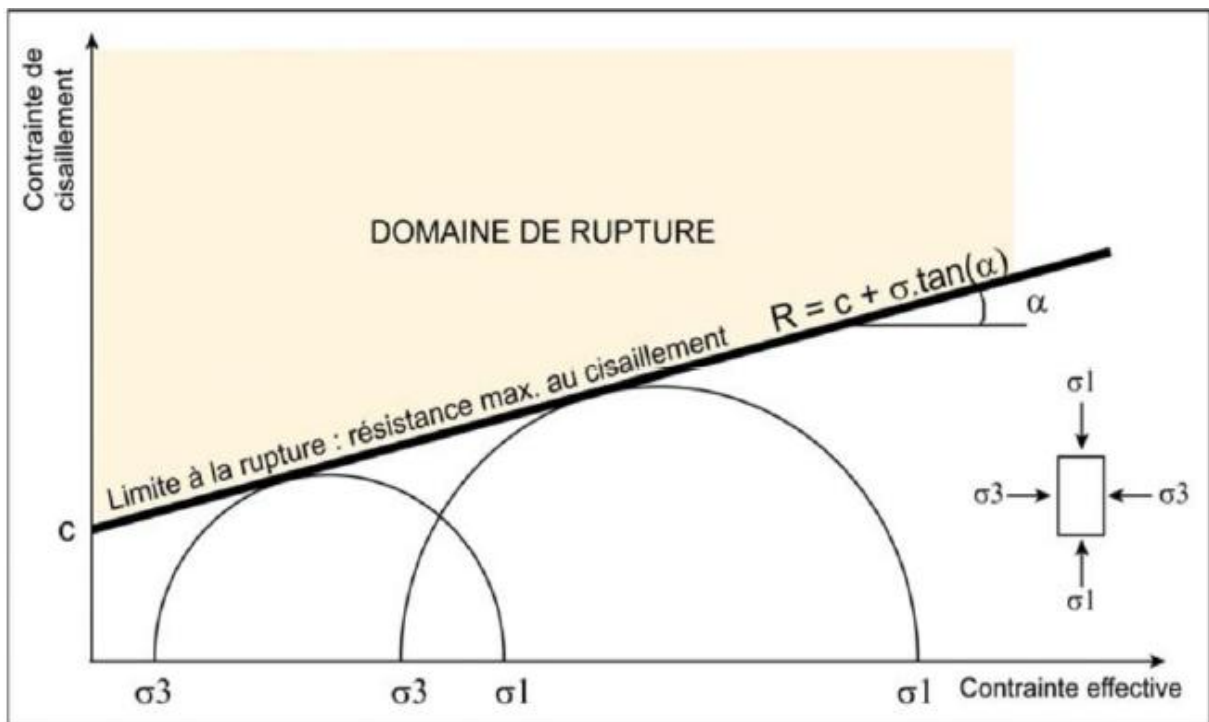
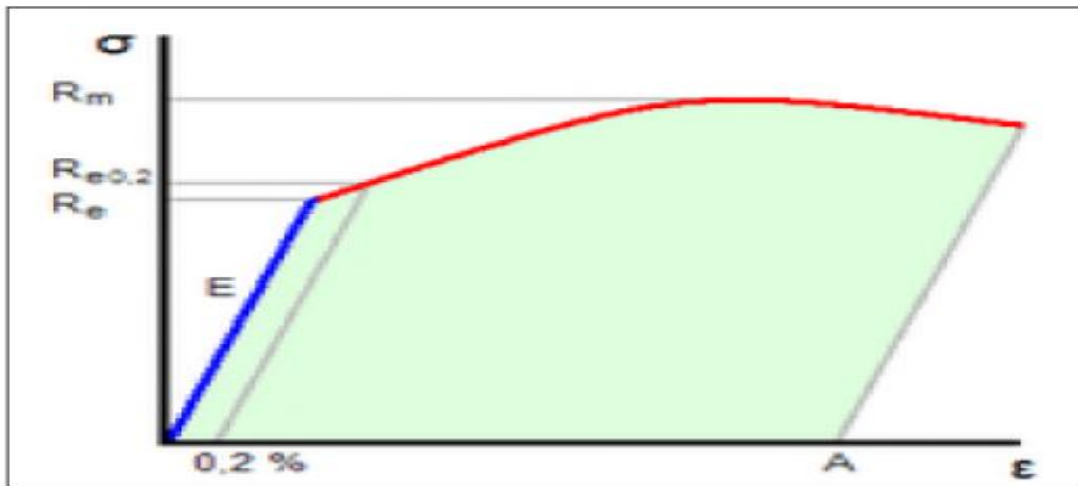


Figure IV.8. Représentation de la droite de Mohr-Coulomb [10].

➤ **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.9.** Diagramme contrainte-déformation. [10]

- $\sigma$  est la contrainte (en unité de pression).
- $E$  est le module de Young(en unité de pression).
- $\epsilon$  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  $\tau$  appliquée sur une facette augmente moins vite avec la contrainte normale  $\sigma_N$  qu'avec le critère habituel de Mohr-Coulomb [10].

$$\tau = A \cdot R_c \left( \frac{\sigma_N}{R_c} - T \right)^B$$

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 uniaxiale de la roche.
- $\tau$  : la résistance au cisaillement.
- $\sigma_N$  : la contrainte normale.

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

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

- m : est un paramètre de forme,
- s : le coefficient de fracturation

**Tableau IV.15.** Valeurs de la constante du matériau  $m$  de quelques types de roches. [39]

Valeur de m	Types de roches	Exemple de roches
$\approx 7$	Roches carbonatées avec clivage cristallin bien développé	Dolomite, Calcaire, Marbre
$\approx 10$	Roches sédimentaires à grain fin et à faible degré métamorphique	Silts, Schiste, Ardoise
$\approx 15$	Roches sédimentaires à grain grossier et clivage cristallin faiblement développé	Grès, Quartzite
$\approx 17$	Roches cristallines ignées à grain fin	Andésite, Dolérite, Diabase, Rhyolite, Basalte.
$\approx 25$	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 uniaxiale [NF P94-420]

Dans cet essai, l'échantillon analysé est pris sous deux formes : éprouvette cubique, et éprouvette cylindrique, 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.10. Dispositif expérimental

Elle est donnée par la formule suivante:

$$R_c = \frac{F}{S} \text{ (MPa)}$$

F : effort (charge) maximale atteinte (juste avant la rupture) ;

S : section ou surface sur laquelle on applique l'effort



A- Eprouvette de Marbre (cubique) pendant l'essai



B-Eprouvette de Calcaire (cubique) pendant l'essai



A- Eprouvette de Calcaire (cylindrique)

B-Eprouvette de Marbre (cylindrique)

Avant et après l'essai

avant et après l'essai

Figure IV.11. Essai de compression simple sur les roches étudiées (laboratoire Béton UMMTO)

➤ Expression des résultats

Tableau IV.16.La résistance à la compression

Roche	L'échantillon	Dimensions			Charge F (KN)	la résistance à la compression RC(MPa)	RC Moyenne
		a	B	H			
calcaire	1	10	10	10	571.3	57.13	33.46
	2	10	10	10	234.8	23.48	
	3	10	10	10	197.9	19.79	
marbre	1	10	10	10	235.1	23.51	32.12
	2	10	10	10	427.0	42.70	
	3	10	10	10	301.7	30.17	

A-compression (cubique)

La roche	L'échantillon	Dimensions (cm)		Charge F (KN)	la résistance à la compression RC(MPa)	RC Moyenne
		D	H			
Le calcaire	1	9.2	17.9	73.92	11.02	21.25
	2	9.2	18.2	222.7	33.5	
	3	9.2	17.4	129.2	19.24	
Le marbre	1	9.2	17.6	143.12	21.33	24.97
	2	9.2	18.2	190.3	28.62	

### B- compression (cylindrique)

**Tableau IV.17.** Classification des roches en fonction de la résistance à la compression [38]

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

#### ➤ Synthèse et conclusion

D'après les résultats obtenus dans les tableaux ci-dessus, on constate que les différentes roches étudiées (cubiques et cylindriques) sont classées comme étant une roche moyennement résistante

#### IV.3.5. Essai de traction

La résistance à la traction est la résistance qu'oppose une roche à la rupture lorsqu'elle est soumise à une sollicitation de tension. L'essai brésilien permet de mesurer de façon indirecte la résistance à la traction de la roche. Son principe est de mettre sous contrainte de tension une carotte de roche par application d'une force de compression suivant son diamètre



**Figure IV.12.** Machine de l'essai de traction par flexion (Laboratoire de Béton UMMTO)

### IV.3.5.1.les type de traction

#### A) Traction simple

L'essai le plus fréquemment utilisé de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction .cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies

On exerce une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante

L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées effectués dans différents laboratoires .pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette

#### B) Essai de traction bi axiale

L'analyse du comportement de structures sous un chargement bi-axial est une étude complexe dans laquelle interviennent beaucoup de paramètres qui viennent complexifier considérablement l'étude par rapport au chargement uni axial.

En effet, pour créer un état de contrainte bi axiale dans une éprouvette il est impossible d'utiliser une éprouvette de forme constante où les contraintes sont connues avec une bonne précision sur la totalité de l'éprouvette.

De plus il est aussi difficile de garantir que la rupture de l'éprouvette sera due à un effort bi-axial et non à une singularité géométrique qui génèrerait une concentration de contraintes local et favoriserait la rupture à cet endroit. [42]

- **Principe de l'essai de traction bi axial**

Les essais de traction bi axiale consistent à exercer une contrainte dans deux directions perpendiculaires sur une même éprouvette. Ceci impose d'utiliser des éprouvettes cruciformes. Pour réaliser des états de contrainte uniformes, il faut que les bras de la croix aient des rigidités transversales assez faibles. Les directions principales des contraintes sont fixées et on peut effectuer des chargements dans l'espace de contraintes [42]

- **Machine de traction bi axiale**



**Figure IV.13** : Machine d'essai de traction bi axiale

### C) traction par torsion

Les composants soumis à des mouvements rotatifs sont sollicités en rotation. Cette rotation est également appelée torsion.

La résistance de torsion déterminée par l'essai de torsion sert d'orientation pour connaître la sollicitation admissible du matériau. Cette méthode est utilisée pour les arbres, axes, fils métalliques et ressorts, ainsi que pour évaluer le comportement de ténacité des aciers à outils.

Lors de l'essai de torsion, une éprouvette est fermement fixée à une extrémité, et soumise à l'autre extrémité à un couple en croissance constante, le moment de torsion. Le moment de torsion provoque des contraintes de cisaillement dans la section de l'éprouvette; un état de contrainte s'installe, entraînant une déformation, puis une rupture.



**Figure IV.14.** Machine de traction par torsion

### D) Essai de traction-cisaillement Essai arcan

L'essai Arcan a été développé pour l'étude et la caractérisation du comportement et l'endommagement des matériaux composites. Elle est également utilisée pour étudier d'autres problèmes tels que l'ouverture et la propagation des fissures. Cette procédure expérimentale permet de combiner et de contrôler parfaitement des sollicitations de traction perpendiculaire et de cisaillement transverse dans une éprouvette [42].

### E) traction par flexion

L'essai de flexion démontre le rapport qui existe entre la charge appliquée sur une poutre en flexion et sa déformation élastique. Il met en évidence l'influence exercée par le module d'élasticité et le moment d'inertie géométrique, elle se traduit par une courbure.

Le cas de charge de flexion le plus étudié dans les essais des matériaux est l'essai de flexion à trois points. Il s'agit d'étudier une poutre logée sur deux appuis, et soumise au milieu à une charge unique.

