

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU  
FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES**  
EN VU DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER  
SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL  
OPTION : GÉOTECHNIQUE ET ENVIRONNEMENT

THÈME

*Caractérisation et classification géomécanique des massifs rocheux  
D'Ait Yahia Moussa  
(Etude de cas : Pénétrante Tizi Ouzou – Bouira PK13- PK15)*



**PRÉSENTÉ PAR**  
**M<sup>me</sup> DALI OMAR Hayat**

Devant le jury d'examen suivant :

<b>M<sup>me</sup> MOBAREK H</b>	<b>M.A.A</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Présidente.</b>
<b>M<sup>me</sup> AIT BACHIR S</b>	<b>M.A.A</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Promotrice.</b>
<b>M<sup>me</sup> MEZIANI F</b>	<b>M.A.A</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Examinatrice.</b>

*Année Universitaire: 2018-2019*

## *Remerciements*

*Nous tenons avant tout à remercier le bon Dieu pour nous avoir animés de volonté, de force et de santé à fin que nous puissions réussir notre travail.*

*Nos plus sincères et intenses remerciement s'adressent à:*

*Notre promotrice M<sup>me</sup> AIT BACHIR Samia pour son encadrement, son soutien, pour tous ses précieux conseils qui ont été de grande utilité pour moi.*

*Madame MOBAREK H qui nous a fait l'honneur de Présider le jury.*

*Madame MEZIANI F d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Au personnel du Laboratoire central des Travaux Publics (LCTP, TIZI OUZOU).*

*Un grand remerciement pour Mr LOUMI Salah ingénieur d'antenne de Tizi ousou du Laboratoire central des Travaux Publics, il n'a pas hésité à nous faire part de leur connaissance cumulée et leur expérience avec nous.*

*Je remercie Mr. KHÉLIFA Sid Ali et Mme BOUAZZOUNI Fatima responsable du laboratoire MDS de l'université de mouloud Mammeri Tizi Ouzou pour sa disponibilité et surtout sa confiance.*

*Je tiens également à remercier Mr. BOUHERRAOUA R responsable du laboratoire BETON pour sa disponibilité et ces conseils et orientations.*

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

## ***Dédicace***

*Ce modeste travail est dédié à :*

*Mes chers parents, frères et sœurs.*

*A toute la famille DALI OMAR*

*A tous mes amis sans exception.*

*A toute la promotion de géotechnique et environnement.*

## Sommaire

Liste des tableaux .....	I
Liste des figures .....	III
Liste des abréviations.....	VI
Notations .....	VII

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### Chapitre I : Structure et comportement d'un massif rocheux

I.1. Introduction.....	2
I.2. Distinction sol/ roche.....	2
I.3. Classification géologique des roches .....	3
I.4. Structure géométrique des massifs rocheux.....	4
I.4.1. Description des massifs rocheux.....	4
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.....	6
I.4.3.2. Les familles des discontinuités.....	6
I.4.3.3. Les caractéristiques géométriques des discontinuités.....	9
I.5. Conclusion .....	16

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

II.1. Introduction.....	17
II.2. Les buts des systèmes de classification des massifs rocheux.....	17
II.3. Les différents systèmes de classification.....	17
II.3.1. Système du RQD (Rock Quality Designation).....	18
II.3.1.1. Limites du système RQD.....	20
II.3.2. Système RMR (Rock Mass Rating).....	20
II.3.2.1. Estimation des caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR....	23
II.3.2.2. Limitations du système RMR.....	24
II.3.3. Système Q.....	24
II.3.4. Système du GSI (Geological Strength Index).....	26
II.3.5. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating).....	28
II.4. Commentaire sur les systèmes de classification.....	31
II.5. Conclusion.....	31

### Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

III.1. Introduction.....	32
III.2. Présentation de la pénétrente de Tizi ouzou- Bouira.....	32
III.2.1. Consistance physique de la pénétrente.....	32
III.2.2. Situation géographique.....	33
III.3. Hydrogéologie.....	33
III.3.1. Définition de l'Hydrologie.....	33
III.3.2. l'Hydrologie de la région d'étude.....	34
III.4. Contexte géologique de La zone d'étude .....	34
III.4.1. Cadre Géologique régionale .....	34

III.4.1.1. Le Tell.....	35
III.4.1.1.a. Les Kabyliques.....	35
III.4.1.1.b. Le domaine de flyschs.....	36
III.4.1.1.c. Le domaine externe.....	37
III.4.1.2. Sismotectonique.....	37
III.4.1.2.a. Evolution tectonique.....	38
III.4.2. Géologie locale.....	38
III.4.3. Sismicité.....	40
III.5. Conclusion.....	41

## Chapitre IV : Propriétés physico- mécaniques des roches

IV.1. Introduction.....	42
IV.2. La composition minéralogique.....	42
IV.2.1. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X .....	42
IV.2.1.1. Définition .....	42
IV.2.1.2. Principe de la méthode.....	43
IV.2.1.3. Technique d'analyse.....	43
IV.2.1.4. Les minéraux.....	44
IV.2.1.5. Diagramme normal.....	44
IV.3. Caractéristiques physiques .....	50
IV.3.1. Teneur en eau W % [NF P94- 050] .....	50
IV.3.1.1. Définition .....	50
IV.3.1.2. Exécution de l'essai .....	50
IV.3.1.3. Expression des résultats.....	50
IV.3.2. La masse volumique.....	51
IV.3.2.1. La masse volumique naturelle $\rho_h$ [NF P 94-053].....	51
IV.3.2.2. La masse volumique sèche $\rho_d$ et la masse volumique saturée $\rho_{sat}$ Par pesée hydrostatique [NF P94- 064].....	52
IV.3.2.3. La masse volumique des particules solide $\rho_s$ méthode du pycnomètre [NF P94- 054].....	55
IV.3.2.3.1. Définition .....	55
IV.3.2.3.2. Exécution de l'essai.....	55
IV.3.3. Indice des vides et porosité.....	57
IV.3.3.1. Indice des vides (e) .....	57
IV.3.3.2. Porosité (n).....	57
IV.3.4. Essai au bleu de méthylène [NF P94- 068].....	58
IV.3.4.1. Définition.....	58
IV.3.4.2. Principe de l'essai.....	58
IV.3.4.3. Préparation de la solution.....	58
IV.3.4.4. Expression des résultats.....	60
IV.4. Caractéristiques mécaniques.....	61
IV.4.1. Critère de rupture.....	61
IV.4.1.1. Critère de Mohr Coulomb et le module de Young.....	61
IV.4.1.2. Le Critère de Hoek et Brown.....	63

IV.4.2. Propriétés mécaniques des roches.....	64
IV.4.2.1. Résistance en compression.....	64
IV.4.2.1.1. Essai de compression uniaxiale [NF P 94-420].....	64
IV.4.2.2. La résistance en traction.....	69
IV.4.2.2.1. Essai de traction par flexion [NF P 18-407].....	69
IV.4.2.2.2. Essai de traction par flexion trois points.....	70
IV.5. Conclusion.....	73

### **Chapitre V : Caractérisation et classification géomécanique des massifs rocheux d'ait yahia moussa**

V.1. Introduction.....	75
V.2. Etude des discontinuités.....	75
V.2.1. Caractéristiques rocheuse.....	75
V.2.2. Mesure de l'orientation des discontinuités.....	77
V.3. La présentation des données et des mesures.....	78
V.3.1- Le premier affleurement : Micaschiste.....	78
V.3.2- Le deuxième affleurement : Grès.....	81
V.3.3- Le troisième affleurement : Calcaire.....	83
V.3.4- Le quatrième affleurement : Marbre.....	85
V.4. Classification Géomécanique des massifs rocheux de site d'Ait Yahia Moussa.....	87
V.4.1. Système du RQD (Rock Quality Designation).....	87
V.4.2. Système RMR (Rock Mass Rating).....	88
V.4.3. Système Q.....	91
V.4.4. Système du GSI (Geological Strength Index).....	91
V.4.5. Systèmes du SMR (Slope Mass Rating).....	92
V.5. Conclusion.....	93
Conclusion Générale.....	94

Références bibliographiques

Annexes

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1.</b> Les principales familles des roches et leurs caractéristiques.....	3
<b>Tableau I.2.</b> Description de l'espace des discontinuités.....	12
<b>Tableau I.3.</b> Classification des discontinuités selon leur extension.....	15
<b>Tableau I.4.</b> Classification d'ouverture des discontinuités.....	16
<b>Tableau II.1.</b> Systèmes de classification du massif rocheux.....	17
<b>Tableau II.2.</b> Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux.....	19
<b>Tableau II.3.</b> Classification RMR Bieniawski(1989).....	22
<b>Tableau II.4.</b> Classe de rocher suivant la classification de Z.BIENIAWSKI après application De la note d'ajustement.....	23
<b>Tableau II.5.</b> Relations entre RMRsec et la résistance à la compression simple d'après Stille et al. (1982).....	23
<b>Tableau II.6.</b> Évaluation de la cote Q et de la qualité du massif.....	25
<b>Tableau II.7.</b> Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI .....	26
<b>Tableau II.8.</b> Notes des paramètres du SMR (Romana, 1985).....	29
<b>Tableau II.9.</b> Les différentes classe de stabilité par la valeur du SMR.....	30
<b>Tableau II.10.</b> les suggestions de soutènement selon la classe du SMR.....	30
<b>Tableau IV.1.</b> La teneur en eau.....	50
<b>Tableau IV.2.</b> La masse volumique naturelle.....	51
<b>Tableau IV.3.</b> Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche.....	52
<b>Tableau IV.4.</b> La masse volumique sèche.....	53
<b>Tableau IV.5.</b> La masse volumique saturée.....	54
<b>Tableau IV.6.</b> Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides.....	56
<b>Tableau IV.7.</b> Résultats de la détermination de l'indice des vides.....	57
<b>Tableau IV.8.</b> Résultats de la détermination de la Porosité.....	58
<b>Tableau IV.9.</b> Classe des sols en fonction du VBS. ....	59
<b>Tableau IV.10.</b> Résultats d'essai au bleu de méthylène.....	60
<b>Tableau IV.11.</b> Valeurs de la constante du matériau $m$ de quelques types de roches.....	63
<b>Tableau IV.12.</b> La résistance à la compression.....	67
<b>Tableau IV.13.</b> Classification des roches en fonction de la résistance à la compression.....	68
<b>Tableau IV.14.</b> Classification des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa en fonction de la résistance à la compression.....	68
<b>Tableau IV.15.</b> La résistance à la traction par flexion trois points.....	72

<b>Tableau IV.16.</b> Les résultats de la Resistance a la traction par rapport à sa compression.....	72
<b>Tableau IV.17.</b> Classification des roches en fonction de la résistance à la traction.....	73
<b>Tableau IV.18.</b> Classification des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa en fonction de la résistance à la traction.....	73
<b>Tableau V.1.</b> Critère d'estimation de la résistance de la roche.....	76
<b>Tableau V.2.</b> Degrés d'altération de la roche.....	77
<b>Tableau V.3.</b> RQD des différents massifs.....	87
<b>Tableau V.4.</b> Classification RMR Bieniawski (1989) de micaschiste.....	88
<b>Tableau V.5.</b> Classification RMR Bieniawski (1989) de Grès.....	88
<b>Tableau V.6.</b> Classification RMR Bieniawski (1989) de Calcaire.....	89
<b>Tableau V.7.</b> Classification RMR Bieniawski (1989) de Marbre.....	89
<b>Tableau V.8.</b> Classification RMR des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa.....	90
<b>Tableau V.9.</b> Les caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR.....	90
<b>Tableau V.10.</b> Classification Q-système du massif rocheux d'Ait Yahia Moussa.....	91
<b>Tableau V.11.</b> Classification GSI des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa.....	91
<b>Tableau V.12.</b> Les valeurs du SMR.....	92
<b>Tableau V.13.</b> La différente classe de stabilité par la valeur du SMR pour les massifs rocheux étudiés.....	92

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1.</b> Cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols .....	2
<b>Figure I.2.</b> Structure géométrique d'un massif rocheux de Grès à Ait Yahia Moussa.....	4
<b>Figure I.3.</b> Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés.....	5
<b>Figure I.4.</b> Types de structures des massifs rocheux avec les représentations statistiques correspondantes.....	6
<b>Figure I.5.</b> Les joints stratigraphiques, dolomies Liasiques – Oman.....	7
<b>Figure I.6.</b> Réseau de diaclases dans un banc de grés (Eaglehawk Neck, Tasmania).....	7
<b>Figure I.7.</b> Plan de faille mettant en contact les micaschistes et les marbres de la région d'étude.....	8
<b>Figure I.8.</b> Micro plissement au niveau des micaschistes de la région d'étude.....	8
<b>Figure I.9.</b> Schistosité au niveau des micaschistes du massif rocheux d'Ighil N'Touila.....	9
<b>Figure I.10.</b> Mesures de l'orientation du plan de discontinuité, différents types de repérage.....	9
<b>Figure I.11.</b> Mesures de l'orientation du plan de discontinuité (Marbre d'Ait Yahia Moussa).....	10
<b>Figure I.12.</b> Orientation d'une direction de plan dans l'espace, au centre en perspective cavalière, par la direction(ou azimut) de ses lignes de niveau (vue en plan, à gauche), et le pendage de ses lignes de pente (en coupe, à droite) .....	10
<b>Figure I.13.</b> Représentation stéréographique.....	11
<b>Figure I.14.</b> Projection stéréographique d'une faille inverse.....	11
<b>Figure I.15.</b> Mesure de l'espacement.....	12
<b>Figure I.16.</b> Mesure de la fréquence des discontinuités.....	13
<b>Figure I.17.</b> Une caisse des carottes de calcaire d'Aït Yahia Moussa.....	13
<b>Figure I.18.</b> Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC).....	14
<b>Figure I.19.</b> Persistance de différents ensembles de fractures .....	15
<b>Figure I.20.</b> Fissure ouverte et remplie .....	15
<b>Figure II.1.</b> Les carotte de calcaire d'Ait Yahia Moussa.....	18
<b>Figure II.2.</b> Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR.....	20
<b>Figure II.3.</b> Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse (Hoek et Brown, 1995).....	27
<b>Figure II.4.</b> Orientation d'une pente de type plane.....	28
<b>Figure III.1.</b> Présentation sommaire du projet de la pénétrante Tizi Ouzou Bouira.....	32
<b>Figure III.2.</b> Localisation de la zone d'étude.....	33

<b>Figure III.3.</b> Carte schématique montrant les domaines géomorphologiques en Algérie.....	34
<b>Figure III.4.</b> Orogène alpin périméditerranéen.....	35
<b>Figure III.5.</b> Schéma structural simplifié des Maghrébides.....	36
<b>Figure III.6.</b> Coupe générale présentant les chevauchements dans les maghrébides.....	36
<b>Figure III.7.</b> Carte sismo-tectonique du nord de l'Algérie montrant les principales structures actives Observées dans le Tell.....	37
<b>Figure III.8.</b> Extrait de la carte géologique de la région d'étude (Feuille N°44 Dra El Mizane, e : 1/50000).....	39
<b>Figure III.9.</b> Situation des différents massifs rocheux étudiés.....	40
<b>Figure III.10.</b> Carte schématique des zonages sismiques de l'Algérie.....	40
<b>Figure IV.1.</b> Les prises des échantillons.....	42
<b>Figure IV.2.</b> Un diffractomètre.....	42
<b>Figure IV.3.</b> Principe de la méthode d'un diffractomètre.....	43
<b>Figure IV.4.</b> Echelle de dureté de MOHS.....	44
<b>Figure IV.5.</b> Diffractogramme du Grès.....	44
<b>Figure IV.6.</b> Les pourcentages des minéraux du Grès.....	45
<b>Figure IV.7.</b> Diffractogramme du Grès friable.....	45
<b>Figure IV.8.</b> Les pourcentages des minéraux du Grès friable.....	46
<b>Figure IV.9.</b> Diffractogramme du Micaschiste.....	46
<b>Figure IV.10.</b> Les pourcentages des minéraux du Micaschiste.....	47
<b>Figure IV.11.</b> Diffractogramme du Calcaire.....	47
<b>Figure IV.12.</b> Les pourcentages des minéraux du Calcaire.....	48
<b>Figure IV.13.</b> Diffractogramme du Marbre.....	48
<b>Figure IV.14.</b> Les pourcentages des minéraux du Marbre.....	49
<b>Figure IV.15.</b> Diffractogramme du Conglomérat.....	49
<b>Figure IV.16.</b> Les pourcentages des minéraux du Conglomérat.....	50
<b>Figure IV.17.</b> Préparation les échantillons dans le panier de la pesée hydrostatique.....	52
<b>Figure IV.18.</b> Equipement de l'essai.....	56
<b>Figure IV.19.</b> Masse humide des prises d'essai.....	59
<b>Figure IV.20.</b> Gestion du dosage du bleu de Méthylène.....	59
<b>Figure IV.21.</b> Essai au bleu de méthylène.....	59
<b>Figure IV.22.</b> Echelle de VBS donnée par ARVOR géotechnique.....	59
<b>Figure IV.23.</b> Essai du bleu de méthylène sur le papier filtre.....	60
<b>Figure IV.24.</b> Représentation de la droite de Mohr-Coulomb.....	61

<b>Figure IV.25.</b> Critère de résistance de Mohr-Coulomb représenté dans le plan ( $\tau$ , $\sigma$ ).....	62
<b>Figure IV.26.</b> Diagramme contrainte-déformation.....	62
<b>Figure IV.27.</b> Ajustement du critère linéaire de Mohr-Coulomb au critère non-linéaire de Hoek- Brown, d'après Hoek et Brown.....	64
<b>Figure IV. 28.</b> Schéma de principe d'un essai de compression uniaxiale.....	64
<b>Figure IV. 29.</b> Essai de compression uniaxiale.....	64
<b>Figure IV.30.</b> Dispositif expérimental.....	65
<b>Figure IV.31.</b> Essai de compression simple sur les roches étudiée.....	66
<b>Figure IV.32.</b> Machine de l'essai de traction par flexion .....	69
<b>Figure IV.33.</b> Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion (3 points).....	69
<b>Figure IV.34.</b> Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (4 points).....	70
<b>Figure IV.35.</b> Essai de traction par flexion trois points sur les roches étudiée.....	71
<b>Figure V.1.</b> Conseil pour l'orientation des ensembles de discontinuités (Calcaire d'Ait Yahia Moussa).....	78
<b>Figure V.2.</b> Photos du premier affleurement.....	78
<b>Figure V.3.</b> Projection stéréographique des discontinuités du massif rocheux de Micaschiste.....	80
<b>Figure V.4.</b> Photos du deuxième affleurement.....	81
<b>Figure V.5.</b> Projection stéréographique des discontinuités du massif rocheux de Grès.....	82
<b>Figure V.6.</b> Photos du troisième affleurement.....	83
<b>Figure V.7.</b> Projection stéréographique des discontinuités du massif de Calcaire.....	84
<b>Figure V.8.</b> Photos du quatrième affleurement.....	85
<b>Figure V. 9.</b> Projection stéréographique des discontinuités du massif de Marbre.....	86

## LISTE DES ABREVIATIONS

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

C.F.M.R : Comité Français de Mécanique des Roches

RQD: Rock Quality Designation (Degré de fracturation).

JRC: Joint Roughness Coefficient (Coefficient de rugosité du joint).

RMR: Rock Mass Rating

Q –Système: Mass Quality ou Tunnelling Quality Index

GSI: Geological Strength Index

SMR: Slope Mass Rating

SACSIR: South African Council of Scientific and Industrial Research.

NGI: Norwegian Geotechnical Institute.

SRF: Stress Reduction Factor.

---

**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.

$\Phi$  : l'angle de frottement interne.

C : La cohésion

[KN/m<sup>2</sup>]

( $\lambda$ ) : la fréquence des discontinuités.

L : la longueur du levé.

Jv: La densité volumique des joints.

A1 : Résistance en compression uniaxiale de la roche intacte.

A2: Rock Quality Index (RQD).

A3 : Espaceent des diaclases.

A4 : Condition des joints.

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

A6 : Orientation des discontinuités.

Jn : Nombre de famille de discontinuités.

Jr : Paramètre de rugosité des joints.

Ja : Paramètre d'altération des joints.

Jw : Paramètre hydraulique.

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 du pendage du talus.

$\alpha_j$  : Direction du pendage des joints.

$\beta_s$ : Pendage du talus.

$\beta_j$  : Pendage du joints.

E : Module de Young

[KN /m<sup>2</sup>]

W : La teneur en eau.

$M_h$  : La masse naturelle ; g  
 $M_s$  : la masse du matériau sec; g  
 $\rho_h$  : La masse volumique naturelle; g/cm<sup>3</sup>  
 $V_t$  : le volume de l'échantillon; cm<sup>3</sup>  
 $\rho_d$  : La masse volumique sèche; g/cm<sup>3</sup>  
 $M_r$  : Masse de la roche ; g.  
 $M_{rp}$  : Masse de la roche paraffinée à l'air libre ; g.  
 $M'_{rp}$  : Masse de la roche paraffinée dans l'eau ; g.  
 $\rho_p$  : Masse volumique de la paraffine; g/cm<sup>3</sup>.  
 $\rho_w$  : Masse volumique de l'eau; g/cm<sup>3</sup>.  
 $\rho_{sat}$  : La masse volumique saturée ; g/cm<sup>3</sup>.  
 $M_{sat_r}$  : Masse de la roche saturée ; g.  
 $M_{sat_{rp}}$  : Masse de la roche saturée paraffinée à l'air libre ; g.  
 $M_{sat'_{rp}}$  : Masse de la roche saturée paraffinée dans l'eau ; g.  
 $\rho_s$  : La masse volumique des particules solide ; g/cm<sup>3</sup>  
 $M_1$  : 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.  
 $e$  : Indice des vides.  
 $n$  : Porosité.  
 $VBS$  : Valeur au bleu.  
 $d$  : La distance des plans réticulaires.  
 $\theta$  : Angle entre le faisceau incident et le réseau de plans.  
 $n$  : L'ordre de la réflexion.  
 $\lambda$  : La longueur d'onde de la source.  
 $\tau$ : contrainte de cisaillement.  
 $\varepsilon$  : déformation.  
 $m$  : un paramètre de forme.  
 $s$  : le coefficient de fracturation.  
 $R_c$  : la résistance à la compression uniaxiale de la roche.

$\sigma_n$ : la contrainte normale.	
F : effort (charge) maximale atteinte.	[KN]
S : section d éprouvette.	
H: hauteur d éprouvette.	
D: diamètre d éprouvette.	
$\sigma_f$ : Résistance à la flexion (4 pts)	[MPa]
Ff: Charge de rupture de l'éprouvette en flexion	[KN]
l : Longueur qui sépare les deux appuis.	
b : Côte de l'éprouvette.	
Rf : Résistance à la flexion (3 pts)	[MPa]
Rt: la résistance à la traction	[MPa]

# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

Les roches et les massifs rocheux sont à la fois complexes et opaques. Même les plus simples en apparence peuvent réserver des surprises. Pour connaître leurs composants, leurs structures, et ce qui s'y passe, l'ingénieur dispose de méthode de reconnaissance et d'auscultation, depuis les méthodes de la géologie << traditionnelle >> avec le marteau et la boussole, jusqu'à des technologies et métrologies de pointe, en passant par des techniques classiques (forage, prélèvement d'échantillons, essais de laboratoire et in situ, méthodes géophysiques, etc.), toutes méthodes qui font des progrès plus ou moins rapides.

Le problème de stabilité des massifs rocheux peut être résolu seulement à condition de connaître de façon approfondie et détaillé 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 les massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa (wilaya de Tizi ouzou - au Sud-Est d'Alger). De notre part nous nous intéressons au tronçon PK13 au PK15 une partie de la pénétrante Tizi Ouzou- Bouira. De ce fait la caractérisation et la classification des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa est indispensable afin de spécifier les zones à défaillance et stopper les problèmes et risques de stabilité 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 à déterminer les différents paramètres physiques et mécaniques 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.

**Chapitre I**  
**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 d'érige 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 liés par des forces de cohésion fortes et permanentes. [1]

- ❖ Les sols comportent des matériaux granulaires non cimentés (donc meubles, sans cohésion et pratiquement pas de résistance à la compression simple) comme le sable et des matériaux argileux de faible cohésion. [1]
- ❖ Les roches ont une forte cohésion et une résistance à la compression simple supérieure à 10 MPa, mais comporte généralement des surfaces de discontinuités donc la roche à l'échelle d'ingénierie est Discontinue, Inhomogène, Anisotrope, et Non-linéairement Elastique. [1]

La 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.

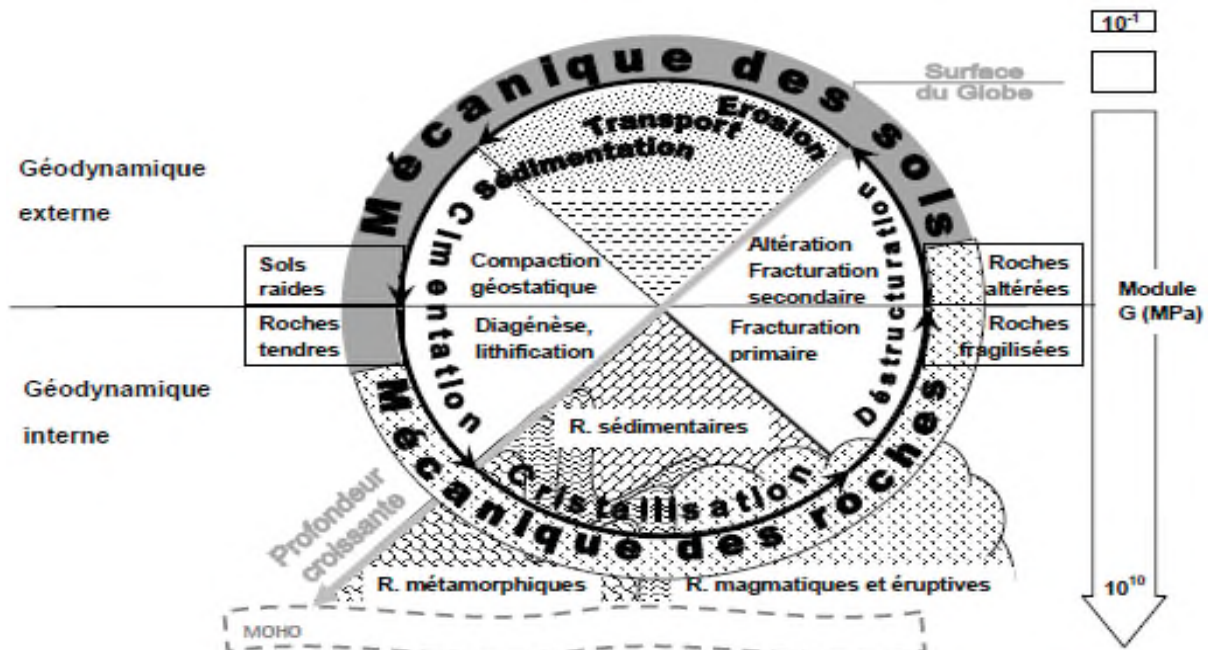


Figure I.1. Cycle de la matière minérale et organique des roches aux sols. [1]

**I.3. Classification géologique des roches**

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

- ✓ Les roches magmatiques: résultent du refroidissement et de la solidification de magmas avec ou sans cristallisation. Elles peuvent être formées soit en profondeur, on a alors les roches plutoniques (granites par exemple), soit à la surface et on a alors les roches effusives (basaltes par exemple). Leur distinction se fait grâce à la taille des minéraux constitutifs : les roches plutoniques ont généralement un grain grossier et les effusives un grain fin.
- ✓ Les roches sédimentaires: sont formées par la décomposition (mécanique, chimique ou biologique) des matériaux 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.

**Tableau I.1.** Les principales familles des roches et leurs caractéristiques. [27]

Familie		Teinte	Minéraux constitutifs	Principaux termes	Autres termes
Roches magmatiques	volcaniques	claire ↓ sombre	{ quartz feldspaths amphiboles pyroxène olivine	trachyte, rhyolite andésite  basalte	dolérite
	plutoniques	claire ↓ sombre	{ quartz feldspaths amphiboles pyroxène	granite diorite  gabbro	microgranite microdiorite monzonite péridotite
Roches métamorphiques	foliées	claire ↓ sombre	{ quartz micas  amphibole	gneiss, micaschiste  amphibolite	leptynite
	non foliées			marbre, cornéenne	
Roches sédimentaires	détritiques	sombre ↓ clair	{ argiles calcite quartz	pélites marnes grès	argillites
	biogènes et/ou chimiques		{ carbonates, sulfates, etc.	calcaires, craie, dolomies, gypse	meulière, charbon

## 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 des structures très complexes. Ils sont assimilés à un assemblage de blocs appelés matrice rocheuse lesquels sont délimités par des discontinuités constituées de fissures, de fractures ou de failles ou encore de limites stratigraphiques. [3]



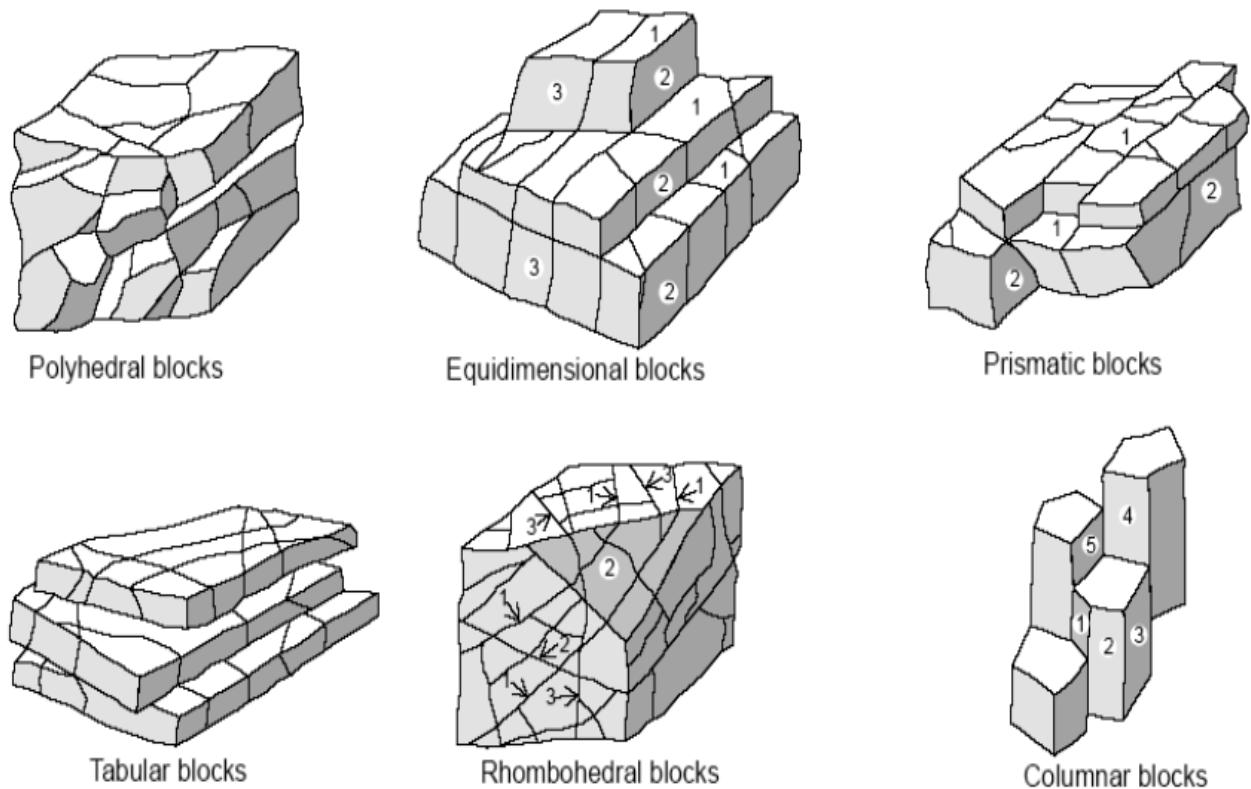
**Figure I.2.** Structure géométrique du massif rocheux de Grès (PK14) d'Ait Yahia Moussa.

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

### I.4.2. Aspect géologique

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

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



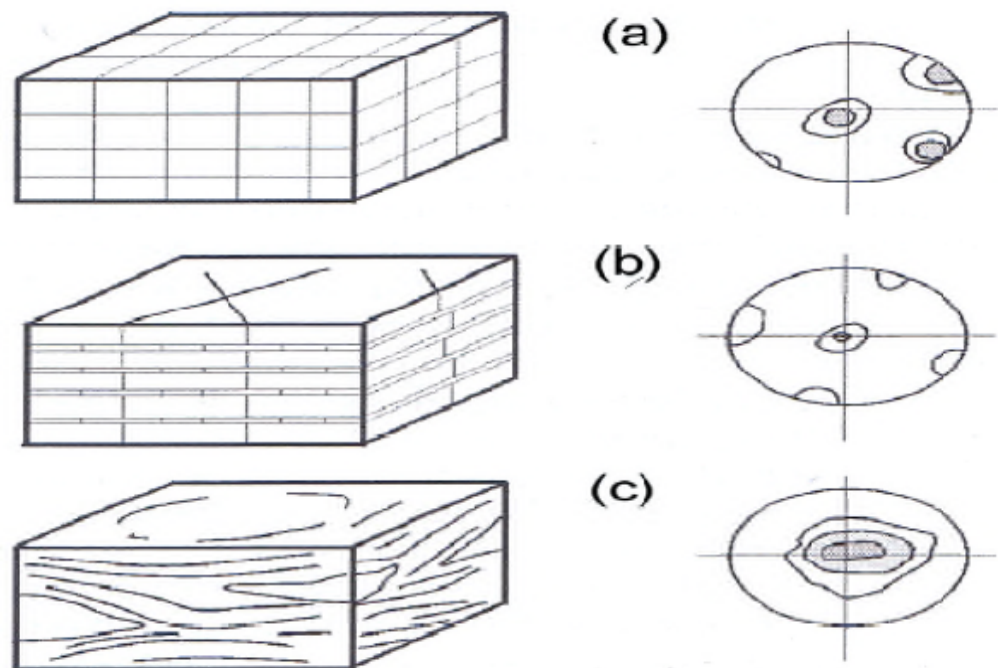
**Figure I.3.** Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés [3].

Le Manuel de Mécanique de Roche (CFMR-MMR [2000]) vient appuyer dans ce sens la définition des divers types déjà cités ci-dessous. Parmi plusieurs variantes plus complexes mais moins significatives, trois modèles géométriques principaux sont illustrés dans (figure I.4) [3]. Certains granites ou calcaire massifs formés de blocs parallélépipédiques (Figure I.4- a), révèlent la présence de trois familles de fractures trirectangle pour lesquelles tous les plans de discontinuités sont continus.

Toutefois, il faut noter que cette forme géométrique est très idéalisée. Des solutions analytiques existent déjà pour le calcul des propriétés mécaniques de tels massifs dont certaines seront présentées dans le chapitre suivant.

Le schéma de la Figure I.4-b représente un massif sédimentaire dont l'une des directions prend davantage d'importance et les diaclases perpendiculaires sont moins continues. Cette définition peut correspondre à des calcaires à bancs minces, des alternances de marnes et de calcaires, de grès et de marnes des formations appelées flyschs ou des roches schisteuses. Les observations montrent que l'espacement entre les bandes est souvent équivalent à la taille des diaclases ou à sa moitié. Ces types de massifs sont très courants mais non accessibles à des traitements analytiques simples ; le recours à des méthodes d'homogénéisation numériques nous semble très pertinent. La structure de ces massifs est définie géométriquement par un nombre limité de paramètres que nous précisons dans le paragraphe suivant.

Souvent situées dans des zones tectoniques, les roches écrasées comme les schistes et les brèches de faille présentent une direction d'anisotropie largement dispersée. Dans un tel type de massif (Figure 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. [15]

### 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 [4]. 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. [5]

#### I.4.3.2. Les familles des discontinuités

On distingue généralement:

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



**Figure I.5.** Les joints stratigraphiques, dolomies Liasiques – Oman- [5].

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



**Figure I.6.** Réseau de diaclases dans un banc de grés (Eaglehawk Neck, Tasmania). [6]

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



**Figure I.7.** Plan de faille mettant en contact les micaschistes et les marbres de la région d'étude.

- e. **les plis**: les plis sont le résultat de la flexion d'une strate rocheuse sous l'effet d'une force tectonique ou d'un mouvement. Les plis ne sont généralement pas considérés comme éléments du massif rocheux. Ils sont souvent associés à un haut degré de fracturation et à des roches relativement faibles et tendres. [5]



**Figure I.8.** Micro plissement au niveau des micaschistes de la région d'étude.

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



Figure I.9. Schistosité au niveau des micaschistes du massif rocheux d'Ighil N'Touila [6].