### IV.3.5.2. Essai de traction par flexion [NF P 18-407]

#### a. Flexion quatre points

La flexion Quatre-points, il représente le cas d'une poutre posée sur deux appuis simples (appuis linéaires rectilignes qui, dans un problème plan) et soumise à applique deux charges concentrée appliquée au milieu de la poutre avec elle aussi un contact simple .



**Figure IV.15.** Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (4 points)

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

$$\sigma_f = \frac{F_f \cdot l}{2b \times h^2}$$

**Avec**  $\sigma_f$  : Résistance à la flexion (4 pts) en [MPa].

$F_f$  : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion [KN].

$l$  : Longueur qui sépare les deux appuis.

$b$  : Côte de l'éprouvette.

#### b. Flexion 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



**Figure IV.16.**Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion (3 points)

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

$$R_f = \frac{1,5 F_f \cdot l}{b \times h^2}$$

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

$$R_f = \frac{1,5 F_f \cdot l}{b^3}$$

**Avec :**

$R_f$  : Résistance à la flexion (3 pts) en [MPa].

$F_f$  : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion [KN].

$L$  : Longueur qui sépare les deux appuis (200mm)

$b$  : Côte de l'éprouvette (70mm)



- Eprouvette de Marbre (cubique)



- Eprouvette de Marbre PK15+450(cylindrique)

**Figure IV.17.** Essai de traction par flexion à trois points

➤ **Expression des résultats**

Les résultats obtenus sont représenté dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.18.** La résistance à la traction par flexion trois points (Echantillon cubique)

Roche		Dimension [mm]			Charge Ff [KN]	Resistance à la flexion Rf [MPa]	Resistance Moyenne à la flexion Rf [MPa]
		B	H	L			
Calcaire	1	70	70	200	0.89	0.77	0.845
	2	70	70	200	1.06	0.92	
Marbre	1	70	70	200	19.37	16.9	16.03
	2	70	70	200	19.45	17.0	
	3	70	70	200	16.24	14.2	

**Tableau IV.19.** La résistance à la traction par flexion à trois points (Echantillon cylindrique)

Roche		Dimension [mm]			Charge Ff [KN]	Resistance à la flexion Rf [MPa]	Resistance moyenne à la flexion Rf [MPa]
		B	h	L			
Calcaire	1	70	70	200	1.46	1.27	1.29
	2	70	70	200	1.74	1.52	
	3	70	70	200	1.26	1.10	
Marbre	1	40	45	110	7,69	15,66	16.9
	2	35	40	110	7,64	22,51	
	3	70	70	200	14.33	12.53	

Le tableau donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la traction :

**Tableau IV.20.** Classification des roches en fonction de la résistance à la traction. [38]

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

**Tableau IV.21.** Classification des massifs rocheux du tronçon PK12-PK16 en fonction de la résistance à la traction.

	Roche	Rt(MPa)	Qualité de la roche
Cubique	Calcaire	0.845	Faiblement Résistantes
	Marbre	16.03	Résistante
Cylindrique	Calcaire	1.395	Moyenne
	Marbre	16.9	Résistante

## IV. 6.Les analyses chimiques

### IV.6.1. la Calcimètre de Bernard

Afin de mettre en évidence la variation des cortèges argileux en fonction de la teneur des différents échantillons en carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), nous avons fait appel à cette technique basée sur le principe donné par Vatan (1967), selon lequel, tout matériau contenant du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) fait effervescence au contact d'un acide (ex :  $\text{HCl}$ ), celle-ci correspond au dégagement de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) sous forme de gaz, selon la réaction chimique suivant :

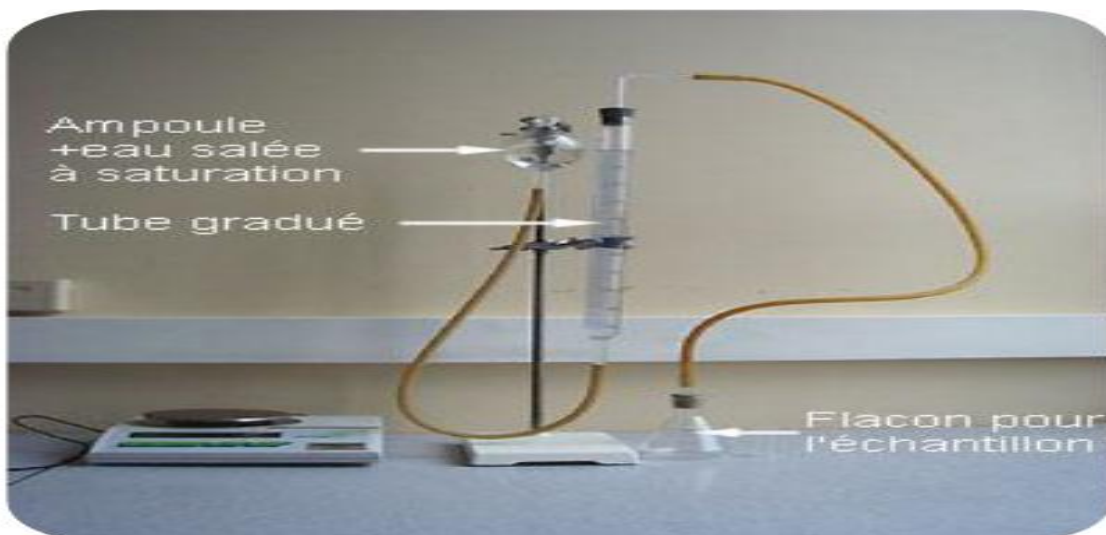


Figure. IV.18 .Calcimètre de Bernard

#### IV.6.1. 2.Protocole expérimental

##### Etape 1 : montre le calcimètre

Un calcimètre permis et de mesure le volume de  $\text{CO}_2$  dégagé par action chlorhydrique ( $\text{HCl}$ ) sur le carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  d'un échantillon de sol ou de roche

On peut fabriquer un calcimètre avec

- une ampoule
- un tube gradué de  $100 \text{ cm}^3$
- Un erlenmeyer de  $100 \text{ cm}^3$
- un petit tube en verre environ deux fois moins haut que l'erlenmeyer
- deux bouche à l trou adaptés au tube gradue et l'erlenmeyer
- 1.5m de feuille anglaise

**Etape 2 : préparation la mesure**

-On va tarer la balance et puis peser l'échantillon (si la masse de  $\text{CaCO}_3$  est supérieure à 0.4g le volume de  $\text{CO}_2$  dégagé sera trop important pour le mesuré

-on va placer l'échantillon dans l'erenmeyer après on va coller une boulette de pâte à modeler sous le petit tube, à l'aide d'une pipette, verser dans le tube de HCL assez concentré

-à l'aide d'une grosse pince, on va mettre en place le tube dans l'erenmeyer après on va modifier la hauteur de l'ampoule de manière à ce que l'eau salée soit au même niveau dans l'ampoule et le tube gradué, le contenu de l'erenmeyer sera alors à la pression atmosphérique



(a)



(b)

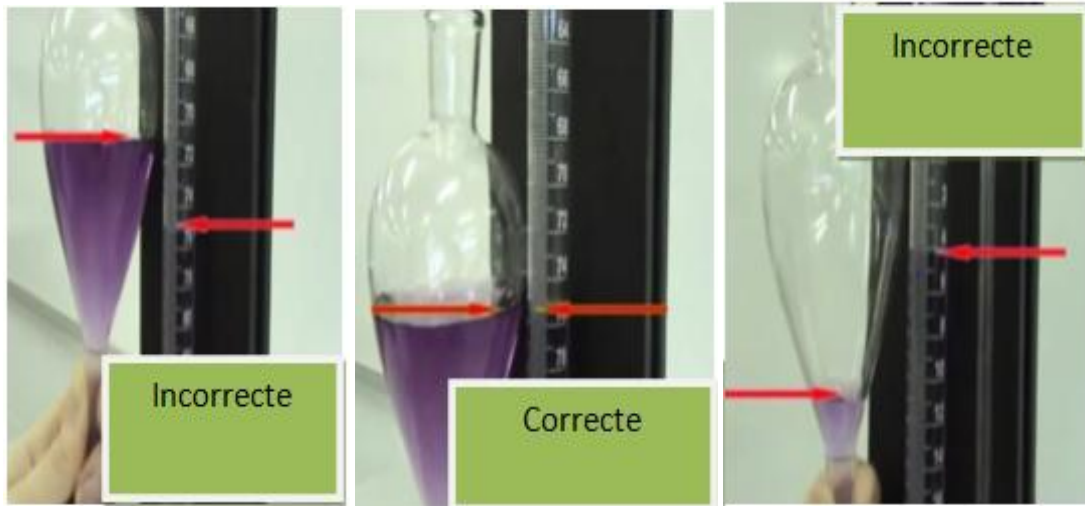
**Figure. IV.19.**préparation la mesure (a- pesé de l'échantillon, b- introduction de l'échantillon et l'HCL dans l'erenmeyer)

**Etape 3 : la mesure**

-Incliner l'erenmeyer afin de faire couler l'acide sur l'échantillon, et attendre la fin de l'effervescence

-la pression dans le tube gradué est alors supérieure à la pression atmosphérique il convient de rétablir la pression atmosphérique en descendant l'ampoule jusqu'à obtenir le même niveau dans l'ampoule et le tube

-le  $\text{CO}_2$  dégagé est maintenant à pression atmosphérique (on peut la mesurer)



**Figure. IV.20** .Mise à niveau de l'ampoule et de la burette

➤ **Expression des résultats**

$\Delta V$ = différence de volume d'eau dans le tube avant et après réaction (ml).

**Tableau. IV.22.** Différence de volume d'eau (la compression)

			Calcaire			Marbre		
			VI	V f	$\Delta V$	VI	VF	$\Delta V$
LA compression	Cubique	1	29.9	106.5	76.60	27	103.4	76.42
		2	31	110.3	79.29	29.5	102.7	73.24
		3	36	116.7	80.64	28	106.6	78.62
	Cylindrique	1	28	107.3	79.29	32	109.6	77.62
		2	28	106.2	78.17	18	97.74	79.74
		3	27.8	105.3	77.50	/	/	/

**Tableau IV.23.** Différence de volume d'eau (la traction)

			Calcaire			marbre		
			VI	VF	$\Delta V$	VI	VF	$\Delta V$
La traction	Cubique	1	32	110.2	78.18	25	104.8	79.75
		2	32	110.2	78.18	28	108.6	80.42
		/	/	/	/	26	104.9	78.85
	cylindrique	1	30	107	77.05	24	105.8	81.77
		2	30	107	77.05	24	105.8	81.08
		3	27.6	105.6	77.95	25	105.5	80.42

**Étape 4 : le calcul de la teneur en  $\text{CaCO}_3$** 

-Si l'acide HCL est en excès son action sur une mole de  $\text{CaCO}_3$  (100g/mol) libère une mole de  $\text{CO}_2$  (22400ml)

-la connaissant le volume de  $\text{CO}_2$  dégagé ( $\Delta v$ ) on va produit en croix pour calculer la masse de  $\text{CaCO}_3$  attaquée

-pour calculer le pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  dans l'échantillon on va faire une croix entre la masse de  $\text{CaCO}_3$  et la masse de l'échantillon