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. [4]

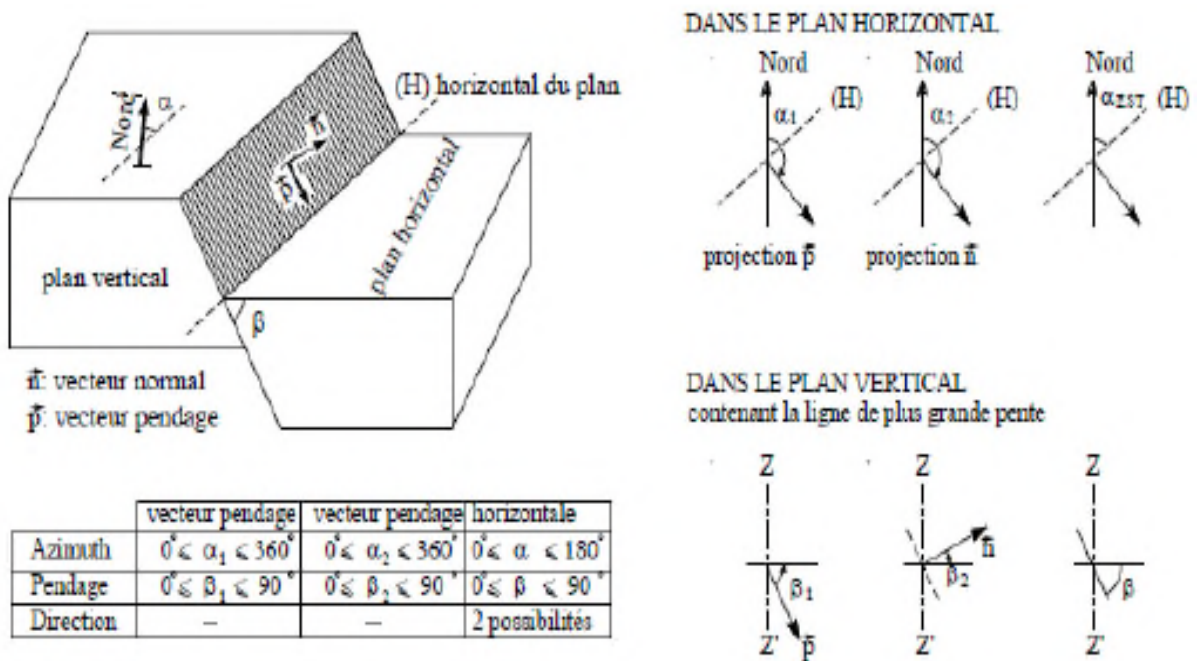


Figure I.10. Mesures de l'orientation du plan de discontinuité, différents types de repérage. [3]

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 [4].

En tout point l'orientation d'un plan dans l'espace est définie par deux angles, respectivement par rapport au nord géographique et à la verticale, mesuré avec une boussole et un clinomètre.



Figure I.11. Mesures de l'orientation du plan de discontinuité (Marbre d'Ait Yahia Moussa).

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

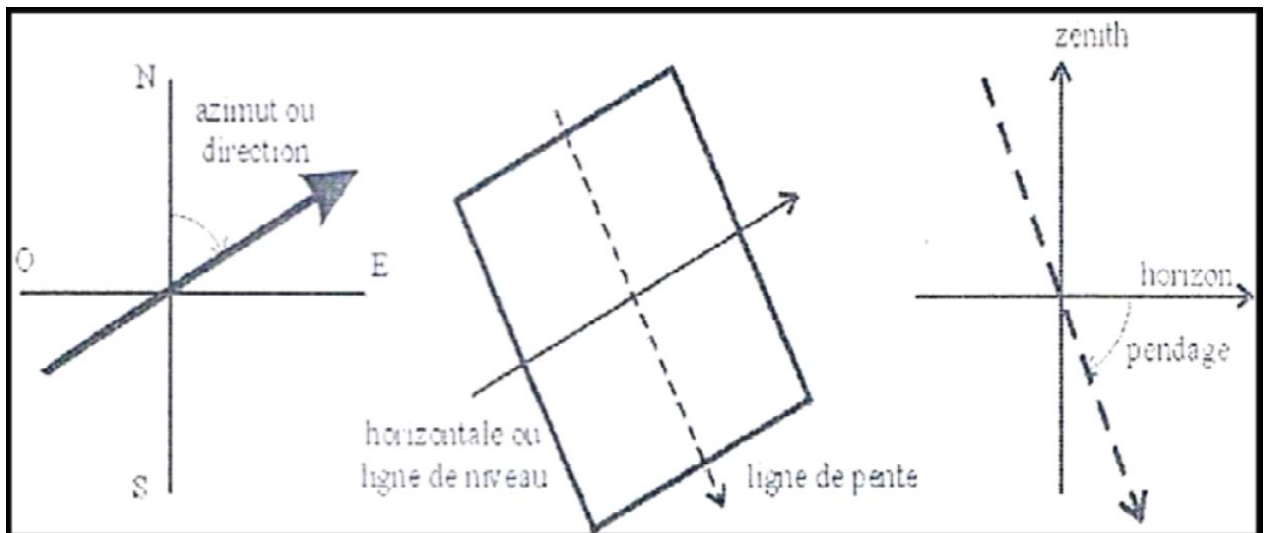


Figure I.12. Orientation d'une direction de plan dans l'espace, au centre en perspective cavalière, par la direction(ou azimut) de ses lignes de niveau (vue en plan, à gauche), et le pendage de ses lignes de pente (en coupe, à droite). [8]

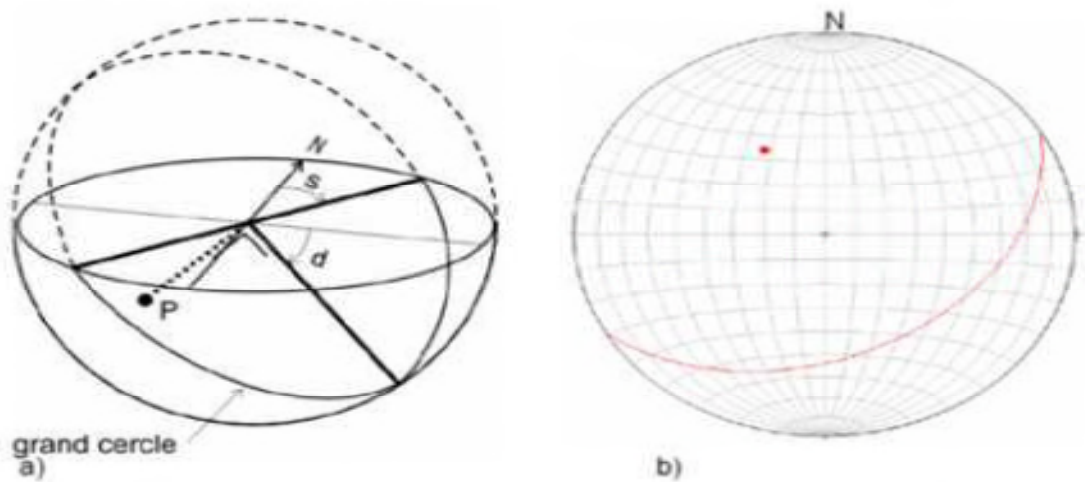
La projection stéréographique des discontinuités permet de faire un classement des discontinuités en familles directionnelles. La représentation des plans se fait habituellement en utilisant les diagrammes polaires.

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

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



- 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 (trace d'un plan et sa polaire).

Figure I.13. Représentation stéréographique. [9]

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

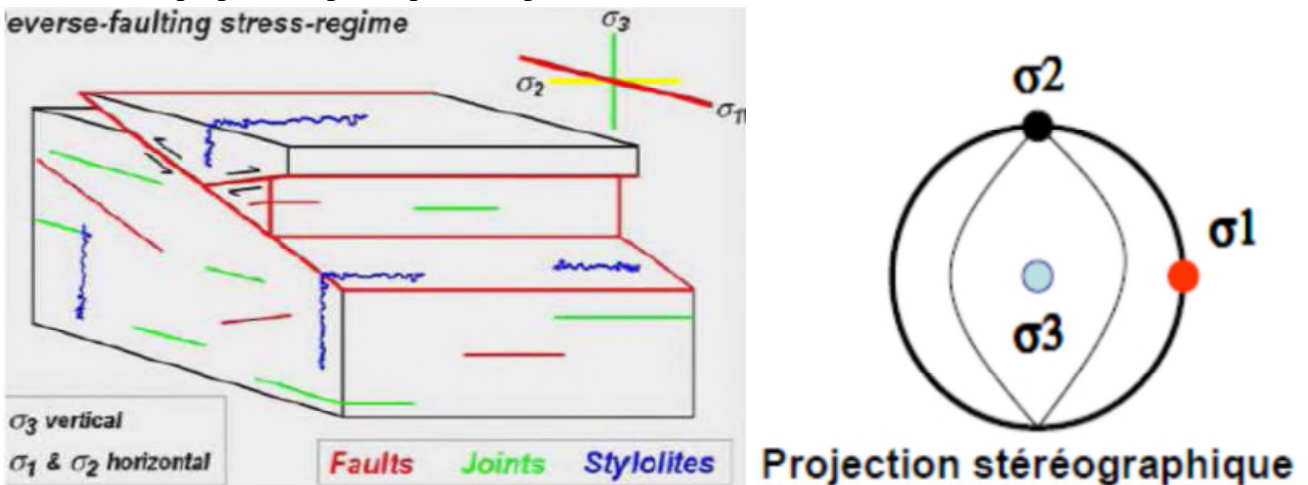


Figure I.14. Projection stéréographique d'une faille inverse. [10]

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. [10]

**b. Extension :** L'extension caractérise la dimension de la discontinuité dans l'espace. Ce paramètre est difficile à évaluer car sur le terrain on n'observe pas la totalité de la discontinuité mais uniquement sa trace sur un parement. [4]

L'extension peut être estimée à partir de la distribution de la longueur de trace de la discontinuité. La distribution de la longueur de trace peut suivre une loi exponentielle ou log-normale.

**c. Espacement et densité :** L'espacement représente la distance moyenne séparant deux discontinuités d'une même famille. La densité définit le nombre de discontinuités, d'une même famille, par unité de volume ou de surface ou de longueur.

Ces paramètres sont liés souvent, la densité est estimée à partir de l'espacement puisque ce dernier est facile à mesurer en pratique.

Ces paramètres sont essentiels car ils donnent une idée de la fracturation moyenne du massif. La distribution de l'espacement est souvent exponentielle. [4]

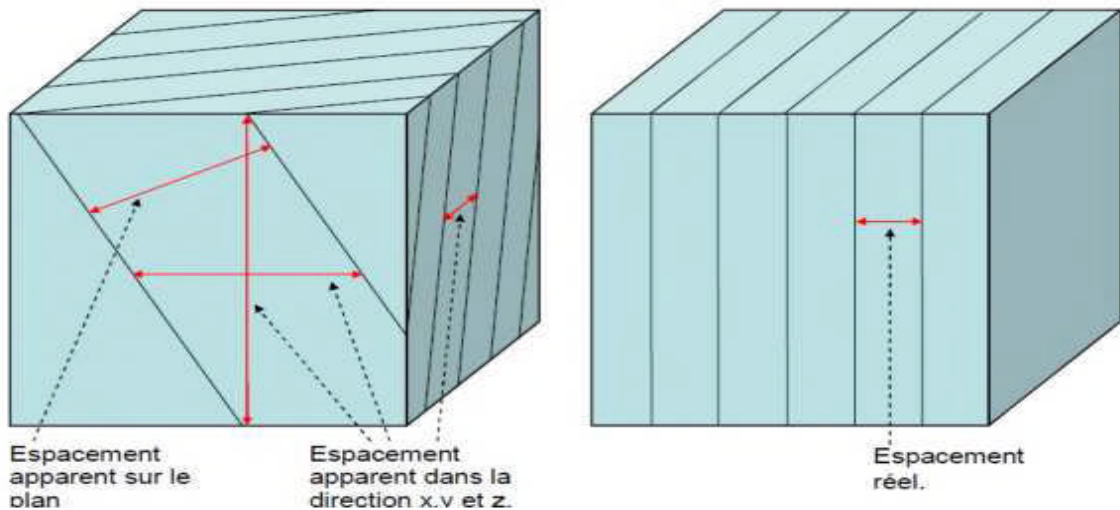


Figure I.15. Mesure de l'espacement. [11]

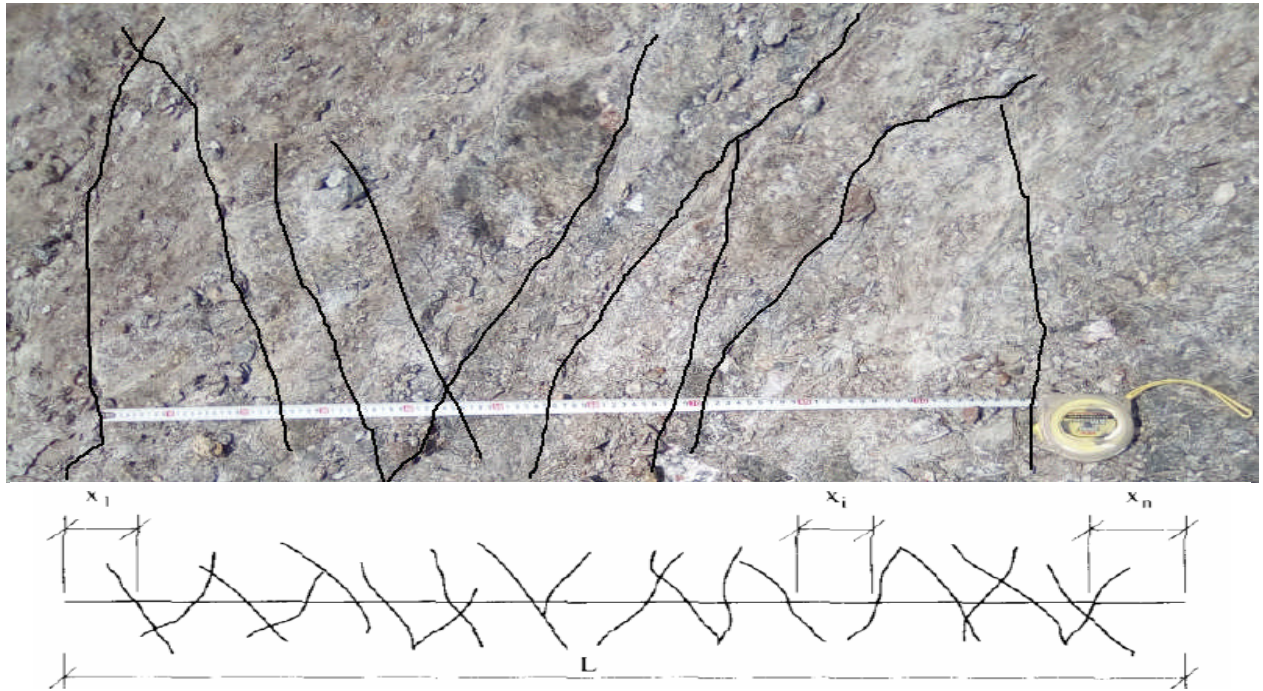
On décrit l'espacement selon les mesures des discontinuités :

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

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

**d. La fréquence des discontinuités ( $\lambda$ )** : 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. [12]



**Figure I.16.** Mesure de la fréquence des discontinuités.

**e. Degré de fracturation**: lorsque des forages carottés sont disponibles, cette qualité est désignée par RQD (Rock Quality Désignation) (Deere, 1988). Cet indice est égal au rapport de la somme des longueurs des éléments de carottes du forage dont la longueur est au moins égale à 10 cm à la longueur totale de la passe carottée.



**Figure I.17.** Une caisse des carottes de calcaire d'Ait Yahia Moussa.

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 [12], 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.

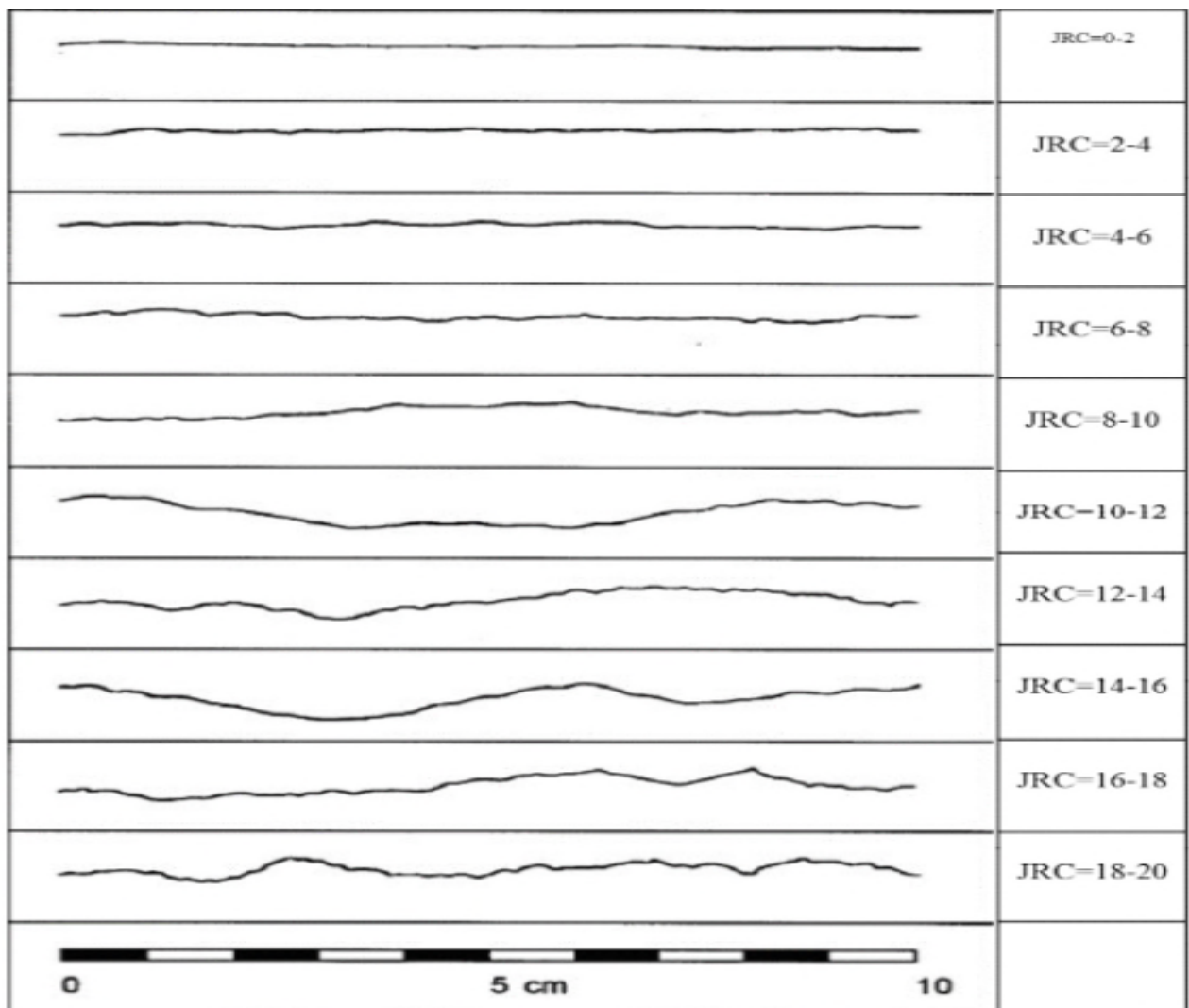
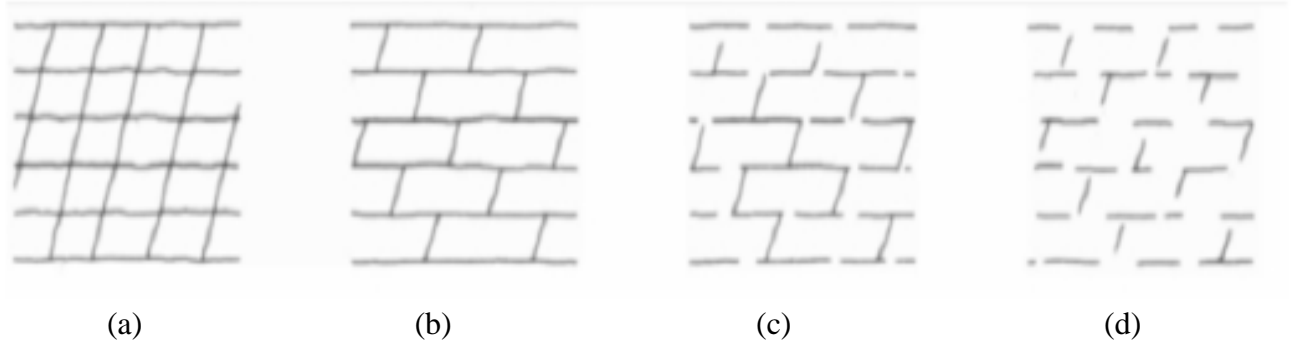