➤ Exemple : la traction cubique

La masse de l'échantillon =0.4g

$\Delta v=78.18$

La masse de  $\text{CaCO}_3$  don 100g=22400 de volume de  $\text{CO}_2$

➤ La masse de  $\text{CaCO}_3$  par apure ou volume de  $\text{CO}_2$

100g  $\rightleftharpoons$  22400 ml  
 x g  $\rightleftharpoons$  78.18ml

$x = (78.18 \cdot 100) / 22400$  ,  $x = 0.342\text{g}$

➤ La masse de  $\text{CaCO}_3$  par apure a la masse de la roche

0.342g  $\rightleftharpoons$  0.4 g  
 x g  $\rightleftharpoons$  100g

$x = (0.342 \cdot 100) / 0.4$  ,  $x = 85.5\text{ g}$

**Tableau IV.24.** La teneur en  $\text{CaCO}_3$  (compression)

		Le calcaire		Le marbre		
		CaCO <sub>3</sub> /co <sub>2</sub> (g)	CaCO <sub>3</sub> /masse de la roche (g)	CaCO <sub>3</sub> /co <sub>2</sub> (g)	CaCO <sub>3</sub> /masse de la roche (g)	
La compression	Cubique	1	0.342	85.50	0.341	85.30
		2	0.354	88.50	0.327	81.75
		3	0.36	90.00	0.351	87.75
	Cylindrique	1	0.354	88.50	0.34	86.64
		2	0.349	87.25	0.356	89.00
		3	0.346	86.50	/	/

Tableau IV.25. La teneur en  $\text{CaCO}_3$  (traction)

		Le calcaire		Le marbre		
		Caco3/co2	Caco3/masse de la roche (g)	Caco3/co2	Caco3/masse de la roche (g)	
La traction	Cubique	1	0.349	87.25	0.356	89.00
		2	0349	87.25	0.359	89.75
			/	/	0.352	88.00
	Cylindrique	1	0.344	86.00	0.365	91.27
		2	0344	86.00	0.0362	90.50
		3	0.348	87.00	0.359	89.75

➤ **Interprétation :**

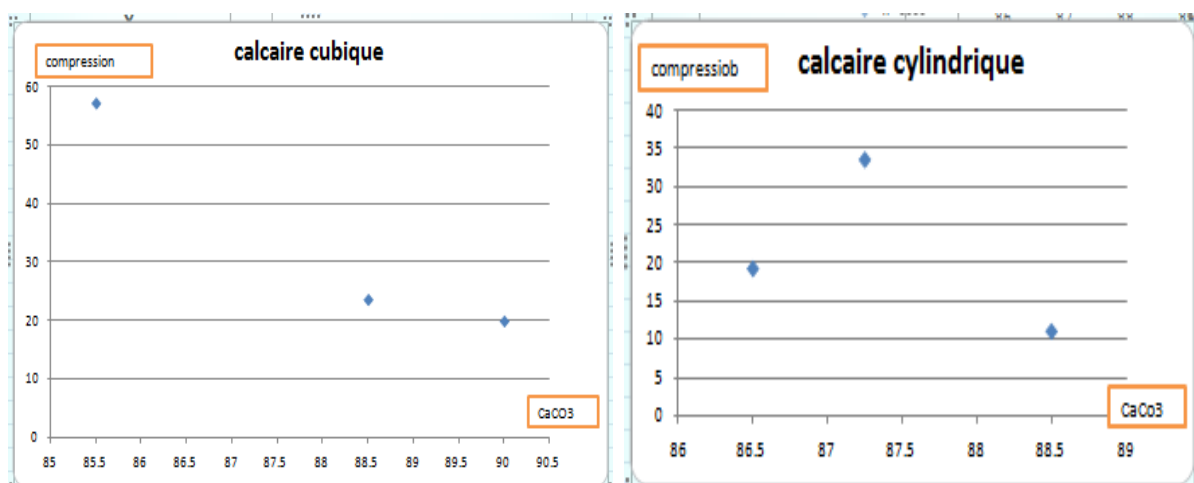
Les analyses chimiques des différents échantillons des calcaires montrent que ces derniers sont très carbonatés, il s'agit d'un calcaire marneux. Les échantillons de marbres sont aussi très carbonatés le taux de  $\text{CaCO}_3$  avoisine 90 %.

#### IV.6.1. 3.Essai de corrélation entre le taux de carbonates en fonction de la résistance mécanique des roches

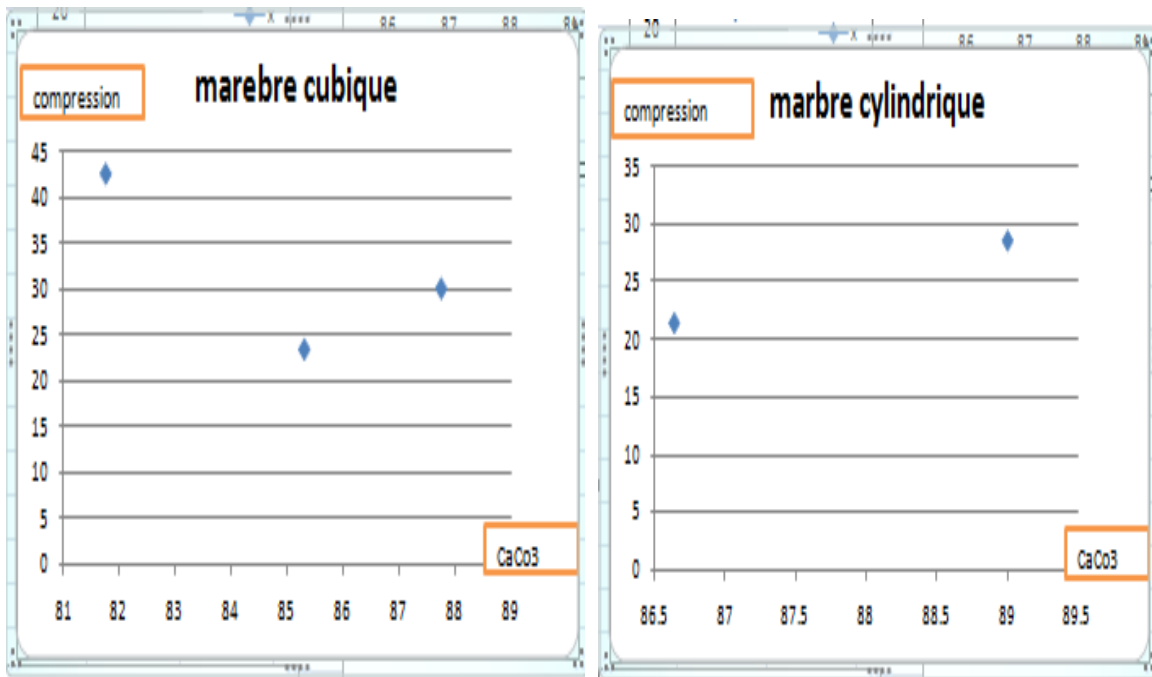
Dans le domaine des roches, il existe toujours une relation entre la qualité des roches, leur dureté et leur tolérance aux pressions extérieures, et à partir de là, nous allons essayer d'extraire une relation entre le taux de  $\text{CaCO}_3$  et la résistance de la roche à la traction et à la compressions. Pour ce, différentes courbes de la variation de la résistance mécaniques à la compression et à la traction des roches étudiées ont été élaborées afin de connaître cette possibilité d'influence.

➤ **compression –taux de  $\text{CaCO}_3$**

##### 1-Le calcaire

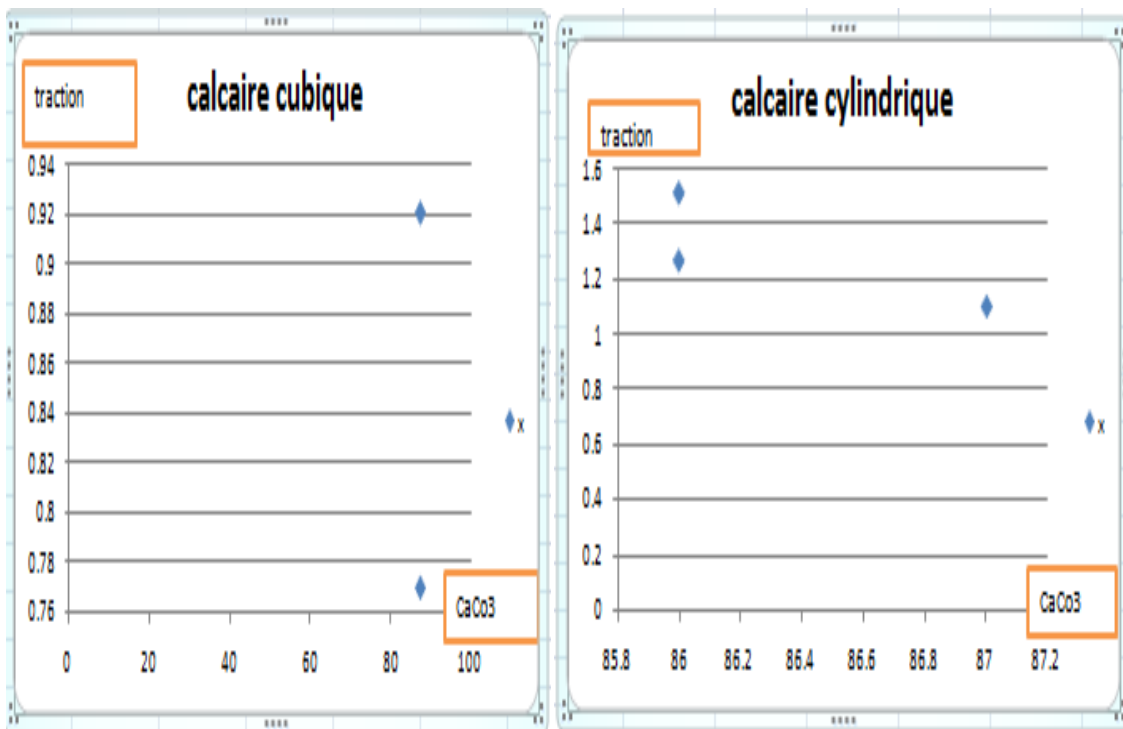


2-Le marbre

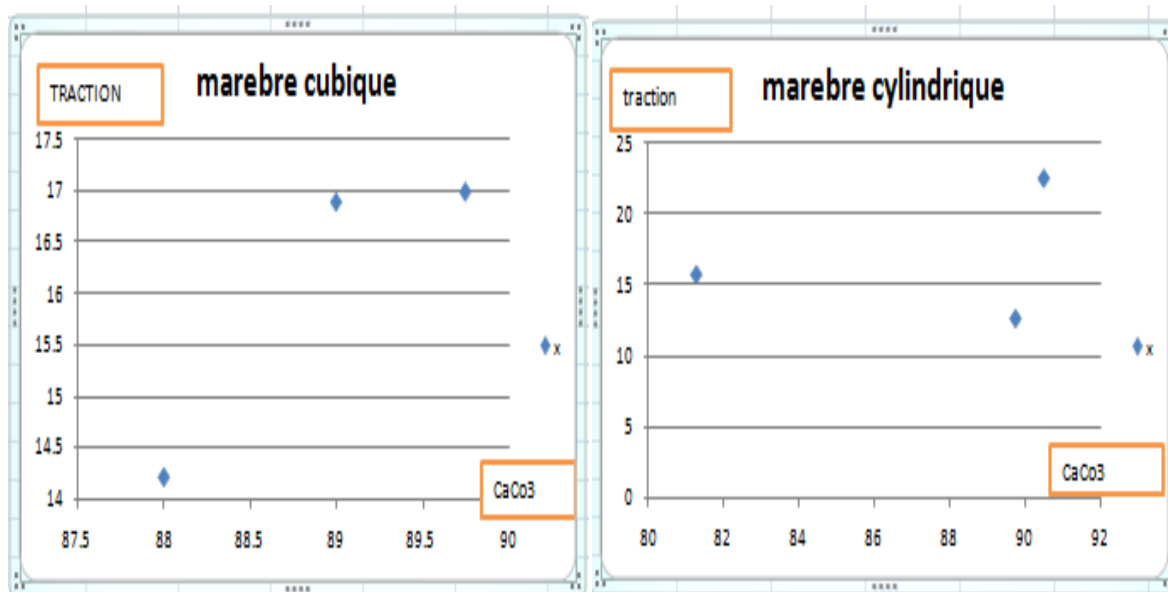


➤ la traction –taux de CaCO3

1-Le calcaire



## 2-Le marbre



### ➤ Expression des résultats

Nous remarquons que globalement l'augmentation de la résistance mécanique que ce soit à la compression simple ou à la traction des différentes roches calcaires et marbre analysées, est relativement proportionnelle à l'augmentation du taux des carbonates de calcium  $\text{CaCO}_3$  présent dans ces dernières à l'exception du cas des échantillons de calcaire (cubique) où la résistance est inversement proportionnelle au taux des  $\text{CaCO}_3$ .