Figure I.18. Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC). [12]

**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 [11].



**Figure I.19.** Persistence de différents ensembles de fractures [11].

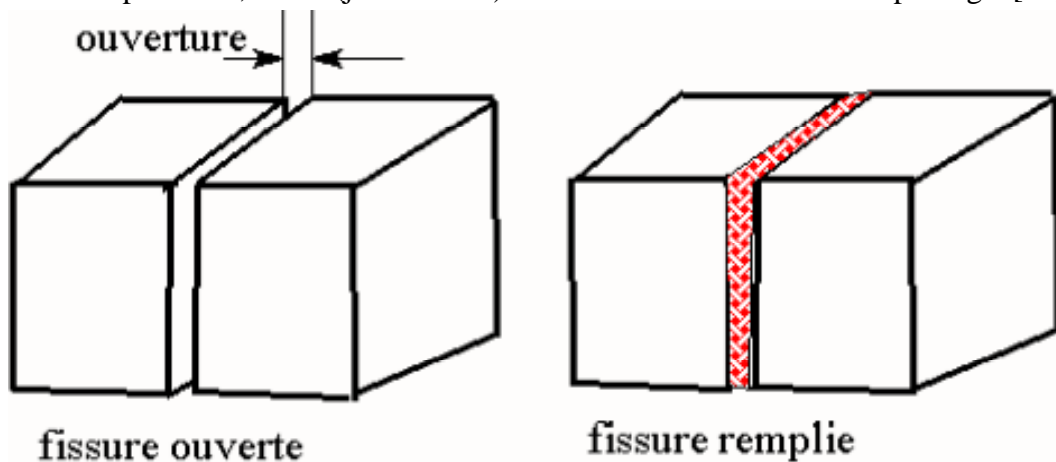
- (a): Deux ensembles de diaclases persistants avec persistance élevée ;
- (b): Un ensemble de diaclases avec persistance élevée + un ensemble de diaclases discontinues avec persistance moyenne ;
- (c) : Deux ensembles de diaclases discontinus avec persistance moyenne ;
- (d) : Deux ensembles de diaclases discontinus avec faible persistance.

On classe les persistance des discontinuités selon la longueur de leurs traces :

**Tableau I.3.** Classification des discontinuités selon leur extension. [11]

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. [11]



**Figure I.20.** Fissure ouverte et remplie. [14]

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

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

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

**Tableau I.4.** Classification d'ouverture des discontinuités. [11]

Ouverture	Description
<0,1 millimètre	Très étroite
0,1-0,25 millimètre	Etroite
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 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 buts des systèmes de classification des massifs rocheux

La classification géomécaniques consiste à quantifier un massif rocheux par une note empirique décrivant sa qualité par une série de termes allant d'un très bon rocher à un rocher très médiocre. Les buts principaux de ces classifications se résument comme suit :

- Estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d'un massif fracturé, en particulier son module de déformation, sa résistance à la compression simple, sa cohésion et son angle de frottement interne.
- Estimer le temps Durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement (stand-up time). C'est un indice très essentiel dans la détermination de la portée d'excavation.
- Donner des recommandations de soutènement des ouvrages. [3]

#### II.3. 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 II.1 énumère ceux-ci, ainsi que les systèmes plus anciens.

**Tableau II.1.** Systèmes de classification du massif rocheux [17] ; [18].

Système de	Référence	Pays	Applications
Rock Loads	Terzaghi, 1946	É. -U.A	Tunnels avec support en acier
Stand-up time	Lauffer, 1958w	Autriche	Tunnels

New Austrian tunnelling method	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 les plus utilisés sont :

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

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

### II.3.1. Système du RQD (Rock Quality Designation)

Le Rock Quality Designation (RQD) a été développé par Deere et al. (1967) afin de donner une estimation quantitative de la fracturation influence le comportement de la masse rocheuse à partir de l'examen de carottes obtenues par les forages. [19]

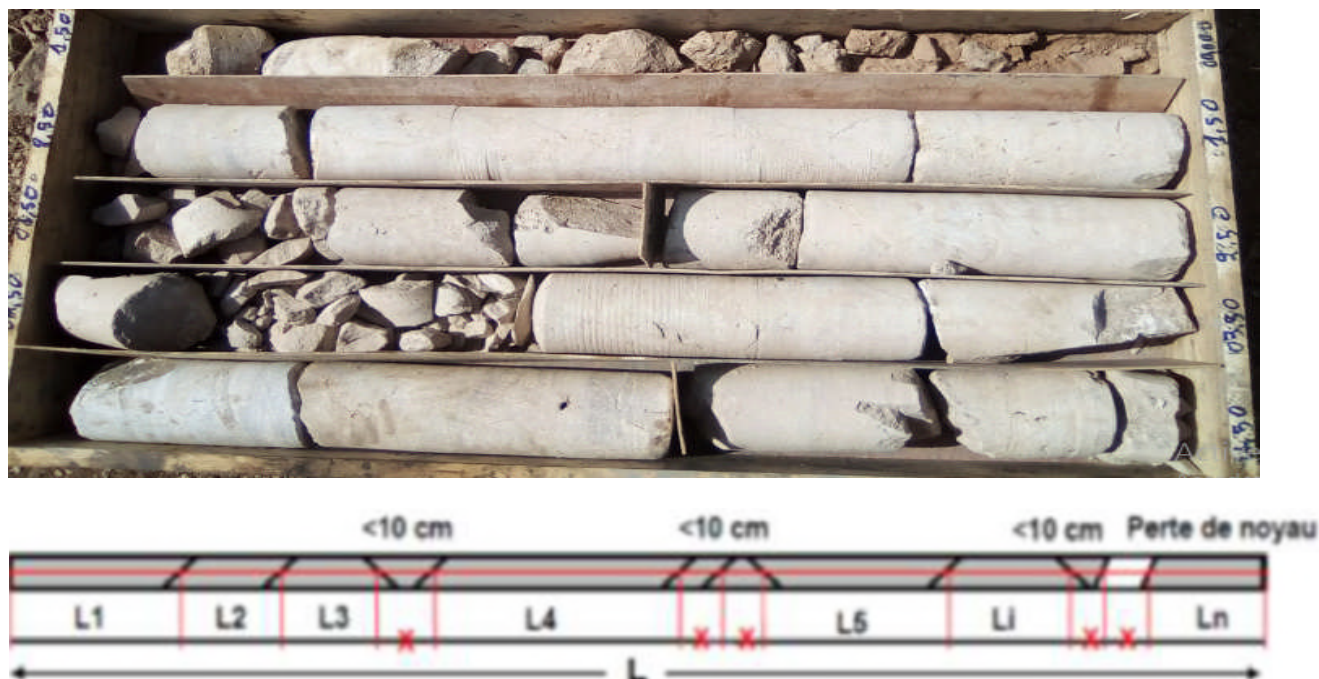


Figure II.1. Les carottes de calcaire d'Ait Yahia Moussa.

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

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

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 ;

$$\text{RQD} = 115 - 3.3J_v$$

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. [3]

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.3.1.1.Limites du système RQD

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

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

### II.3.2. Système RMR (Rock Mass Rating)

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

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

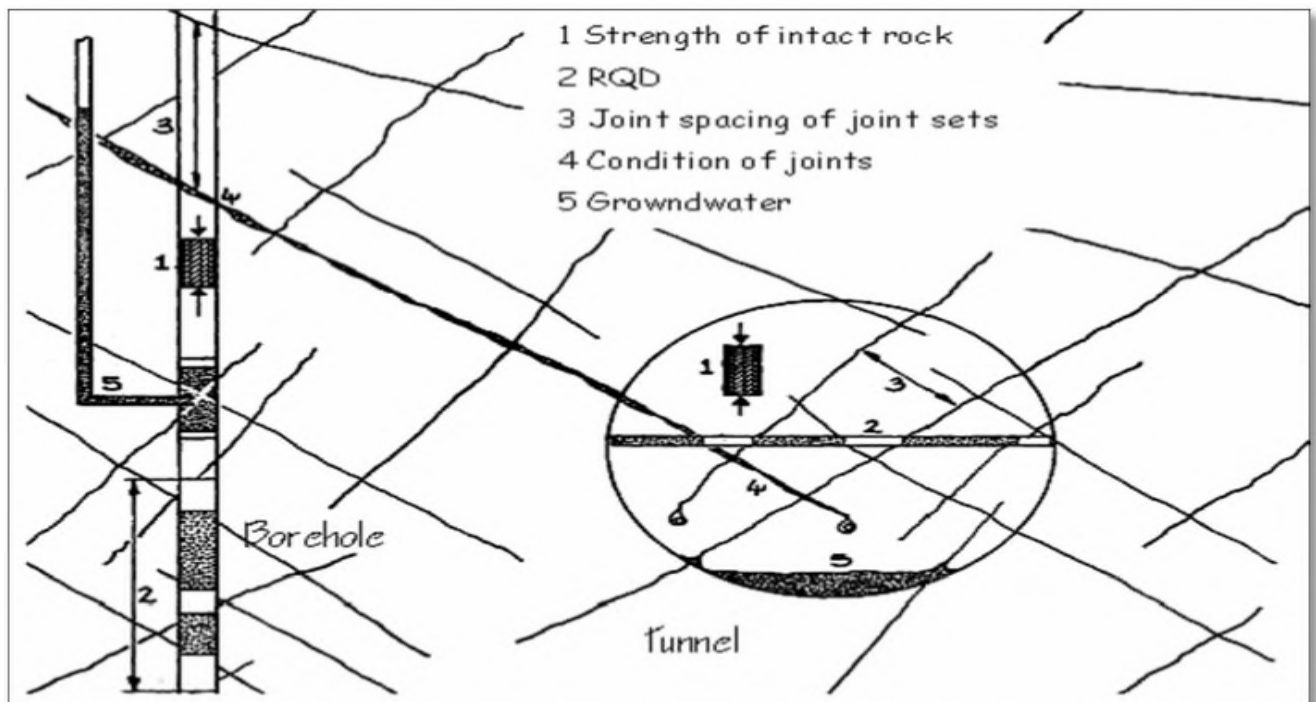


Figure II.2. Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR. [3]

La somme de ces notes attribue une valeur comprise entre 0 et 100 au massif. Cette valeur utilise à plus de 70% la fracturation et elle accorde 15% d'influence aux propriétés de la matrice rocheuse et 15% à la présence d'eau [2]. La signification des indices du RMR sont définis comme suit:

- A1 (Strength of intact rock material) : la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse est obtenue, soit par procédure d'écrasement d'un échantillon, soit par procédure de chargement ponctuel (note: de 0 à 15).
- A2 (Rock Quality Designation RQD, Deer [1964]): il caractérise la qualité des carottes de sondage en calculant le rapport entre la longueur cumulée des carottes supérieures à dix centimètres et la longueur totale considérée (note : de 3 à 20).
- A3 (Spacing of discontinuities) : dans le cas de plusieurs familles de fractures le minimum des notes attribuées à l'espacement des fractures est considéré (note : de 5 à 20).
- A4 (Conditions of discontinuities) : cet indice caractérise l'extension, l'ouverture, la rugosité, le matériau de remplissage et l'altération des épontes des discontinuités (note : de 0 à 30).
- A5 (Groundwater conditions) : Il est en rapport avec les conditions hydrogéologiques et consiste à réaliser des mesures de flux d'eau ou de pressions interstitielles des joints (note : de 0 à 15).
- B (Adjustement for joint orientation) : c'est un facteur correctif qui est en rapport avec l'effet de l'azimut et du pendage des familles de discontinuités sur la stabilité de l'ouvrage (note : de -12 à 12 pour les tunnels, de -25 à 0 pour les fondations et de -60 à 0 pour les talus).

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

$$\text{RMR89} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5$$

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

- 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.

$$\text{RMR76} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6$$

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 (1989).

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 Altérées	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		
	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.3.2.1. Estimation des caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR**

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

**a) la cohésion:**

$C_{\text{éq}} \text{ (kPa)} \approx 5 \text{ RMR}$  (Beniawski, 1979, cité par Beniawski, 1989)

**b) l'angle de frottement:**

$\phi_{\text{éq}} (\text{°}) \approx 0,5 \text{ RMR} + 8,3 \pm 7,2$  (Trunck et Hönish, 1989, cité par Beniawski, 1989)

**c) le module de young:**

$E_{\text{éq}} \text{ (GPa)} \approx 10 \frac{(\text{RMR}-10)}{40}$  (Serafim & Pereira, 1983, cité par Beniawski, 1989)

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

**Tableau II.5.** Relations entre RMRsec et la résistance à la compression simple d'après Stille et al. (1982).

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

### II.3.2.2. Limitations du système RMR

Étant donné que le système de classification RMR est initialement développé pour le domaine civil. Dans le domaine minier voici quelques limitations pertinentes où l'ingénieur doit questionner la validité lors de l'évaluation d'un massif rocheux:

- le paramètre de l'orientation des discontinuités  $A_6$  est ignoré. Le système conservé redevient le RMR de base. Cette correction est apportée principalement pour ignorer les conditions environnementales résultant en une classification dépendante du massif rocheux uniquement;
- Les contraintes sont ignorées comme paramètre du système RMR. Bieniawski, 1989 estime le système RMR adéquat pour un projet civil jusqu'à une contrainte verticale de 25 MPa. Souvent dans le domaine minier, les mines souterraines exploitent à des niveaux de contraintes supérieurs;
- Cette classification ne prend pas en considération l'état de contrainte in-situ ni la rugosité des fractures et l'angle de frottement du matériau de remplissage ; les roches gonflantes n'y sont pas non plus traitées.
- L'application de cette classification est limitée aux cas de massifs dont la matrice a une bonne résistance et dont le comportement est régi par les discontinuités.

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

### II.3.3. Système Q

Développée par le Norwegian Geotechnical Institute (NGI), cette classification a été établie pour prévoir le soutènement des excavations exécutées dans des terrains à contrainte horizontale élevée (Barton et al. [1974]). Elle est caractérisée par un indice de qualité Q variant entre 0.001 pour un massif très mauvais et 1000 pour un massif très bon. Dans la pratique, cet indice est réduit entre 0.005 et 50. [23]

$$Q = \frac{RQD}{j_n} \cdot \frac{j_r}{j_a} \cdot \frac{j_w}{SRF}$$

- RQD (Rock Quality Designation) caractérise la qualité des carottes de sondage.
- $J_n$  (Joint set number) représente le nombre de familles de discontinuités.
- $J_r$  (Joint roughness number) représente la rugosité des épontes de la famille de discontinuité la plus défavorable en terme d'orientation,
- $J_a$  (Joint alteration number) caractérise l'état d'altération des discontinuités.
- $J_w$  (Joint water reduction) est un facteur de réduction dû à la présence de l'eau dans les joints.
- SRF (Stress Reduction Factor) est un facteur de réduction des contraintes dans le massif.

D'une façon globale, RQD/Jn représente l'effet de la taille des blocs, Jr/Ja caractérise la qualité mécanique de contact entre les blocs en cisaillement et Jw/SRF décrit l'état initial du massif par rapport à l'eau et aux contraintes.

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

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

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

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

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

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

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

### II.3.4. Système du GSI (Geological Strength Index)

Introduit par Hoek et al. [1995] puis amélioré par Hoek et Brown [1997], le Geological Strength Index ne présente pas une classification géomécanique en soi. Cependant, il constitue un lien entre le RMR, Q-système 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' et le Q' qui sont des valeurs modifiées de RMR et de Q. Le RMR' est calculé en retenant une valeur 15 pour le coefficient relatif à l'eau (A5) et une valeur nulle pour le coefficient de correction relatif à l'orientation des discontinuités A6.