### IV.7. Conclusion

D'après les différents essais réalisés au laboratoire on constate que le marbre est classé comme étant une roche résistante à moyennement résistante pour les deux types d'éprouvettes utilisées, par contre les roches calcaires sont classées comme étant une roche moyennement résistante. Ces résistances mécaniques semblent s'être relativement proportionnelles au taux de carbonates présent dans ces dernières.

# Chapitre V

**Caractérisation et classification  
géomécanique des massifs rocheux  
d'Ait Yahia Moussa (pk12-16)**

## **Chapitre V**

### **Caractérisation et Classification Géomécanique Des Massifs Rocheux d'Ait Yahia Moussa (PK12-16)**

#### **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;
- Des sacs à échantillons

#### **V.3. Description des discontinuités et des affleurements**

Les propriétés des ensembles de diaclases et autres discontinuités observés au niveau de l'affleurement doivent être décrites suivant les procédures suivantes. Pour chaque affleurement, un rapport de cartographie et de sondage distinct doit être rempli. Cette rubrique reprend l'ensemble des propriétés et paramètres importants à intégrer au rapport.

### V.3.1. 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 estimer la résistance de la roche. Le rapport doit reprendre le/les :

- **Type de roche**

On note les principaux types de roches observées dans l’affleurement ; en Utilisant les options données.

- **Caractéristiques de la stratification rocheuse**

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, phyllite, 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	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.3.2.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



a) la direction de pendage



b) le pendage

**Figure V.1.** Conseil pour l'orientation des ensembles de discontinuités

### V.3.3. La projection stéréographique

La projection stéréographique est la projection d'une sphère sur le plan d'un de ses grands cercles à partir d'un pôle pris sur celui-ci, une moitié de la sphère se trouvant projetée à l'extérieur, l'autre à l'intérieur du grand cercle. La projection stéréographique est utilisée par les cartographes.

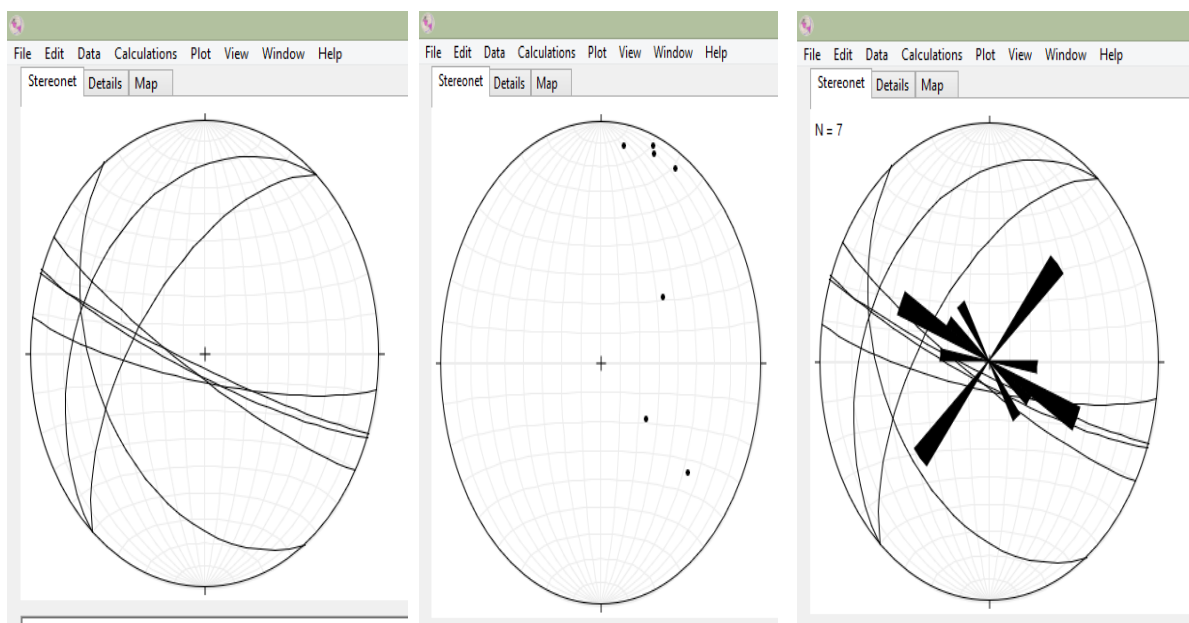
On peut également faire une projection stéréographique sur n'importe quel plan parallèle au plan équatorial pourvu qu'il ne contienne pas le pôle dont on a privé la sphère.

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 Stereront 10 on a pu représenter les discontinuités et par la suite faire une projection stéréographique qui nous permet de définir le vecteur moyen de fracturation afin qu'on puisse déterminer le SMR (Slope Mass Rating).



a) projection des plans

b) la projection des poles

c) rosace directionnelle des discontinuités

**Figure V.2.** Projection stéréographique des discontinuités

### V.3.4. La présentation des données et des mesures

#### V.3.4 .1. Le premier affleurement : le calcaire

❖ : le calcaire (cubique)

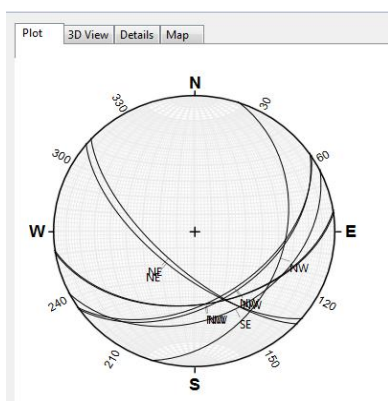


Figure V.3. La photo du premier affleurement (calcaire cubique)

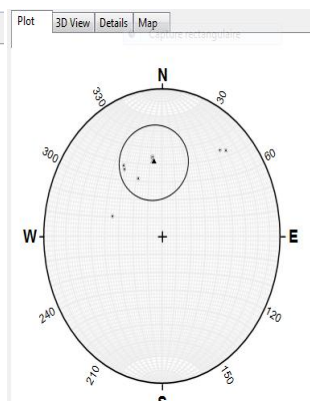
Nous avons pris ces mesures et ces remarques sur le premier massif rocheux de calcaire

Type de roche	Caractéristiques de la stratification rocheuse	La résistance de la roche (R0-R6)	Le degré d'altération de la roche
Calcaire	Stratification <b>régulière</b>	R3	III

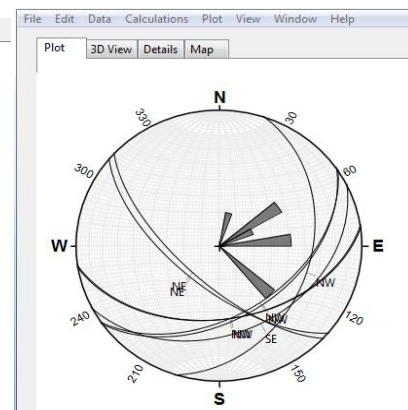
D1	D2	D3
81/45 NW 82/45 NW 133/68 NE	55/46 NW 18/36 NW 130/65 NE	63/36 SE 56/48 NW



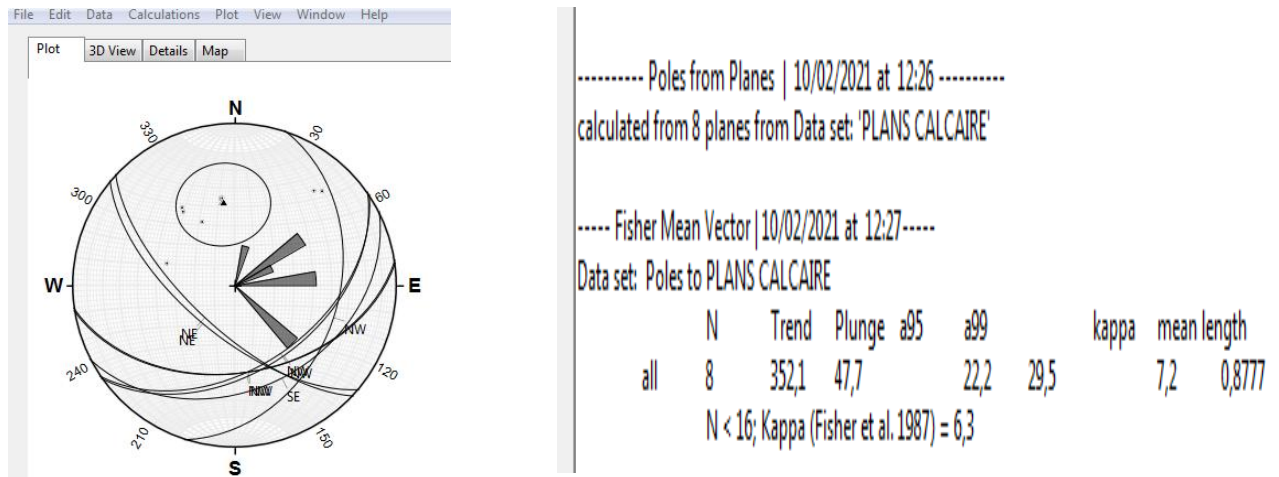
a) La projection des plans discontinués



b) la projection des poles



c) rosace directionnelle des



d) le vecteur moyen de discontinuité

**Figure .V.4.** Projection stéréographique des discontinuités du massif de Calcaire (cubique)

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

- La valeur du **vecteur moyen** (des discontinuités) est de direction 352.1°
- Sa plongée est de 47.7°

❖ **Calcaire (cylindrique)**



**Figure V.5.** La photo du premier affleurement (calcaire, cylindrique)

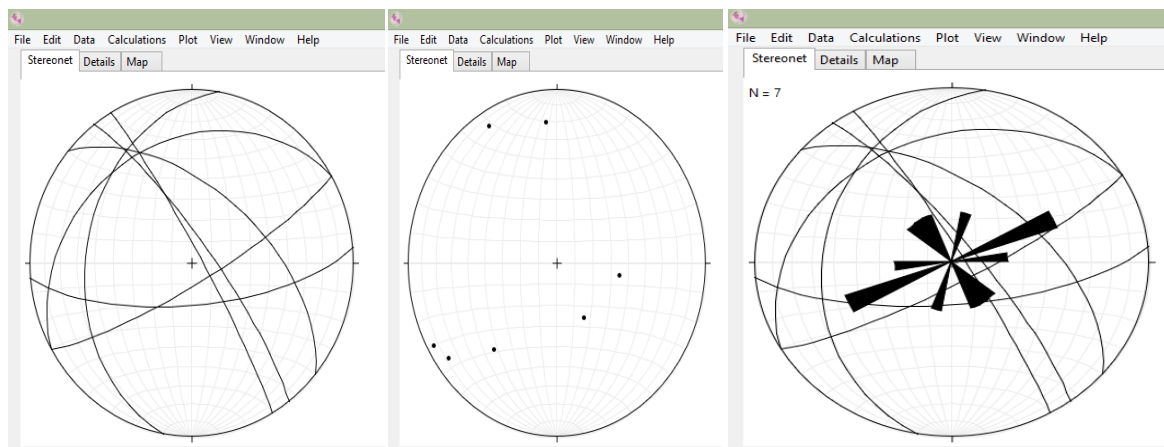
Nous avons pris ces mesures et ces remarques sur le premier massif rocheux de Calcaire cylindrique

Type de roche	Caractéristiques de la stratification rocheuse	La résistance de la roche (R0-R6)	Le degré d'altération de la roche
Calcaire	Stratification régulière	R3ouR4	III

	Type	Dip Dir [°]	Dip [°]	Espacement [m]	Persistance [m]	Rugosité	JRC	Ouverture [mm]	Remplissage
D1	F			0,50	Persistance moyenne 3-10	Rugueuse	8-10	1	Calcite et argile
D2	F			0,80	Persistance moyenne 3-10	Rugueuse	8-10	3	Calcite et argile
D3	F			1	Persistance moyenne 3-10	Rugueuse	8-10	2	Calcite et argile

D1	D2	D3
240/30 NE 10/35NE	130/55NW 150/85NW 143/80NW	85/70SW 60/80SW

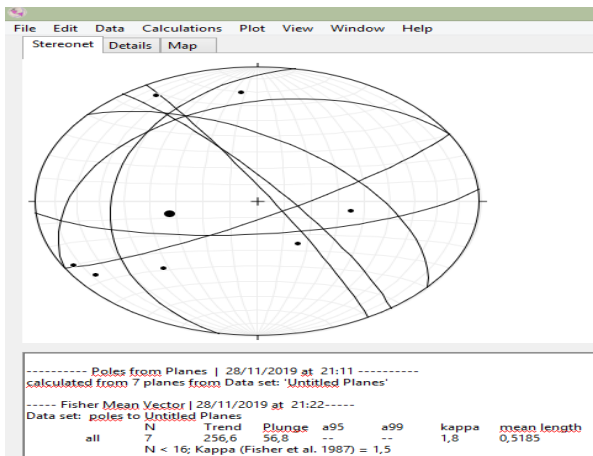
➤ La projection stéréographique



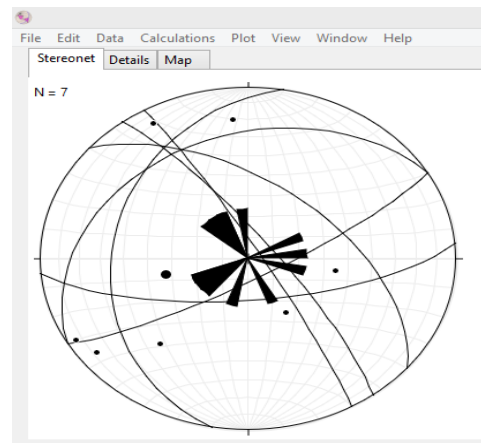
a) La projection des plans

b) la projection des poles

c) rosace directionnelles des discontinuités



d) le vecteur moyen de discontinuité



e) Projection d'ensemble.

**Figure V.6.** Projection stéréographique des discontinuités du massif de Calcaire (cylindrique)

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

- La valeur du **vecteur moyen** (des discontinuités) est de direction 256.8°
- Sa plongée est de 56.8°

### V.3.4 .2.Le deuxième affleurement : le marbre

#### ❖ Le marbre cubique



**Figure V.7.** Photos du deuxième affleurement (marbre cubique)

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

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	R4	III

➤ La projection stéréographique

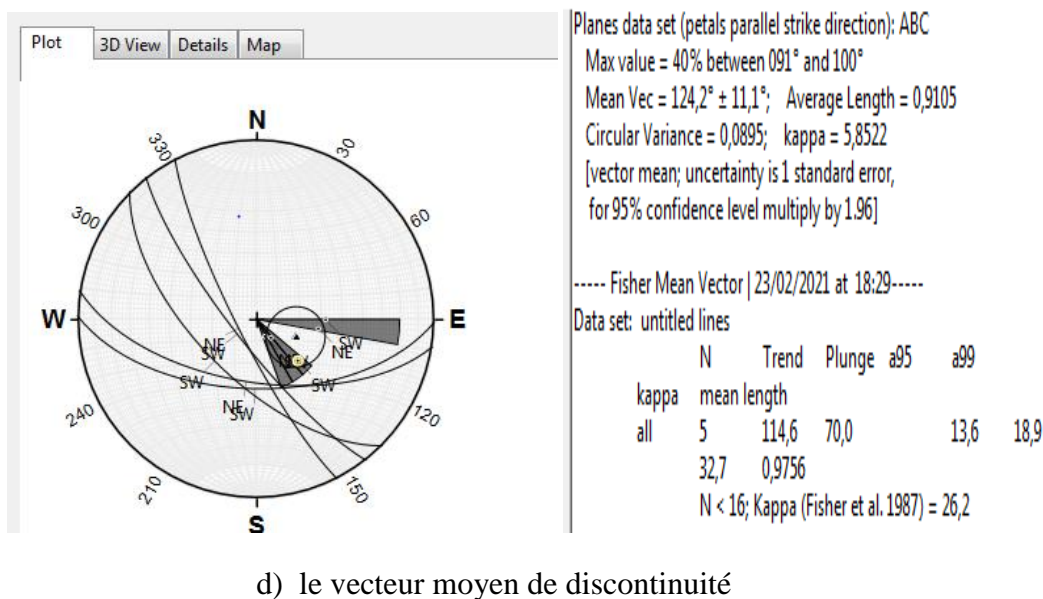
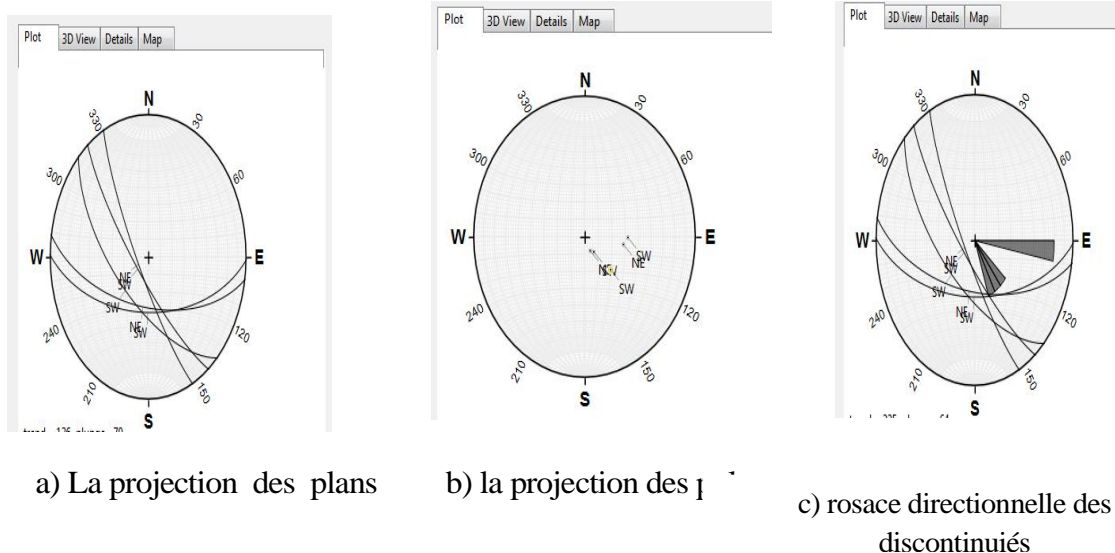


Figure V. 8. Projection stéréographique des discontinués du massif de Marbre (cubique)

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

- La valeur du **vecteur moyen** (des discontinués) est de direction 114.6°
- Sa plongée est de 70°

❖ Le marbre (cylindrique)



**Figure V.9.** Photos du deuxième affleurement (marbre cylindrique)

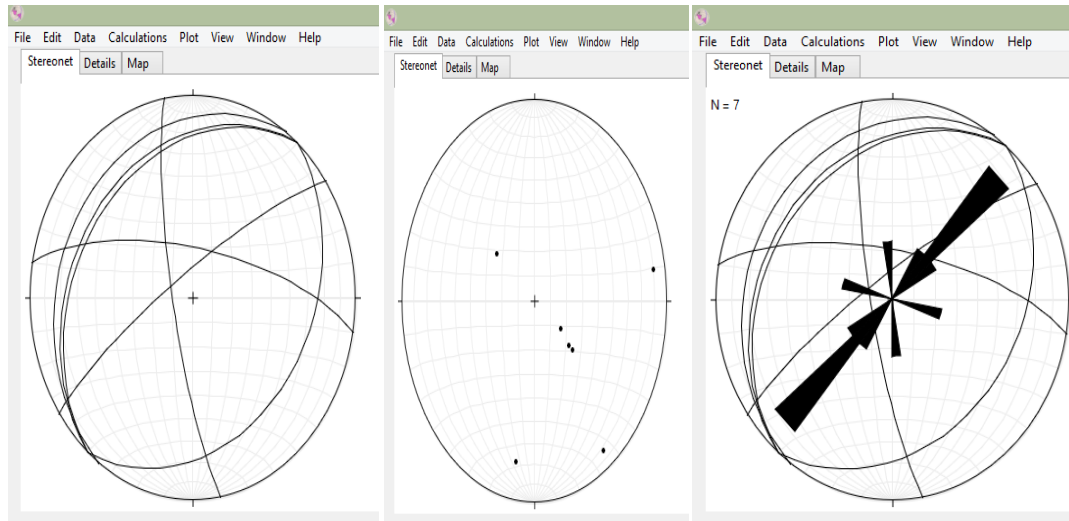
Nous avons pris ces mesures et ces remarques sur le premier massif rocheux de Marbre cylindrique

Type de roche	Caractéristiques de la stratification rocheuse	La résistance de la roche (R0-R6)	Le degré d'altération de la roche
Marbre	Stratification <b>régulière et ondulation</b>	R3ouR4	III

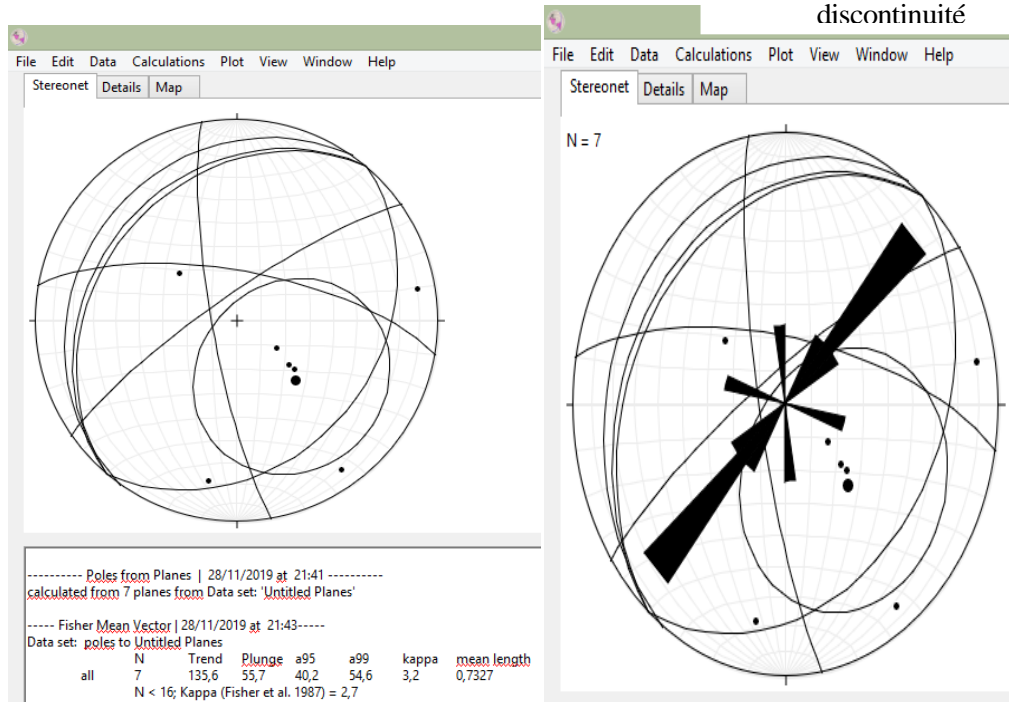
	Type	Dip Dir [°]	Dip [°]	Espacement [m]	Persistance [m]	Rugosité	JRC	Ouverture [mm]	Remplissage
D1	F			3,60	Persistance très élevée > 20	Rugueuse	4-6	2,5	Calcite
D2	J			3,00	Persistance très élevée > 20	Rugueuse	4-6	1	Calcite
D3	J			0,23	Persistance très élevée > 20	Rugueuse	4-6	1,5	Calcite
D4	J			0,50	Persistance très élevée > 20	Rugueuse	4-6	1	Calcite