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

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 :

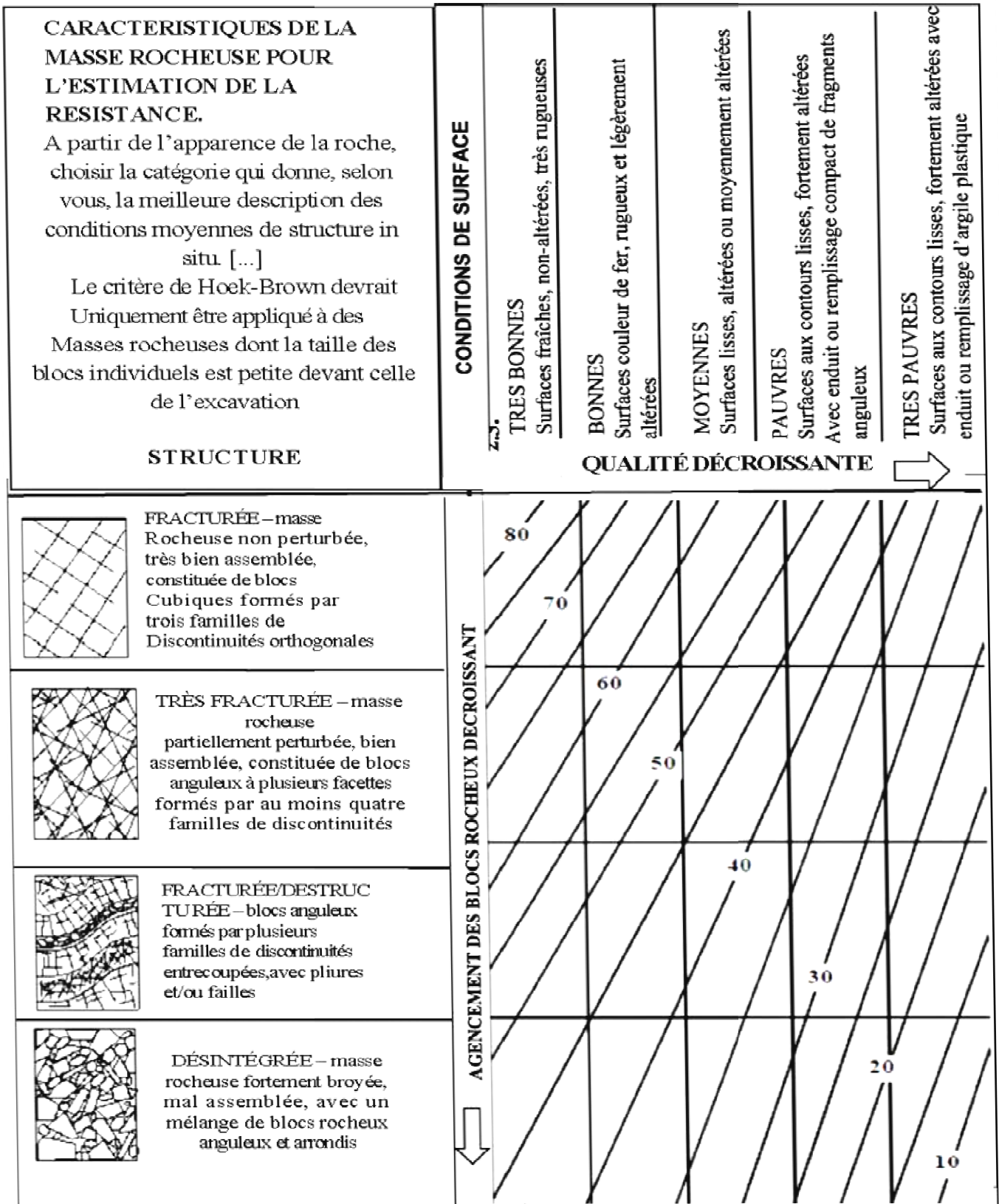
$$\begin{aligned} GSI &= RMR'_{89} - 5 && \text{Si} && RMR'_{89} > 23 \\ GSI &= 9(\log Q' + 44) && \text{Si} && RMR'_{89} \leq 23 \end{aligned}$$

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. [24]

**Tableau II .7.** Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI. [3]

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

Figure II.3. Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse (Hoek et Brown, 1995)



### II.3.5. 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. [28]

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

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

- 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.

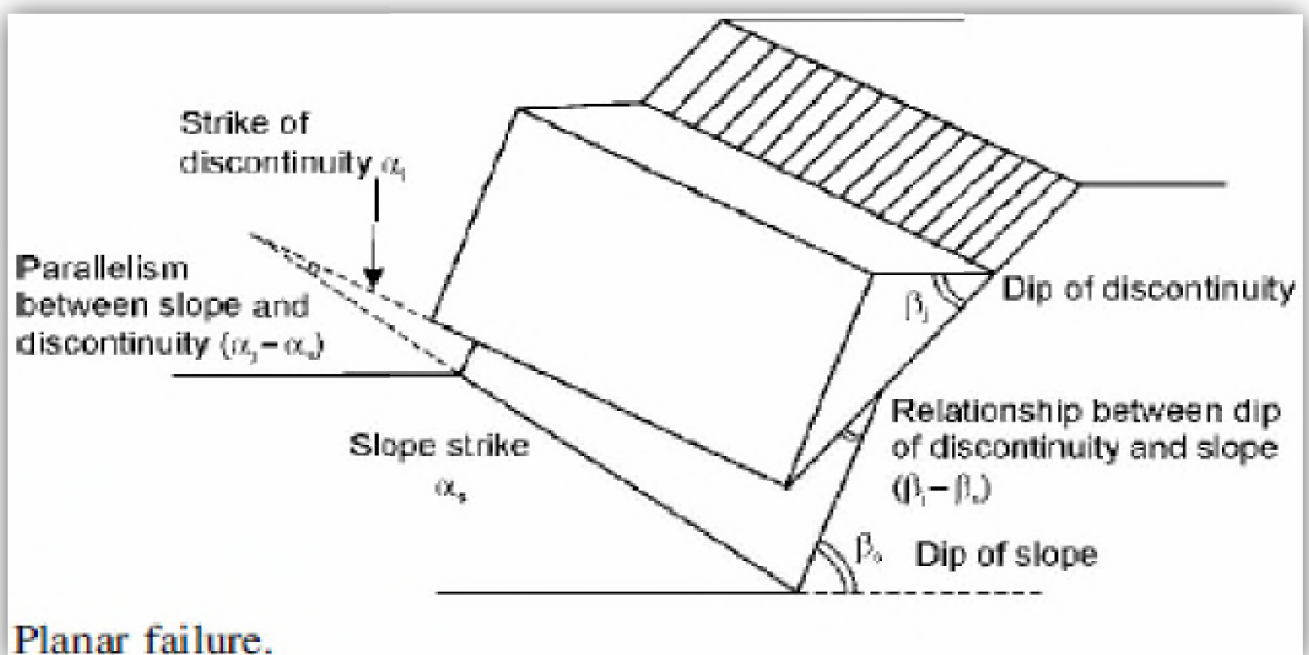


Figure II.4. Orientation d'une pente de type plane. [25]

- 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;
  - La roche prédécoupée augmente également la stabilité;
  - L'abattage à l'explosif augmente, ne change pas ou diminue la stabilité du talus selon qu'il est léger, normal ou déficient (trop d'explosifs par exemple);
  - L'excavation mécanique par arrachage dans les roches très fracturée n'augmente, ni ne diminue la stabilité du talus.

Les valeurs des paramètres figurent dans le tableau II.8:

**Tableau II.8.** Notes des paramètres du SMR (Romana, 1985). [29]

<b>SMR= RMR<sub>de base</sub> + (F1*F2*F3) + F4</b>						
Facteurs d'ajustement liés aux joints (F1, F2, F3).	$\alpha_j$ =Direction du pendage des joints $\beta_j$ =Pendage du joint $\alpha_s$ =Direction du pendage du talus $\beta_s$ =Pendage du talus					
	Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable	
Rupture plane $\alpha_j$ $\alpha_s$ =	$>30^\circ$	$30^\circ-20^\circ$	$20^\circ-10^\circ$	$10^\circ-5^\circ$	$<5^\circ$	
Basculement $ \alpha_j-\alpha_s-180^\circ $ =						
Valeur de F1	0,15	0,4	0,7	0,85	1	
Relation	$F1 = (1 - \sin \alpha_j-\alpha_s )^2$					
$ \beta_j $ =	$<20^\circ$	$20^\circ-30^\circ$	$30^\circ-35^\circ$	$35^\circ-45^\circ$	$>45^\circ$	
La valeur	Rupture plane	0,15	0,4	0,7	0,85	1
	Basculement	1				
Relation	$F2 = \text{tg}^2 \beta_j$					
Rupture plane $\beta_j - \beta_s$ =	$>10^\circ$	$10^\circ-0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ-(-10^\circ)$	$<(-10^\circ)$	
Basculement $\beta_j + \beta_s$ =	$<110^\circ$	$110^\circ-120^\circ$	$>120^\circ$	-	-	
Valeur de F3	0	-6	-25	-50	-60	
Relation	$F3 =$ Ajustement de BIENIAWSKI pour l'orientation des joints, 1976					
F4 : Facteur d'ajustement pour la méthode d'ajustement	$F4$ =Valeur empirique de la méthode d'excavation.					
	Talus naturels	Presplitting	Smooth blasting	Explosif ou mécanique	Déficient blasting	
Valeur de F4	15	10	8	0	-8	

Selon les valeurs SMR, Romana (1985) a défini cinq classes de stabilité. 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 physiquement. [26]

**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 ou grand dièdre	Quelques joints ou beaucoup de dièdre	Quelque 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.10.** 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.
- 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

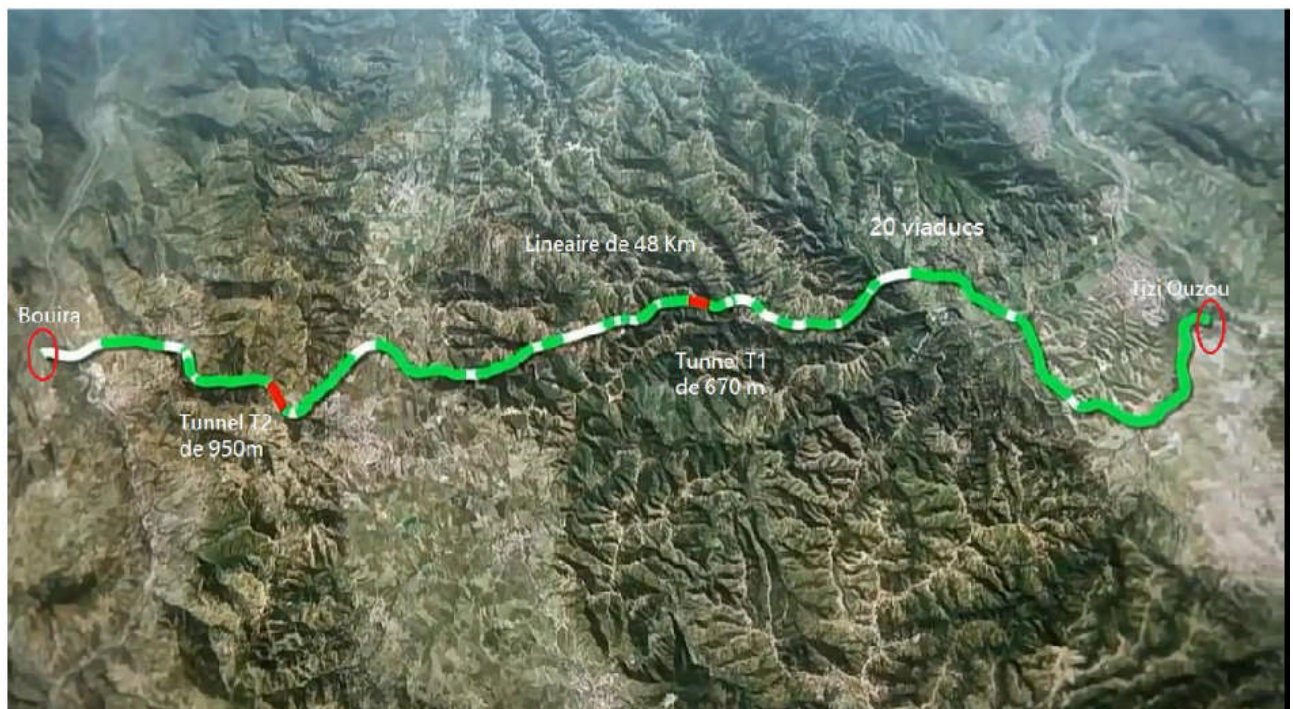
Le vaste chantier de l'autoroute Est-Ouest algérien destiné à améliorer le réseau routier national, ne traverse pas toutes les grandes villes telles que Tizi-Ouzou. Pour pallier à cet isolement, des pénétrantes telle que celle reliant la ville Tizi-Ouzou à celle de l'autoroute Est Ouest ont été planifiées 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. [30]

#### 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 du point kilométrique **Pk 13 au Pk 15** de l'axe de la pénétrante (Figure III.2)



Figure III.2. Localisation de la zone d'étude. [32]

### 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 dans cette région, sont principalement Acif Tleta et Acif Tala Imedrrane.

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 Kabylides. 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 PK13 au PK15.

#### 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).

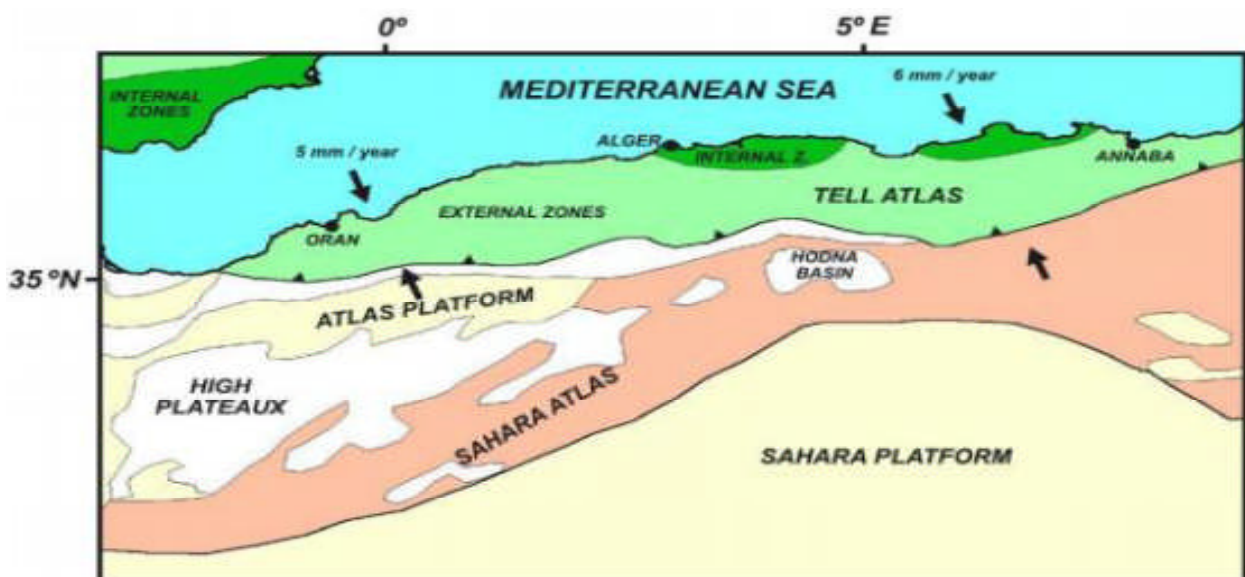


Figure III.3. Carte schématique montrant les domaines géomorphologiques en Algérie. [40]

### 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) [31]. 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 permians, 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). [33]

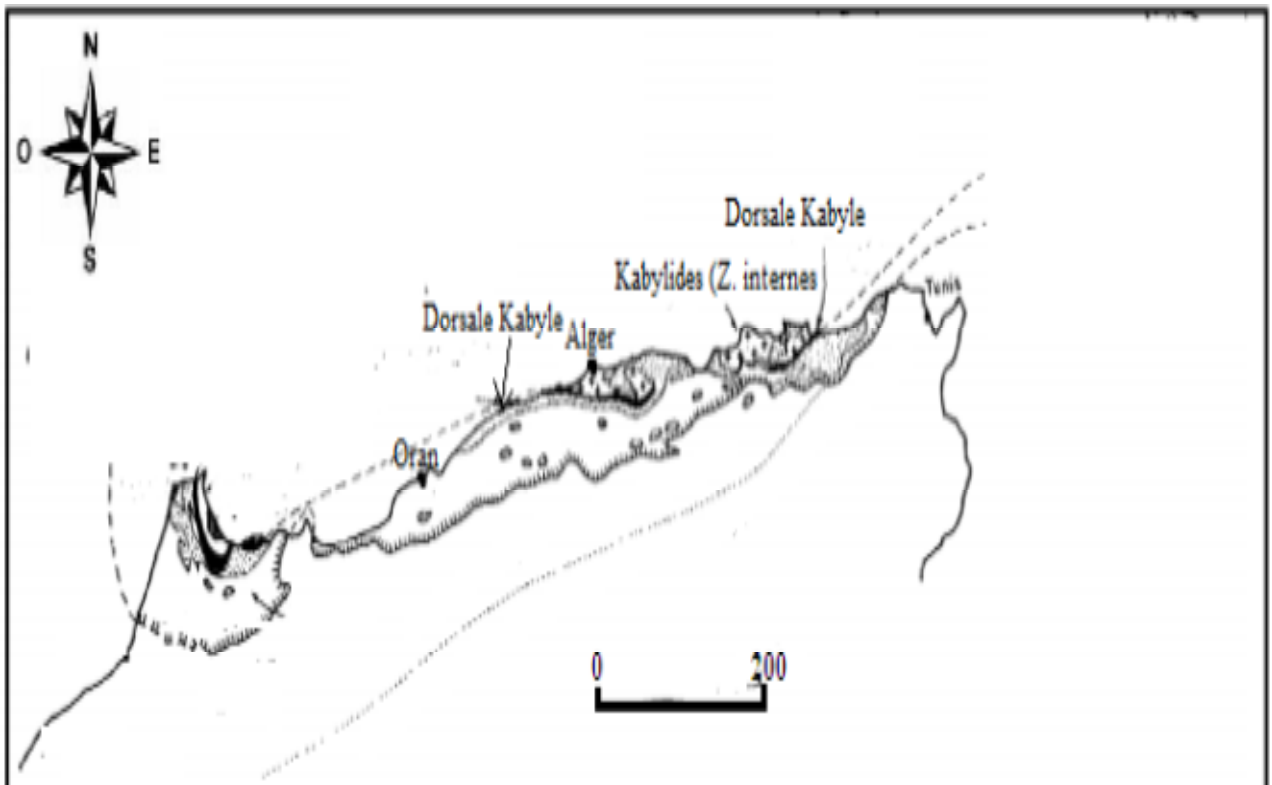


Figure III.4. Orogène alpin périméditerranéen. [33]