D1	D2	D3	D4
170/80SE	40/30SE	40/31NE 35/20NE 40/28NE	55/80NE 100/70NE

### La projection stéréographique



a) La projection des plans      b) la projection des pôles      c) rosace directionnelle des discontinuités



d) le vecteur moyen de discontinuité      e) Projection d'ensemble

**Figure V. 10.** Projection stéréographique des discontinuités du massif de Marbre.

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

- La valeur du **vecteur moyen** (des discontinuités) est de direction  $135,6^\circ$
- Sa plongée est de  $55,7^\circ$

## V.4. Classification Géomécanique des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa (PK12- PK16 )

### V.4.1. Classification RQD

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 réalisé sur le terrain du tracé routier (PK 13 au PK 15) de la pénétrante de Tizi-Ouzou –Bouira.

❖ On va calcule le RQD de calcaire et de marbre (cubique)

$$RQD = \frac{\sum \text{longueur des morceaux} \geq 10\text{cm}}{\text{Longueur du forage}} * 100$$

#### ▪ Le calcaire :

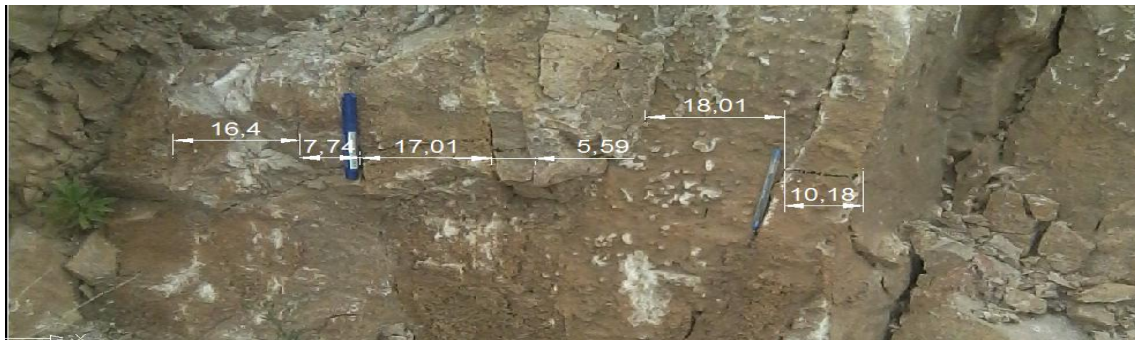


Figure V.11. Photos de la mesure RQD de calcaire

$$RQD = \frac{16,4 + 17,01 + 18,01 + 10,18}{16,4 + 7,74 + 17,01 + 5,59 + 18,01 + 10,18} * 100$$

$$RQD = 82,21\%$$

#### ▪ Le marbre



Figure V.12. Photos de la mesure RQD de marbre

$$RQD = \frac{14,68 + 16}{5,05 + 14,68 + 16 + 7,79 + 1,78} * 100$$

$$RQD = 67,7\%$$

**Tableau V.3.** RQD des différents massifs (cubique)

<b>Roches</b>	<b>RQD%</b>	<b>Qualité de la roche</b>
Calcaire	82.21	Bonne
Marbre	67.7	Moyenne

❖ **Le RQD de calcaire et de marbre (cylindrique)**

Nous avons calculé les valeurs du RQD des sondages réalisés sur le site d'étude sur les caisses à carottes au niveau du laboratoire LCTP de Tizi Ouzou. Les valeurs obtenues pour les différentes couches de massifs sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau V.4.** RQD des différents massifs (cylindrique)

<b>Roches</b>	<b>Sondage</b>	<b>Profondeur (m)</b>	<b>RQD (%)</b>	<b>Qualité de la roche</b>
<b>Calcaire</b>	V05	5.5 → 9.5	53,5	Moyenne
<b>Marbre</b>	V05	9.5 → 13.80	20,69	Très Pauvre

➤ **Synthèse et conclusion**

D'après l'analyse du paramètre RQD on a trouvé que le marbre cubique et le calcaire cylindrique sont des qualités moyennes. Par contre le calcaire cubique et le marbre cylindrique dont la qualité varie de très pauvre à moyenne.

**V.4.2. Système RMR (Rock Mass Rating)**

❖ **Le RMR de calcaire et de marbre (cubique)**

**Tableau V.5.** Classification RMR de Calcaire.

Couches	Calcaire					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacemet des joints (m)	Hydrogéologie	RMR De Base
Mesure	33.46	82.21	Surface Iustrées ou remplissage< 5mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	0,2-0,6m	Complètement sec	56
Valeurs extrêmes de la classification	25-50	75-90				
Note	4	17	10	10	15	

**Tableau V.6.** Classification RMR de marbre

Couches	Marbre					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacemet des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de base
Mesure	32.12	67.7	Surface Iustrées ou remplissage< 5mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	0.2-0.6 m	Complètement sec	52
Valeurs extrêmes de la classification	25-50	50-75				
Note	4	13	10	10	15	

❖ Le RMR de calcaire et de marbre (cylindrique)

Tableau V.7. Classification RMR Bieniawski (1989) de Calcaire.

Couches	Calcaire					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR De Base
Mesure	21,25	53,5	Surface Iustrées ou remplissage <5mm ou joint ouvert	0,2-0,6m	Complètement sec	50
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	50-75	1 à 5 mm joints continus			
Note	2	13	10	10	15	

Tableau V.8. Classification RMR Bieniawski (1989) de Marbre.

Couches	Marbre					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR De Base
Mesure	24,97	20,69	Surface Iustrées ou remplissage <5mm ou joint ouvert	0,2-0,6m	Complètement sec	50
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	<25	1 à 5 mm joints continus			
Note	2	13	10	10	15	

**Tableau V. 9.** Classification RMR des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa

	<b>Les roches</b>	<b>RMR de base</b>	<b>Classe du massif Rocheux</b>	<b>Description du massif rocheux</b>
Cubique	Calcaire	56	III	Rocher moyen
	Marbre	52	III	Rocher moyen
cylindrique	Calcaire	50	III	Rocher moyen
	Marbre	50	III	Rocher moyen

➤ **Synthèse et conclusion**

D'après les résultats du RMR de base, on déduit que les massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa ont une qualité moyen

**V.4.3. Système Q**

La formule générale du Q est calculée comme suit :

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

**Tableau V.10.** Classification Q-système des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa.

	<b>cubique</b>		<b>cylindrique</b>	
<b>Paramètres</b>	<b>Calcaire</b>	<b>Marbre</b>	<b>Calcaire</b>	<b>Marbre</b>
<b>RQD</b>	82.21	67.7	53,5	20,69
<b>J n</b>	6	9	1	1
<b>Jr</b>	1,5	1,5	1,5	1,5
<b>J a</b>	2	2	2	0,75
<b>J w</b>	1	1	1	1
<b>SRF</b>	7.5	5	5	5
<b>Q</b>	1.3	1.13	8,03	8,28
<b>Qualité du massif rocheux</b>	Pauvre	Pauvre	Moyenne	Moyenne

➤ **Synthèse et conclusion**

D'après les résultats du Q-système et le tableau II.6, on déduit que le calcaire et le marbre (cubique) ont une Pauvre qualité. En revanche, le calcaire et de marbre (cylindrique) sont de qualité moyenne.

**V.4.4. 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

Ayant calculé RMR' le GSI se détermine comme suit :

On à  $RMR'_{89} > 23$  donc  $GSI = RMR'_{89} - 5$

Tableau V.11. Classification GSI des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa.

	Les Couches	RMR de base	RMR' <sub>89</sub>	GSI	Description du massif rocheux
<b>cubique</b>	<b>Calcaire</b>	56	56	51	Rocher moyen
	<b>Marbre</b>	52	52	47	Rocher moyen
<b>Cylindrique</b>	<b>Calcaire</b>	50	50	45	Rocher moyen
	<b>Marbre</b>	50	50	45	Rocher moyen

➤ **Synthèse et conclusion**

D'après les résultats du GSI et le tableau II.6, on déduit que les roches sont des qualités moyennes

**V.4.5. 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

	Le massif	La direction		Le pendage	
		Direction du pendage du talus $\alpha s$	Direction du pendage des joints $\alpha j$	Pendage du talus $\beta s$	Pendage du joints $\beta j$
cubique	Calcaire	25°	352.1°	80°	47.7°
	Marbre	30°	114.6°	65°	70°
Cylindrique	Calcaire	240°	256.8°	85°	56.8°
	Marbre	50°	135.6°	70°	55.7°

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Les valeurs F1, F2, F3 et F4 figurent dans le tableau II.7

**Tableau V.12.** Les valeurs du SMR.

	Le massif	RMR <sub>base</sub>	F1	F2	F3	F4	SMR
Cubique	Calcaire	56	0.15	1	-25	0	52.25
	Marbre	52	0.15	1	-25	0	48.84
Cylindrique	Calcaire	50	1	1	-25	0	25
	Marbre	50	1	1	-25	0	25

**Tableau V.13.** La différente classe de stabilité par la valeur du SMR pour les massifs rocheux étudié

	Le massif	SMR	Classe	Description	Stabilité	Chute	Probabilité de chute
Cubique	Calcaire	52.2 5	III	Normale	partiellement Stable	Quelques joints ou beaucoup de dièdre	0.4
	Marbre	48.8 4	III	Normale	partiellement Stable	Quelques joints ou beaucoup de dièdre	0.4

Cylindrique	Calcaire	25	IV	Mauvaise	Instable	Plane ou grand Dièdre	0.6
	Marbre	25	IV	Mauvaise	Instable	Plane ou grand Dièdre	0.6

➤ **Synthèse et conclusion**

A partir des résultats on peut résumer les principales caractéristiques de la pente :

On a obtenu dans les deux massifs calcaire et marbre (cylindrique) les même valeurs du SMR ce qui appartient à la même classe IV on conclue que la pente est d'une qualité Mauvaise et Instable on peut prédire des glissements Planaires, ou grands dièdres avec une probabilité de chute égale à 0,6 .

Pour les deux massifs calcaire et marbre (cubique) , on a obtenu des valeurs différentes du SMR mais appartenant à la même classe III. On conclue donc que la pente est d'une qualité Normale et partiellement Stable on peut prédire des glissements de Quelques joints ou beaucoup de dièdres avec une probabilité de chute égale à 0,4.

**V.5.Conclusion**

Dans ce chapitre les calculs du : RQD, RMR, Q et GSI qui nous ont permis de caractériser, classer et définir la qualité des massifs d' Ait Yahia Moussa qui est de qualité moyenne pour des deux cas .

Le calcul du SMR confirme l'existence d'un deuxième problème que peuvent rencontrer ces massifs, notre résultat affirme que la pentes de calcaire et de marbre (cubique) sont partiellement Stable ( classe III a) et (classe III b) ce qui implique un important soutènement et de grands ouvrages à faire à savoir boulonnage systématique, béton projeté et ancrage cités dans le Tableau II.9

Les pentes des Calcaire et Marbre (cylindrique) sont instables (classe IV b) 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 cités dans le Tableau II.9

# *Conclusion Générale*

## Conclusion Générale

---

L'objectif principal de ce travail est de caractériser et classer le massif rocheux d'Ait Yahia Moussa au niveau du tronçon PK12- PK16 de la pénétrante Tizi-Ouzou.

Ce travail nous a permis d'identifier d'une manière détaillée les massifs rocheux de la zone étudiée ainsi que ses facteurs géologiques et géotechniques, sa fracturation, la matrice rocheuse, les propriétés physiques et mécaniques des roches qui les constituent. D'après les analyses chimiques effectuées sur les différentes roches des massifs calcaires et de marbre, il semble bien que le taux de  $\text{CaCO}_3$  présent peut avoir une influence sur la qualité de la roche et notamment sa résistance mécanique à la compression et à la traction.

Après la caractérisation on est passé à l'étape de classification du massif par les différents systèmes de classification afin de donner une estimation quantitative et qualitative sur la situation du massif et avoir une note concernant la qualité de ce dernier.

Les systèmes de classification géomécanique (RQD, RMR, Q, GSI) nous ont permis de caractériser, classer et définir la qualité des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa (PK12- PK16). Les résultats ont montré que les massifs de calcaire et de marbre (cylindrique) sont de qualité moyenne ; et les massifs de calcaire et de marbre (cubique) sont de qualité moyenne et Pauvre.

L'application du système SMR sur les versants a permis de définir la qualité de la pente calcaire et marbre (cylindrique) qui est instable (classe IV) et de mauvaise qualité ce qui avec probabilité d'avoir des glissements planaires. Quand à la qualité de la pente des calcaires et du marbre (cubique) l'ensemble est partiellement stable (classe III) et de qualité normale on peut prédire des glissements de Quelques joints ou beaucoup de dièdres avec une probabilité de chute.

L'hétérogénéité des formations du terrain et l'intensité de la fracturation impliquent un important soutènement et de grands ouvrages à faire à savoir : béton projeté renforcé, excavation, drainage profonds et murs de soutènement.

En perspective, cette étude qui constitue une ébauche pour la classification géomécanique des massifs rocheux de la région de Tizi Ouzou mérite d'être suivie par d'autres plus approfondies et ce pour permettre de mieux caractériser cette zone qui constitue une partie importante du grand projet de la pénétrante Tizi Ouzou- Bouira.

# ***Bibliographie***

### Références bibliographiques

- [1] AFTES., [2003], « Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et la réalisation des ouvrages souterrains»
- [2] Abdelouahed T., [1992], « Modélisation des massifs rocheux fissurés par la méthode des éléments distincts », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées en géologie de l'ingénieur
- [3] Amrani S., [2011], « Etude de stabilité des talus de la carrière de Mefteh (Blida) », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier, Ecole nationale polytechnique Alger, 112 pages
- [4] Ait Taleb Abdelkader [2017](Evaluation de la Dégradation chimique des granulats schisteux A l'essai œnométrique et a la boite 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] ANA (agence national des autoroutes) Rapport géologique et géotechnique du projet d'étude du tunnel d'ait yahai moussa .Aout-2016
- [8] AOUIDAD A et FOUCHAL M (2016-2017) (Etude de l'effet de la triaxialite de contrainte sur le comportement de PEHD en sollicitation combinée) université mouloud Mammeri tizi-ouzou
- [9] 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
- [10] Barton N. et Choubey V., [1977], « The shear strength of rock joints in theory and practice », Edition Rock Mech
- [11] Boucif R. et Tamourt M., [2015], « Etude de stabilité du flanc Nord de la mine de kefEssnoun- Tébessa», Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master, Université Abderahmane Mira de Bejaia, 148 pages

- [12] 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
- [13] 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
- [14] Barton, N., R. Lien, et al. (1974). "Engineering classification of rock masses for the design of rock support." Rock Mechanics 6(189-236). 1974.
- [15] Chalhoub M., [2006], «Apport des méthodes d'homogénéisation numérique à la classification des massifs rocheux fracturés », Thèse de doctorat 2006, Ecole Nationale des mines de Paris, 206 pages.
- [16] Comité Français de Mécanique des Roches. "Manuel de mécanique des roches". Tome 2:Les applications. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris. 2000.
- [17] Chekir Mohammed et Mani Nidal.[2016](caractérisation et classification géo mécanique 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
- [18] CHENAF A. 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 roches », Tome 1 : fondements, Comité français de mécanique des roches, 87 pages.
- [20] 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.
- [21] Hudson J.A., [1993], « Comprehensive rock engineering-principles, practice and projects », rock Testing and Site Characterization, Oxford, vol 3.
- [22] Hoek, E. and E. T. Brown. "Underground Excavations in Rock", London: Instn. Min. Metall. 1980
- [23] Jean-François SERRATRICE et Jean-Louis DURVILLE (Description des roches et des massifs rocheux exploités de deux bases de données) bulletin des laboratoires des ponts et chaussées -211-septembre –octobre 1997-réf.4154-pp.73-87

## Références bibliographiques

---

- [24] Kimour M [2016](développement d'une méthodologie d'estimation des discontinuités du massif rocheux en vue de son utilisation en conception minière ) ;thèse de doctorat de université Badji Mokhtar - annaba
- [25] LAGOUAG Mohamed Yacine,(2014) « Etude des lamproites de Nord –Est algérien ),Thèse de magister ,université de Setif 1 ,option –géologie et ressources Minérales, pp.28
- [26] Melle SADEK Kahina et Melle CHAOUCH Ibtissem [2016](caractérisation et classification du massif rocheux de djebel de Boukhadra –Tébessa)mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en mines ,université Abderrahmane Mira de Bejaia
- [27] Maciej A., [2012], « Modification des classifications mécaniques pour les massifs rocheux schisteux », Thèse de maîtrise des sciences appliquées de l'université de Montréal, spécialité génie minier, 163 pages.
- [28] MOUSSAOUI N,(2011) « Etude de la microsismicité de la région de Kharrat »,thèse de magister ,université Ferhat Abbas de Sétif ,option –sismologie, pp.5.
- [29] Panet M. et al. (1976) La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de génie civil.Association Amicale des Ingénieurs Anciens de l'E.N.P.C.
- [30] Palmstrom, A. "Rmi - A rock mass characterization system for rock engineering purposes». University of Oslo, Ph.D. Thesis, 400 p. 1995
- [31] 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.
- [32] RPOR-2008(Règles parasismique applicables au domaine des ouvrages d'art) Document technique réglementaire de ministère des travaux publics, pp.14-15
- [33] Sanat A.et Zidani N., [2015], «Etude de stabilité des talus de la carrière d'Ain El Kebira (Wilaya de Sétif) vis -à-vis un glissement circulaire », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa.
- [34] 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
- [35] Singh, B. R. K, Goel. "Rock mass classification: a practical approach in Civil Engineering". Oxford, Elsvier Science Ltd. 1999.

[36] 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.

[37] Thi Thanh Nhan Hoang, [2010], « Etude du comportement d'un milieu rocheux fracturé : Application à la réalisation du tunnel de St Beat. Other. », Ecole des ponts Paristech, France, 273 pages

[38] [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com) image Satellites landsat/Copernicus 2020

[39] 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

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

[41] Zhao J., [2008], « Propriétés des discontinuités », part 3, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne

[42] Zhao J., [2008], « Mécanique et propriétés des massifs », part 2, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.

Norme AFNOR la teneur en eau [NF 94-053]

Norme AFNOR Densité volumique humide [NF P94-053]

Norme AFNOR Densité volumique sèche [NF P94-064]

Norme AFNOR Densité volumique des grains soles [NF P94 -054]

Norme AFNOR Essai au bleu de méthylène [NF P94-068]

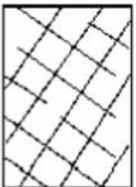
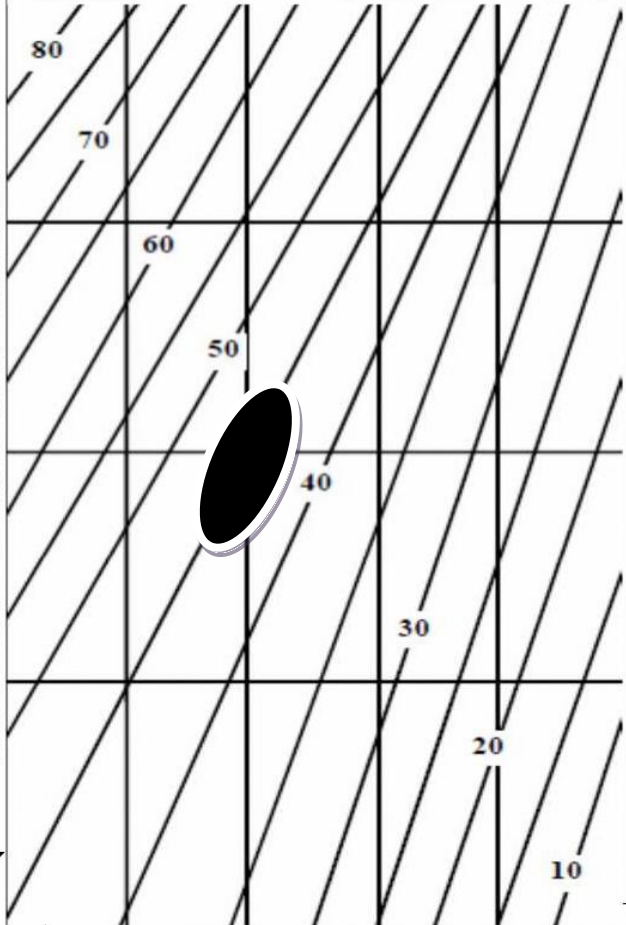



Norme AFNOR Essai de compression un axiale [NF P94-420]

Norme AFNOR Essai de traction par flexion [NF P18-407]

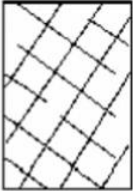
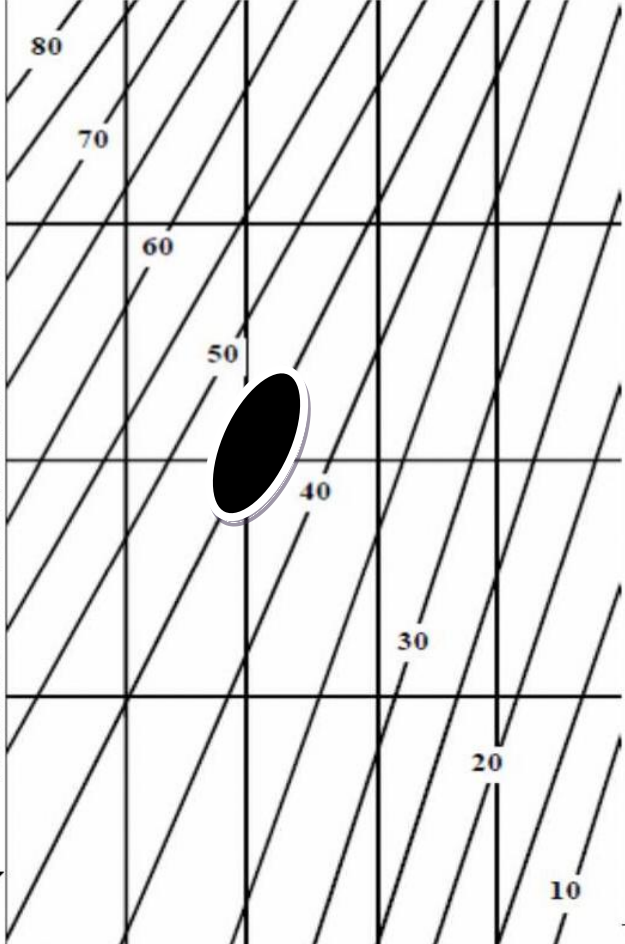