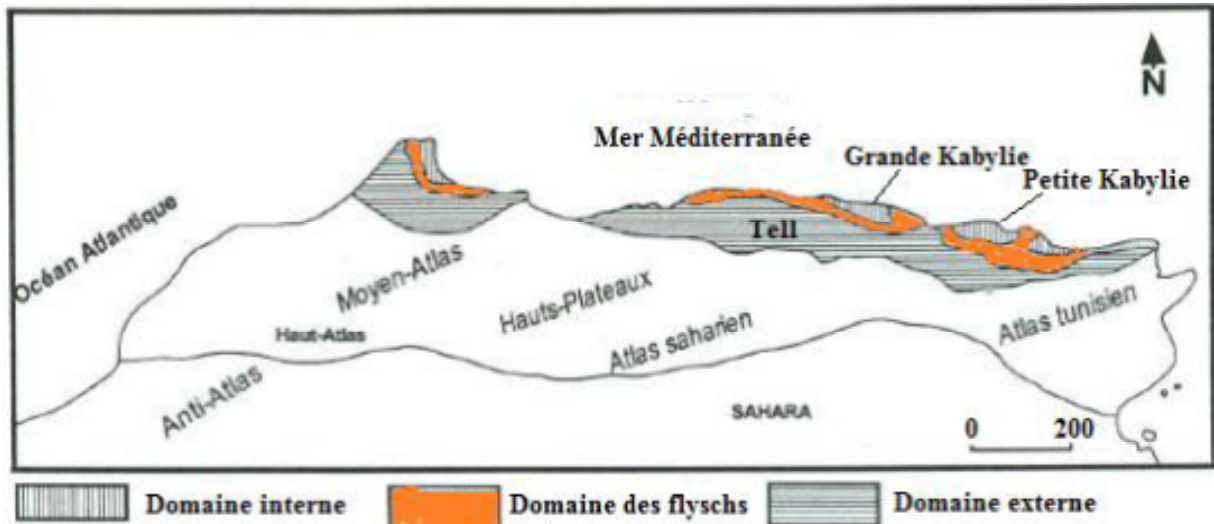


Figure III.5. Schéma structural simplifié des Maghrébides. [34]

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

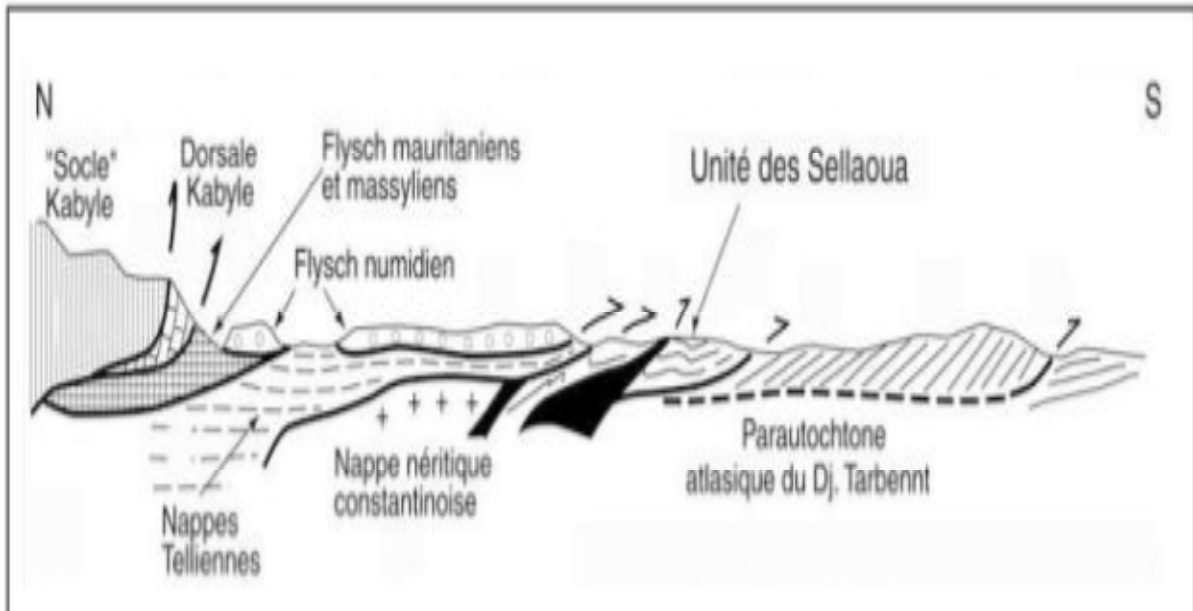


Figure III.6. Coupe générale présentant les chevauchements dans les maghrébides. [35]

**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. [36]. 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.

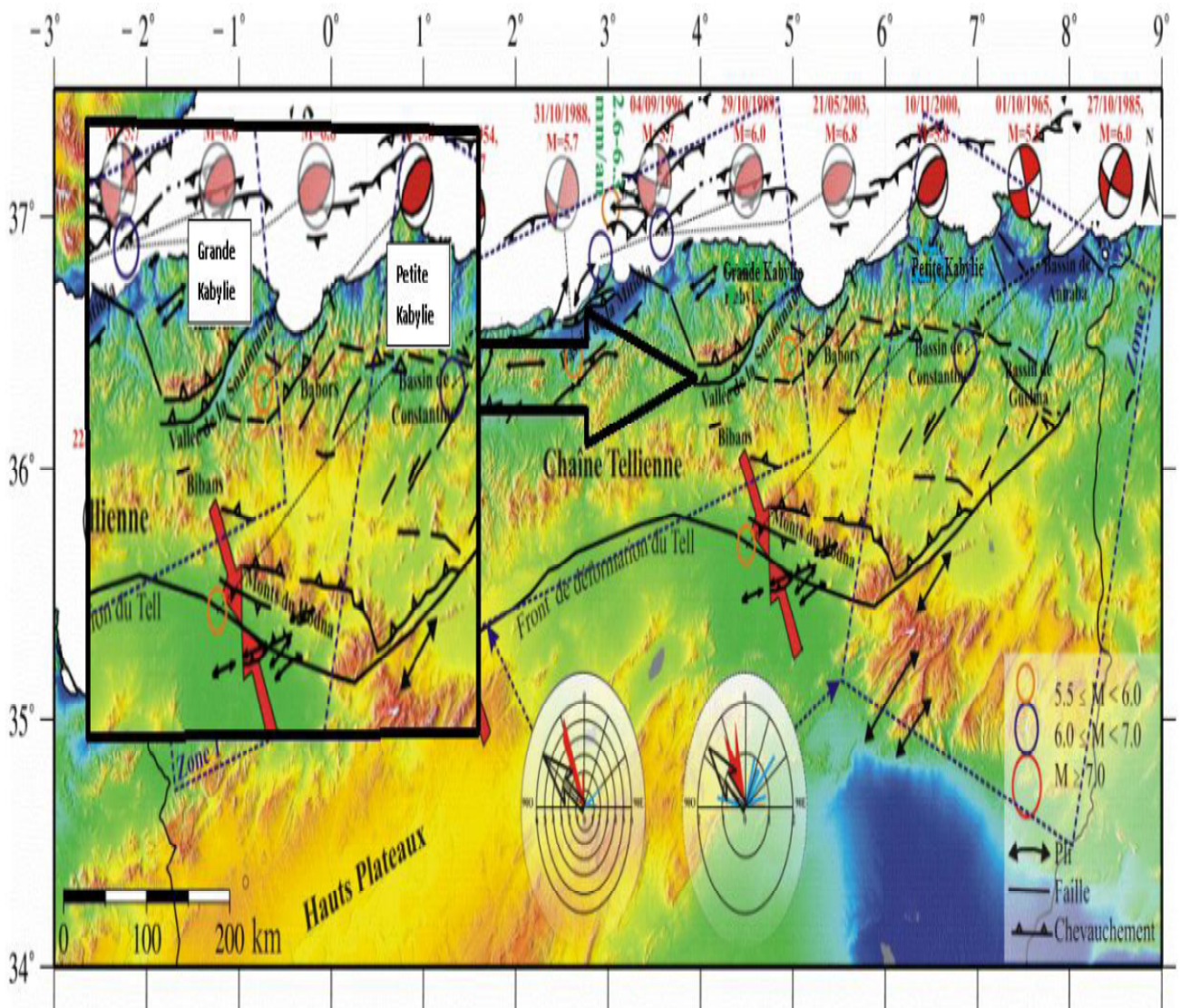
**III.4.1.1.c. Le domaine externe**

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. [36]

**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. [31]



**Figure III.7.** Carte sismo-tectonique du nord de l'Algérie montrant les principales structures actives Observées dans le Tell. [31]

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'analyses 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 linéaire de Kiria s'étend d'Adekar au Dj Zraïb (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 Zraïb. - N 070 : la zone linéaire est composée par la vallée de la soummam, de Sidi Aich à Béjaïa, par ligne de Toudja, crêtes numidiennes encadrant Tifra, alignement des Babors d'Akbou. - Autres directions c'est la direction N140 de l'oued Aïssi elle décale par la bordure du socle Kabyle et pouvait participer aussi au décrochement apparent senestre du massif de Belloua et de Aïssa 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'Aït Yahia Moussa se trouvent dans la chaîne des Maghrébides et plus précisément dans les kabyliques.

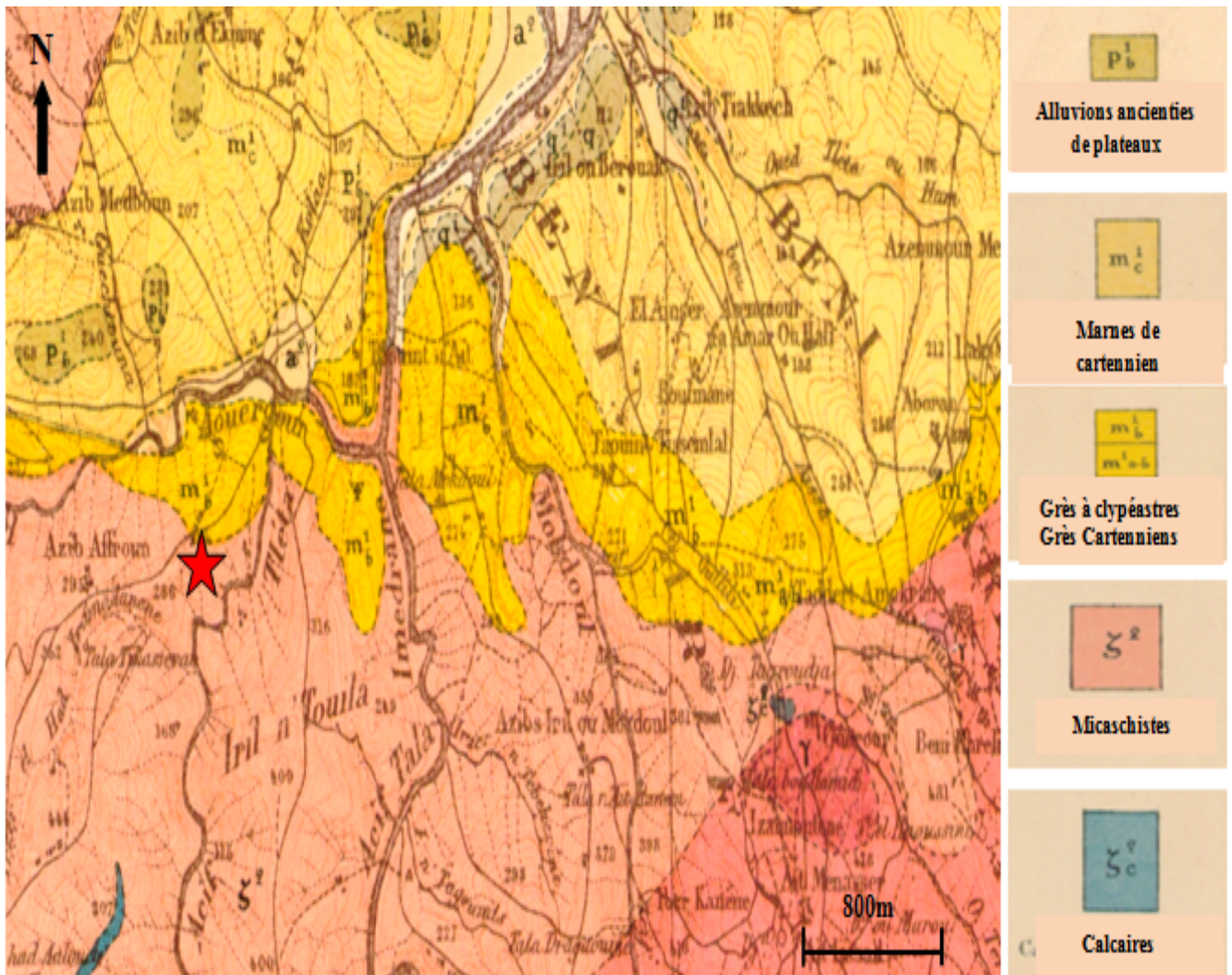
D'après la carte géologique de la région la carte de Dra El Mizan, feuillet N°44 à échelle 1/50 000. Service Géologique de l'Algérie Edition 1906.

Ce tracé du projet traverse trois (03) formations distinctes :

- coté Sud (Dra El Mizane), les sols sont représentés par des grès dits de Dra 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, formées d'un niveau gréseux (grès à clypeâstres) 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 13 au PK 15) notamment la réalisation des fronts de talus du nouveau tronçon autoroutier en question, nous ont permis d'identifier Cinq massifs rocheux distincts (figure III.9)

- 1-Un massif rocheux bâti des conglomérats (PK13)
- 2-Un massif rocheux gréseux(PK14)
- 3-Un massif rocheux bâti de micaschistes (PK15)
- 4-Un massif rocheux bâti par des marbres PK15)
- 5-Un massif rocheux calcaireux(PK15)

Notre investigation sur site nous a permis également d'identifier un contact anormal entre les formations de marbre et de micaschistes. Il s'agit d'une faille normale à vergence Nord voir (Figure I.7).

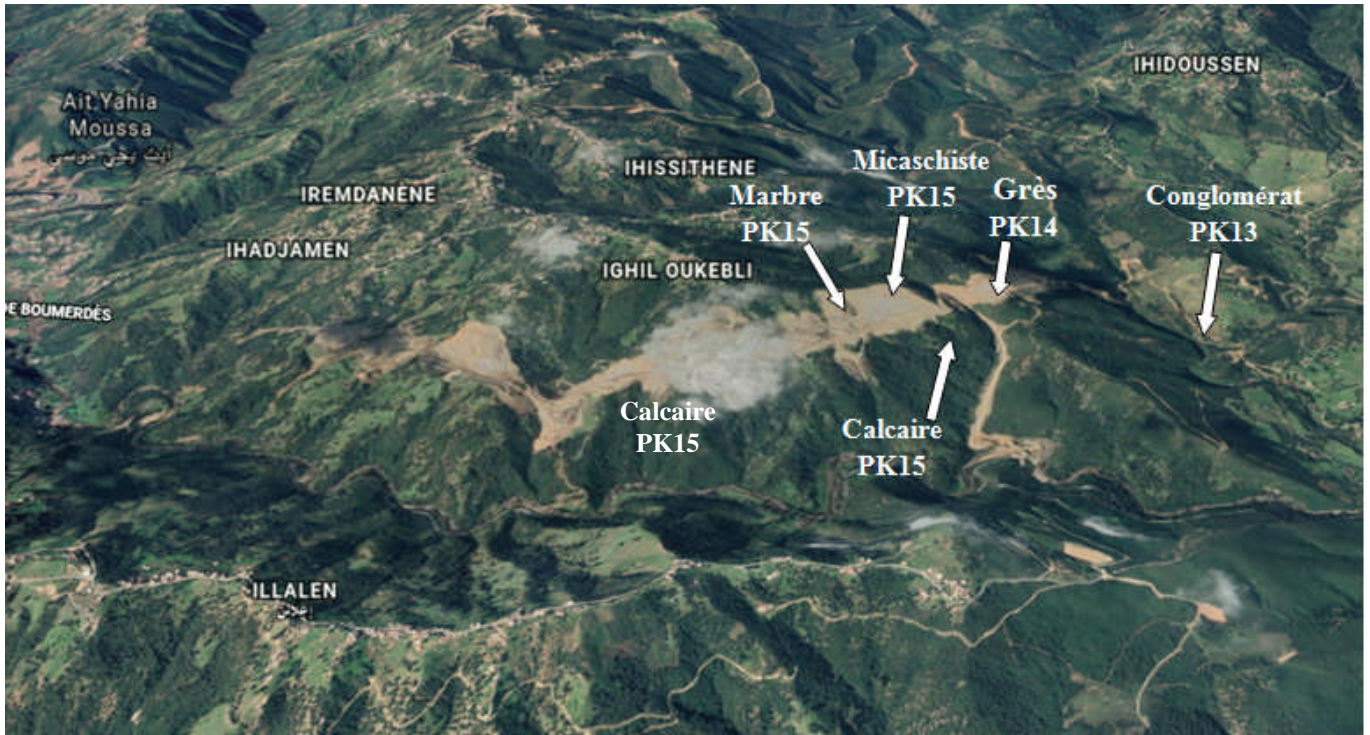


Figure III.9. Situation des différents massifs rocheux étudiés. [32]

### III.4.3. Sismicité

Concernant la sismicité de la région, d'après le RPA 2008, 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.

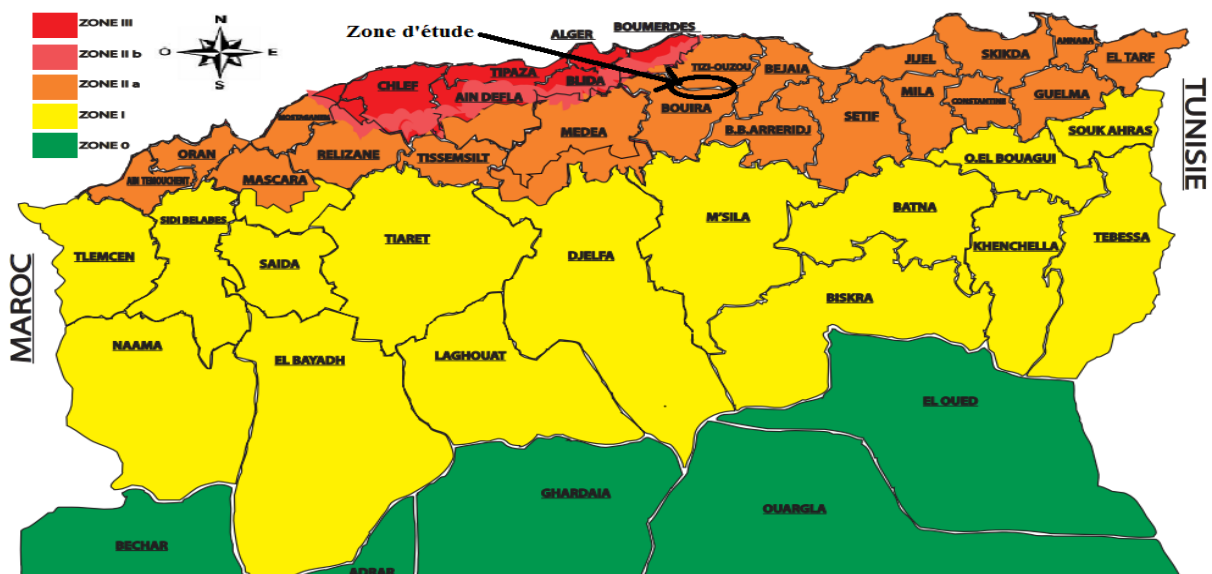


Figure III.10. Carte schématique des zonages sismiques de l'Algérie. [37]

**III.5. Conclusion**

Notre terrain d'étude fait partie d'une zone à moyenne sismicité due à ses structures tectoniques actives, élément à prendre en considération lors de la réalisation de l'étude de ce projet. Les observations que nous avons réalisées sur site, nous ont mené à conclure que le tronçon PK13 au PK15 est très hétérogène, il renferme cinq formations géologiques différentes, de ce fait la classification géomécanique des massifs rocheux du terrain sera propre à chaque formation rencontrée.