# *Annexes*

Annexe 02 : caractérisation du massif suivant le GSI

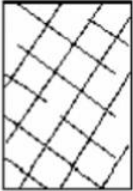
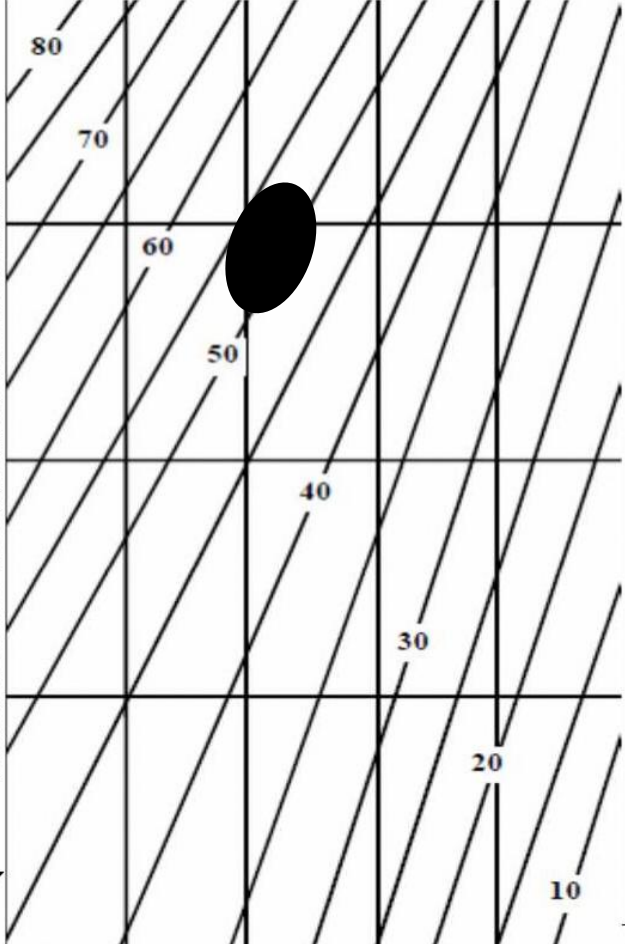



Annexe 02.A : couche des calcaires (cylindriques)

<p><b>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE.</b>          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><b>STRUCTURE</b></p>	<p><b>CONDITIONS DE SURFACE</b></p> <p><b>TRES BONNES</b> Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p><b>BONNES</b> Surfaces couleur de fer, rugueux et légèrement altérées</p> <p><b>MOYENNES</b> Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p><b>PAUVRES</b> Surfaces aux contours lisses, fortement altérées Avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p><b>TRES PAUVRES</b> Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique</p>
 <p><b>FRACTURÉE</b> – masse rocheuse non perturbée très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	<p><b>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DECREISSANT</b></p> 
 <p><b>TRÈS FRACTURÉE</b> – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre</p>	
 <p><b>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE</b> – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles</p>	
 <p><b>DÉSINTÉGRÉE</b> – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>	

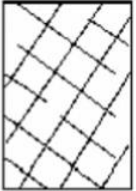
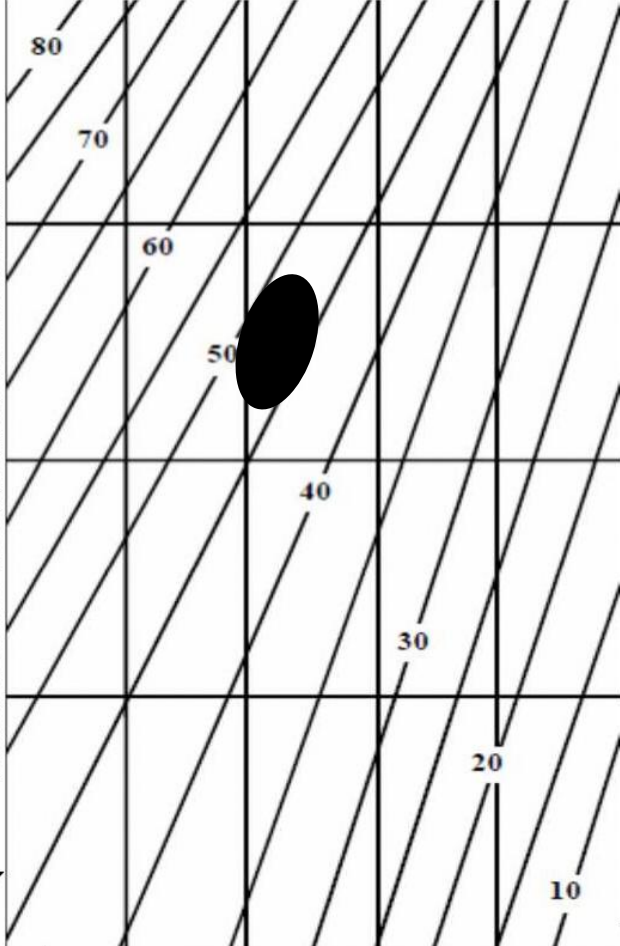


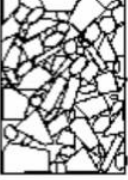
Annexe 02.B : couche marbres (cylindrique)

<p><b>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE.</b>          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><b>STRUCTURE</b></p>	<p><b>CONDITIONS DE SURFACE</b></p> <p><b>TRES BONNES</b> Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p><b>BONNES</b> Surfaces couleur de fer, rugueux et légèrement altérées</p> <p><b>MOYENNES</b> Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p><b>PAUVRES</b> Surfaces aux contours lisses, fortement altérées Avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p><b>TRES PAUVRES</b> Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique</p>
 <p>FRACTURÉE – masse Rocheuse n on perturbée très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	<p><b>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DECREISSANT</b></p> 
 <p>TRÈS FRACTURÉE – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre</p>	
 <p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles</p>	
 <p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>	

Annexe 02.C : couche des calcaires (cubique)

<p><b>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE.</b>          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><b>STRUCTURE</b></p>	<p><b>CONDITIONS DE SURFACE</b></p> <p><b>TRES BONNES</b> Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p><b>BONNES</b> Surfaces couleur de fer, rugueux et légèrement altérées</p> <p><b>MOYENNES</b> Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p><b>PAUVRES</b> Surfaces aux contours lisses, fortement altérées Avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p><b>TRES PAUVRES</b> Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique</p>
 <p>FRACTURÉE – masse Rocheuse n on perturbée très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	<p><b>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DECREISSANT</b></p> 
 <p>TRÈS FRACTURÉE – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre</p>	
 <p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles</p>	
 <p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>	

Annexe 02.D : couche des marbres (cubique)

<p><b>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE.</b></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. [...]</p> <p>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><b>STRUCTURE</b></p>	<p><b>CONDITIONS DE SURFACE</b></p> <p><b>TRES BONNES</b> Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p><b>BONNES</b> Surfaces couleur de fer, rugueux et légèrement altérées</p> <p><b>MOYENNES</b> Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p><b>PAUVRES</b> Surfaces aux contours lisses, fortement altérées Avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p><b>TRES PAUVRES</b> Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique</p>
 <p><b>FRACTURÉE</b> – masse rocheuse non perturbée très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	<p><b>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DE CROISSANT</b></p> 
 <p><b>TRÈS FRACTURÉE</b> – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre</p>	
 <p><b>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE</b> – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles</p>	
 <p><b>DÉSINTÉGRÉE</b> – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>	



**Annexe 01.B** : Paramètre Ja (paramètre d'altération des joints), (Barton et al 1974).

<b>Epontes en contact</b>	<b>Caractère du joint</b>		<b>Conditions</b>	<b>Ja</b>
	Joints propres	Joint serré, recimenté	Remplissage de quartz, épidote,...etc.	0.75
		Epontes non altérées	Pas d'enduit.	1
		Epontes légèrement altérées	Enduit minéral non radoucissant, grains sans argile	2
	Enduits ou remplissage	Enduits à frottement	Sable, silt, calcite,...etc. (non radoucissant)	3
		Enduits à cohésion, épaisseur < 1-2 mm	Argile, chlorite, talc,...etc. (radoucissant)	4
<b>Epontes en contact</b>	<b>Remplissage</b>	<b>Type</b>	<b>Ja</b>	
	Matériaux frottant	Sable, silt, calcite,...etc.	4	
	Remplissage fortement sur-consolidé épaisseur < 5 mm	Remplissage compact d'argile, chlorite, talc...etc.	6	
	Remplissage légèrement sur consolidé, épaisseur < 5 mm	Sur-consolidation légère ou moyenne d'argile, de chlorite, talc...etc.	8	
	Remplissage d'argiles gonflantes, épaisseur < 5 mm	Matériaux gonflants (ex montmorillonite)	8-12	
<b>Epontes séparées</b>	<b>Condition d'éponte</b>	<b>Ja</b>		
	Zones de roche concassée	6		
	Roche et argile	8-12		
	Zones silteuses, sableuses, avec une faible fraction d'argile	5		
	Zones ou bandes Epaisées d'argile	10-13		

**Annexe 01.C** : Paramètre  $J_w$  (paramètre hydraulique), (Barton et al, 1974).

<b>Influence de l'eau en charge</b>	<b><math>J_w</math></b>	<b>Pression d'eau approximative (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
- Excavation à sec ou faibles venues d'eau (< 5 l/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
- Fortes venues 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  $J_w$  en cas de mise en place d'un dispositif de drainage ;

(ii) les problèmes particuliers liés à la formation de glace ne sont pas pris en compte.

**Annexe 01.D** : Paramètre de  $J_n$  (nombre de famille de discontinuités), (Barton et al. 1974)

<b>Nombre de famille de diaclases</b>	<b><math>J_n</math></b>
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 aléatoires très nombreuses	15
Roche concassée, semblable à un sol	20
Note : 1. Pour une intersection, utilisez $3 \times J_n$ 2. Pour un portail, utilisez $2 \times J_n$	

**Annexe 01.E** : Paramètre de SRF (paramètre de réduction relatif aux contraintes), (Barton et al.1974).

<b>Ouvrage recoupant des zones de faiblesse provoquant la décompression de la roche lors du percement</b>	Zones de faiblesse fréquentes, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement, rocher environnant très décomprimé (toutes profondeurs).	<b>SFR=10</b>		
	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.				
		$Sc/\sigma_c$	$\sigma_q/\sigma_c$	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 serrée (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 modéré (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

			$\sigma_0/\sigma_C$	SFR
Note: (ii) Si l'état de contraintes est fortement anisotrope : pour $5 < \sigma_1/\sigma_3 < 10$ , réduire $\sigma_c$ à $0,75 \sigma_c$ Pour $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ , réduire $\sigma_c$ à $0,5 \sigma_c$ (iii) Il est rare que la hauteur de couverture au-dessus du toit soit plus faible que la largeur de l'ouvrage. Si c'est le cas, il est suggéré de porter l'indice de SFR de 2,5 à 5.				
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		10-5