**Chapitre IV**  
**Propriétés Physico-Mécaniques**  
**Des Roches**

## Chapitre IV

### Propriétés Physico- mécaniques Des Roches

#### IV.1.Introduction

La caractérisation d'un massif rocheux conduit en premier lieu à déterminer les propriétés physico-mécaniques relatives à la roche intacte du massif et mieux présenter l'aspect minéralogique.

Parmi 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, la résistance à la traction et la résistance au cisaillement.

#### IV.2.La composition minéralogique

##### IV.2.1. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X.

###### IV.2.1.1. Définition

La découverte des rayons X était un évènement très important qui a bouleversé le sens des progressions scientifique, éventuellement dans le domaine de la cristallographie, car la diffraction des rayons X est une technique d'analyse non destructive pour l'identification et la détermination quantitative des différentes formes cristallines présentes dans un solide.

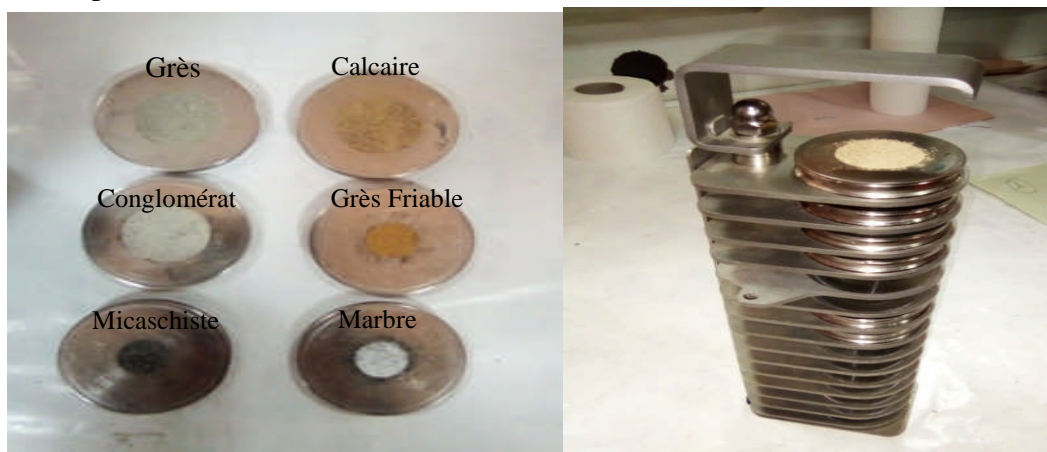


Figure IV.1. Les prises des échantillons.



Figure IV.2. Un diffractomètre.

### IV.2.1.2. Principe de la méthode

La diffraction des rayons X consiste à appliquer un rayonnement de la longueur d'onde des rayons X ( $0.1 < \lambda < 10\text{nm}$ ) sur un échantillon argileux orienté ou non. Le rayonnement pénètre le cristal, il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations dans les toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phases vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté. La condition pour que les radiations soient en phase s'exprime par « **la loi de Bragg** » :

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

Avec :

**d** : La distance des plans réticulaires.

**$\theta$**  : Angle entre le faisceau incident et le réseau de plans.

**n** : L'ordre de la réflexion.

**$\lambda$**  : La longueur d'onde de la source.

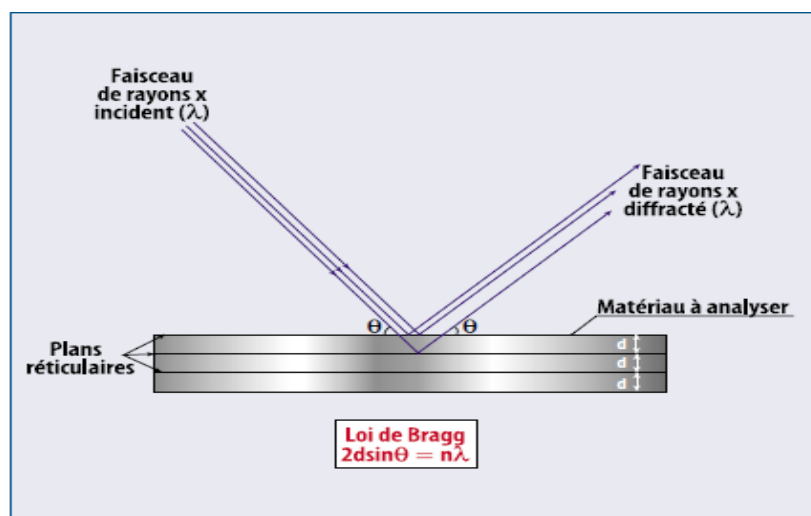
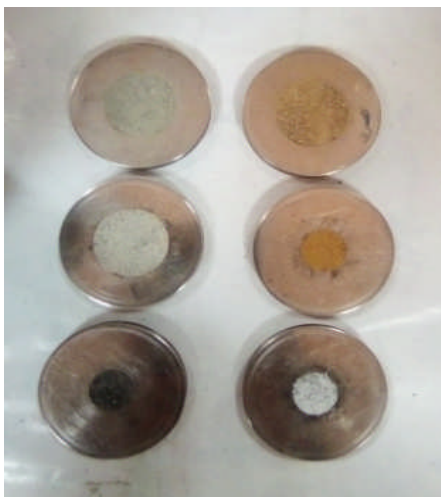


Figure IV.3. Principe de la méthode d'un diffractomètre.

### IV.2.1.3. Technique d'analyse

Dans les cas les plus fréquents dont celui des minéraux argileux, l'échantillon est composé de très fines particules. Les techniques d'investigation aux rayons X les plus favorables sont :

Méthode des poudres



Méthode des agrégats orientés



**IV.2.1.4. Les minéraux**

Ce sont des corps naturels inorganiques, homogènes, généralement solide, cristallisés en parallélépipèdes dont les structures et les symétries cristallines sont : cubiques, quadratiques, orthorhombiques, monocliniques, tricliniques, rhomboédriques, hexagonales et les caractères physico-chimiques : composition, dureté, densité et plan de clivage. Selon sa nature et son gisement, la taille d'un minéral naturel peut être inférieure au millimètre voire micrométrique ou pour certains mais rarement, supérieur au mètre. Selon leur nature et les conditions du milieu : température, pression,... les minéraux se forment par condensation de gaz, solidification de liquide et/ou précipitation de solutions aqueuses.

[MARTIN, P, 2010].

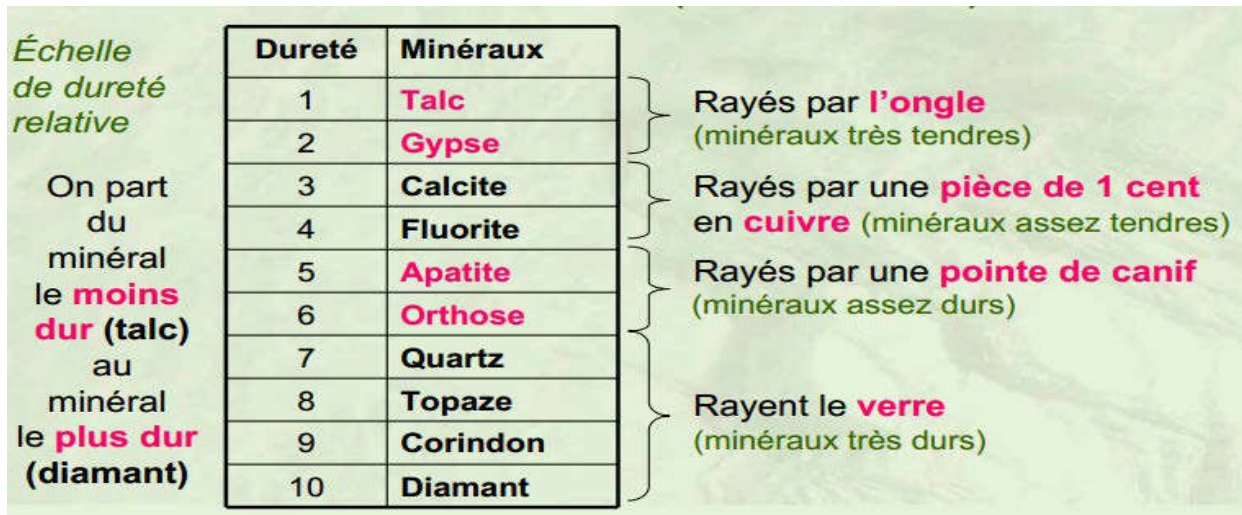


Figure IV.4. Echelle de dureté de MOHS.

**IV.2.1.5. Diagramme normal**

Nous avons réalisé ces essais sur six (06) échantillons représentatifs pour chaque massif rocheux étudié, et ce au niveau du laboratoire des sciences et de génie des matériaux LSGM Université Bab Ezzouar-Alger.

**A- Les résultats du diffractogramme de roche Grès sont présentés sur Figure IV.5 :**

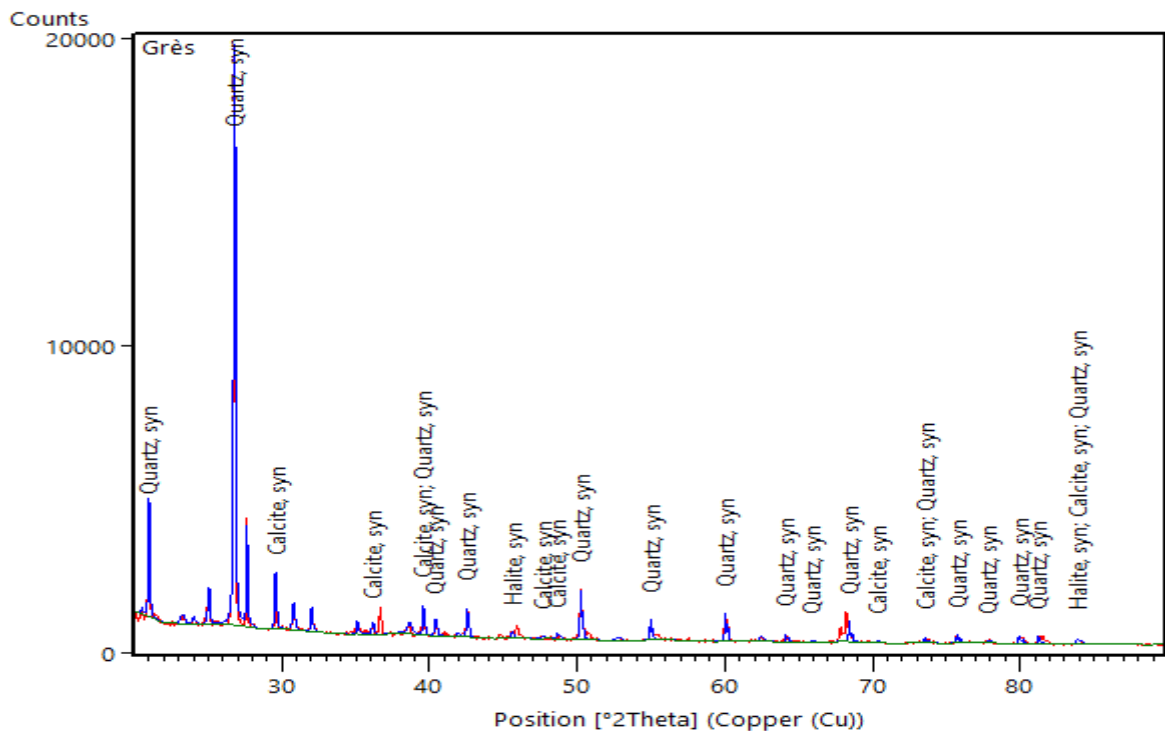


Figure IV.5. Diffractogramme du Grès.

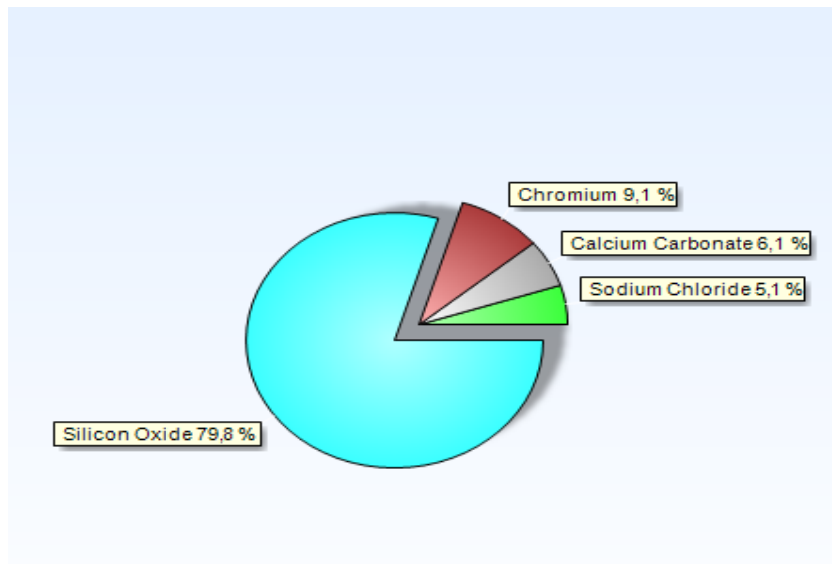


Figure IV.6. Les pourcentages des minéraux du Grès.

➤ **Interprétation des résultats**

L'analyse minéralogique réalisée par diffraction aux rayons X sur le matériau Grès extrait à Ait Yahia Moussa montre que le minéral le plus dominant est le Quartz SiO<sub>2</sub> représenté sur le diagramme par la couleur bleu ciel, la présence de Chrome Cr de couleur marron, Calcite CaCO<sub>3</sub> de couleur grise et Halite NaCl de couleur verte, avec des proportions différentes mais inférieures à celle du quartz affère une dureté assez appréciable pour ces grès.

**B- Les résultats du diffractogramme de roche Grès friable sont présentés sur Figure IV.7:**

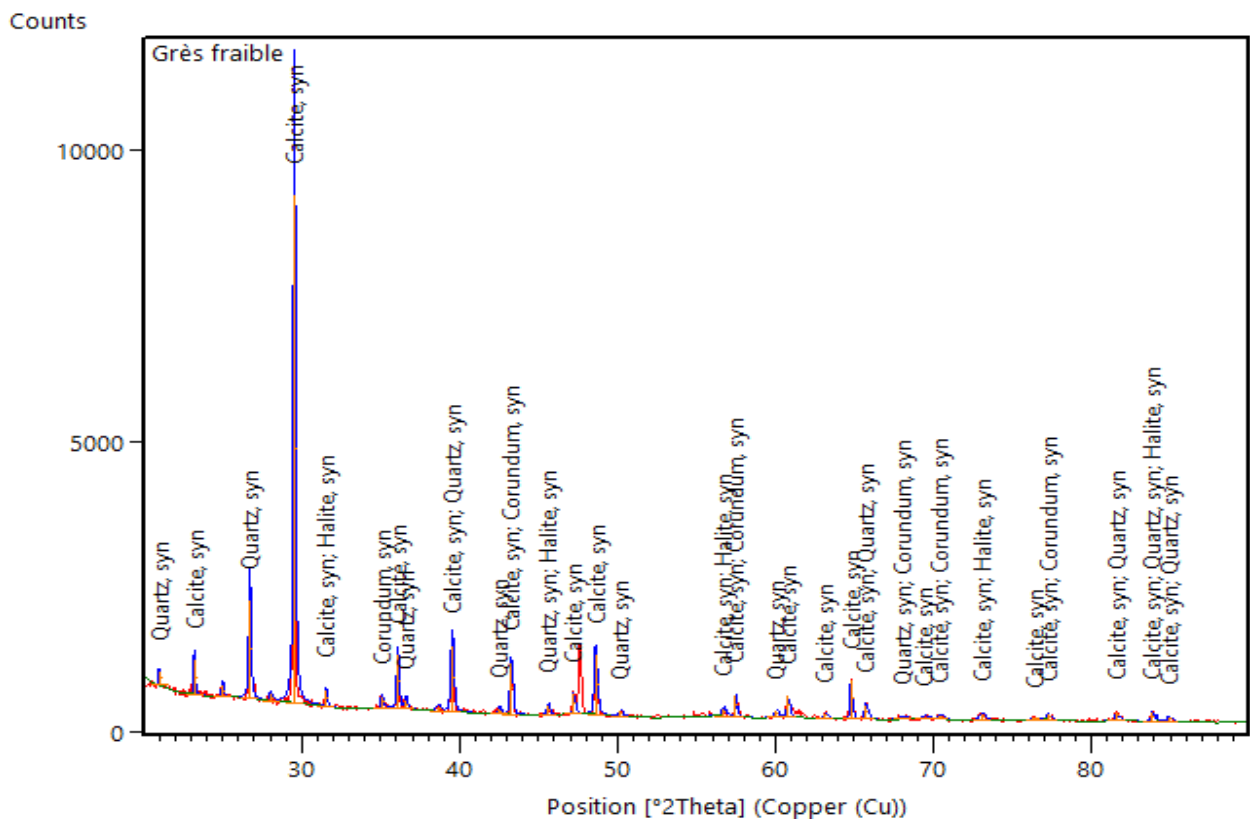


Figure IV.7. Diffractogramme du Grès friable.

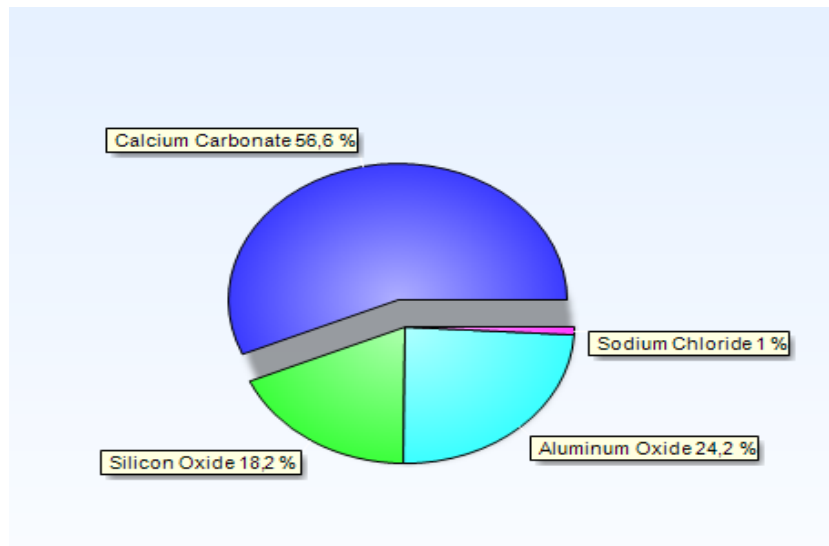


Figure IV.8. Les pourcentages des minéraux du Grès friable.

➤ **Interprétation des résultats**

L'analyse minéralogique réalisée par diffraction aux rayons X sur le matériau Grès friable extrait à Ait Yahia Moussa montre que le minéral le plus dominant est la calcite  $CaCO_3$  représentée sur le diagramme par la couleur bleu, la présence des alumines  $Al_2O_3$  de couleur bleu ciel associés aux Quartz  $SiO_2$  de couleur vert et des chlorures de Halite  $NaCl$  de couleur rose, avec des proportions différentes mais inférieures à celle des carbonates montre que cette roche n'est pas pure ce qui la rend roche assez tendre .

**C- Les résultats du diffractogramme de roche Micaschiste sont présentés sur Figure IV.9:**

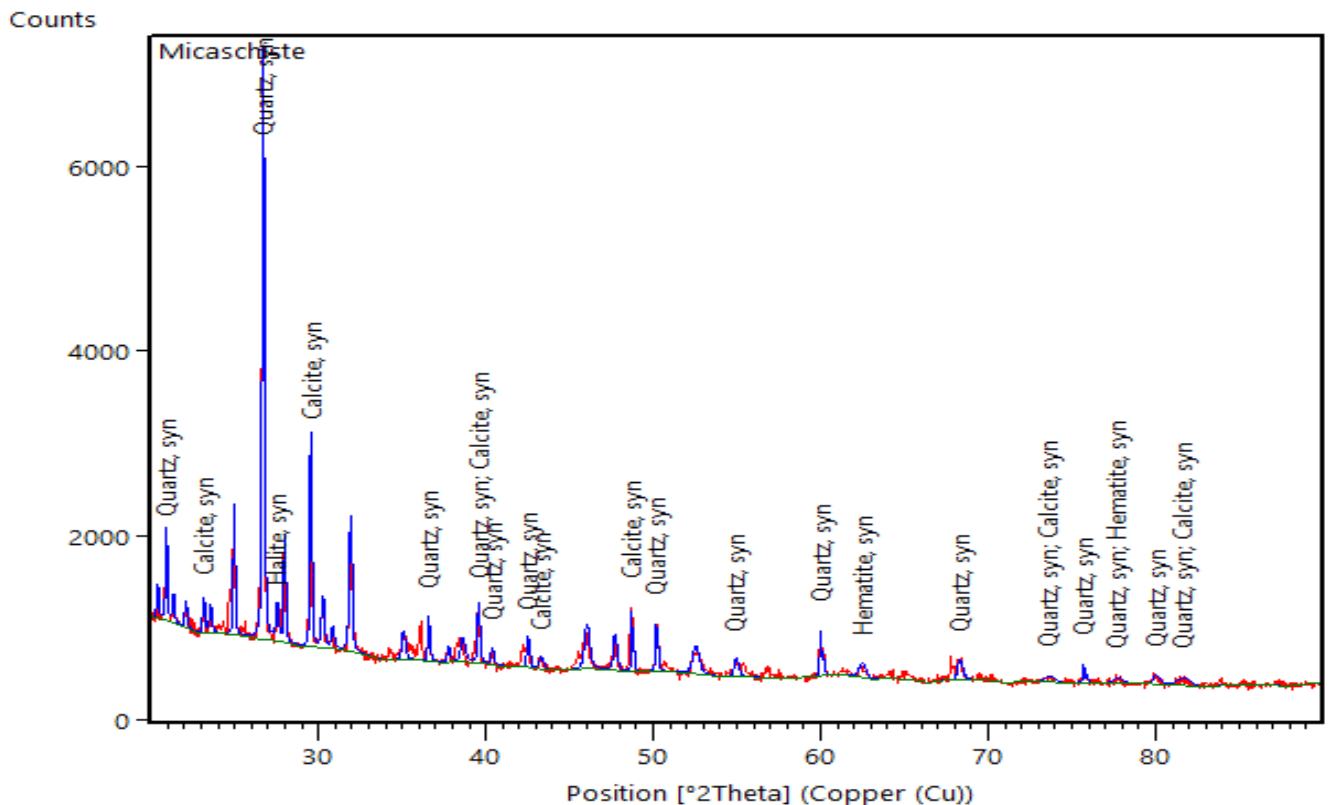


Figure IV.9. Diffractogramme des Micaschistes.

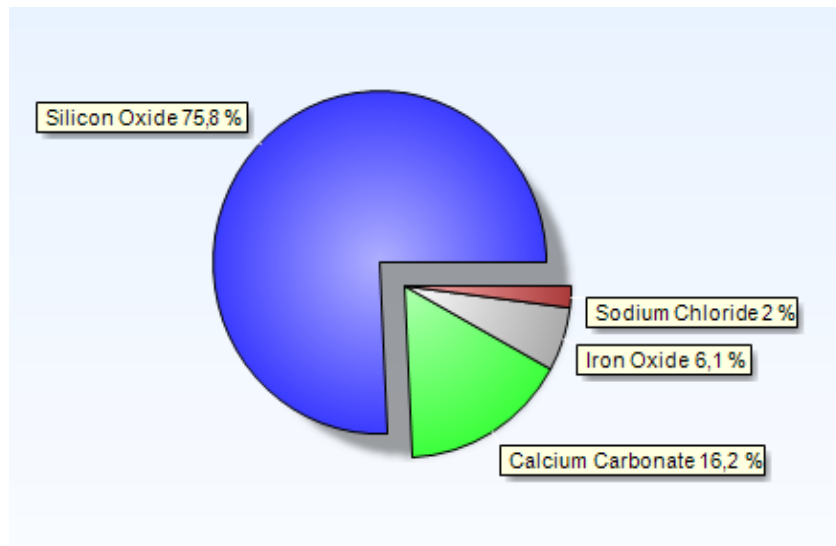


Figure IV.10. Les pourcentages des minéraux des Micaschistes.

➤ **Interprétation des résultats**

L'analyse minéralogique réalisée par diffraction aux rayons X sur le matériau Micaschiste extrait à Ait Yahia Moussa montre que les minéraux prédominants sont des Quartz SiO<sub>2</sub> représenté sur le diagramme par la couleur bleu, la présence de Calcite CaCO<sub>3</sub> de couleur verte, Oxyde de fer Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de couleur grise et des Halite NaCl de couleur marron, avec des proportions différentes inférieures à celle du quartz donne une roche très dur.

**D- Les résultats du diffractogramme de roche Calcaire sont présentés sur Figure IV.11:**

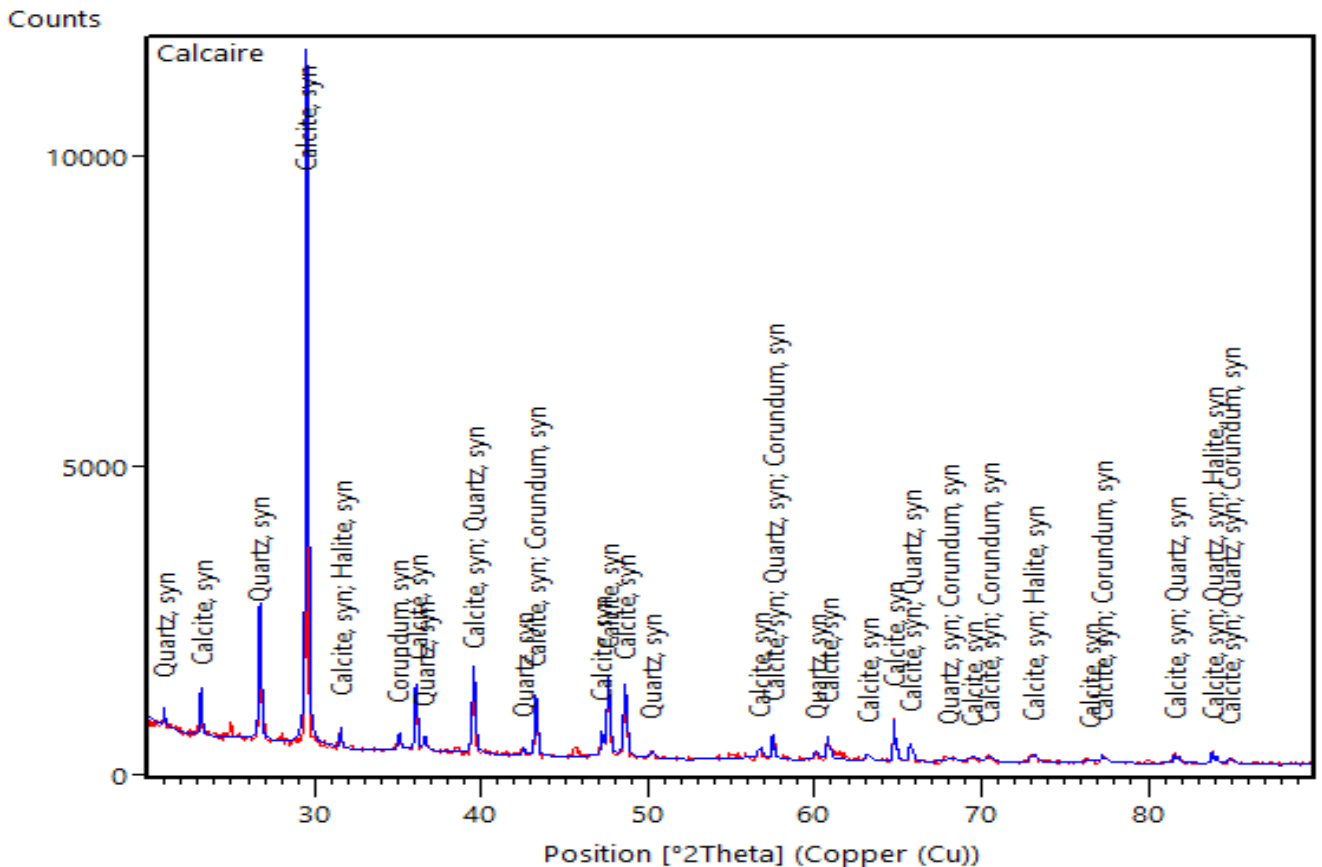


Figure IV.11. Diffractogramme du Calcaire.

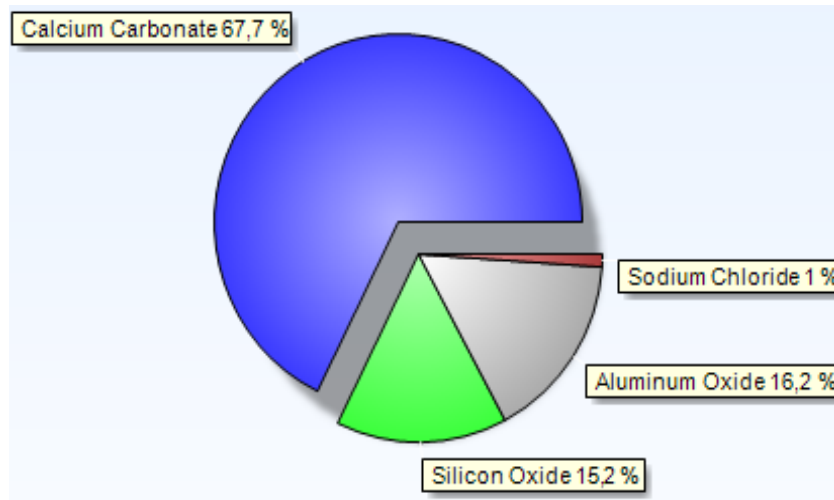


Figure IV.12. Les pourcentages des minéraux du Calcaire.

➤ **Interprétation des résultats**

L’analyse minéralogique réalisée par diffraction aux rayons X sur le matériau Calcaire extrait à Ait Yahia Moussa montre que le minéral le plus dominant est la Calcite  $CaCO_3$  représentée sur le diagramme par la couleur bleu, la présence de Corundum  $Al_2O_3$  de couleur gris associé aux Quartz  $SiO_2$  de couleur vert et de l’ Halite  $NaCl$  de couleur marron, avec des proportions différentes mais inférieures aux carbonates atteste de l’altération des calcaires, ce qui donne une roche plus ou moins tendre.

**E- Les résultats du diffractogramme de roche Marbre sont présentés sur Figure IV.13:**

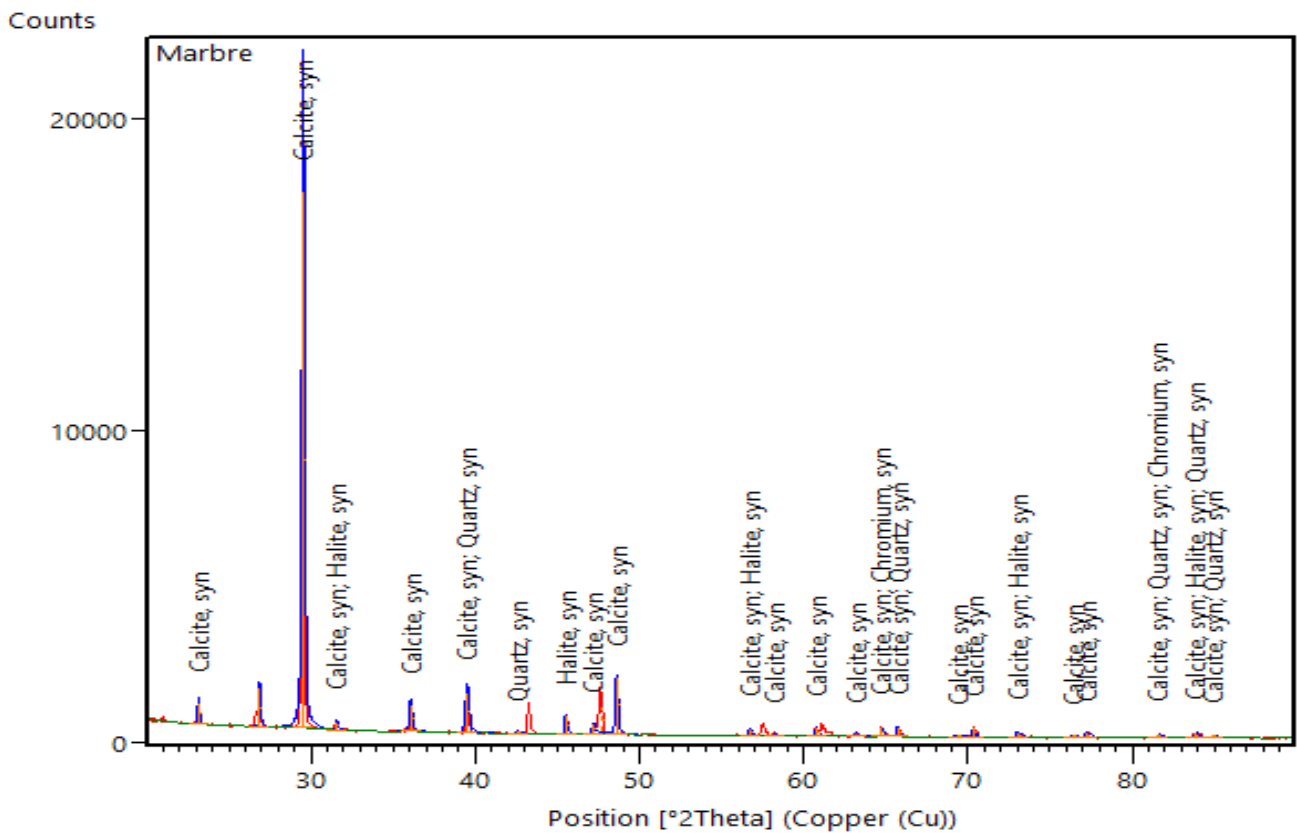


Figure IV.13. Diffractogramme du Marbre.

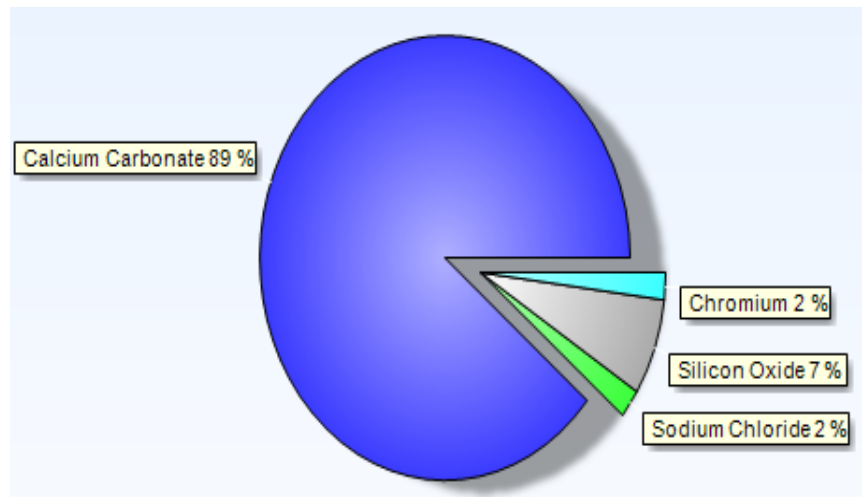


Figure IV.14. Les pourcentages des minéraux du Marbre.

➤ **Interprétation des résultats**

L'analyse minéralogique réalisée par diffraction aux rayons X sur le matériau Marbre extrait à Ait Yahia Moussa montre que le minéral dominant est la Calcite  $CaCO_3$  représenté sur le diagramme par la couleur bleu, la présence d'autres minéraux tels que Quartz  $SiO_2$  de couleur gris, Halite  $NaCl$  de couleur verte et Chrome de couleur bleu ciel, à environ 11% de l'échantillon témoigne de l'altération de cette roche

F- Les résultats du diffractogramme de roche Conglomérat sont présentés sur Figure IV.15:

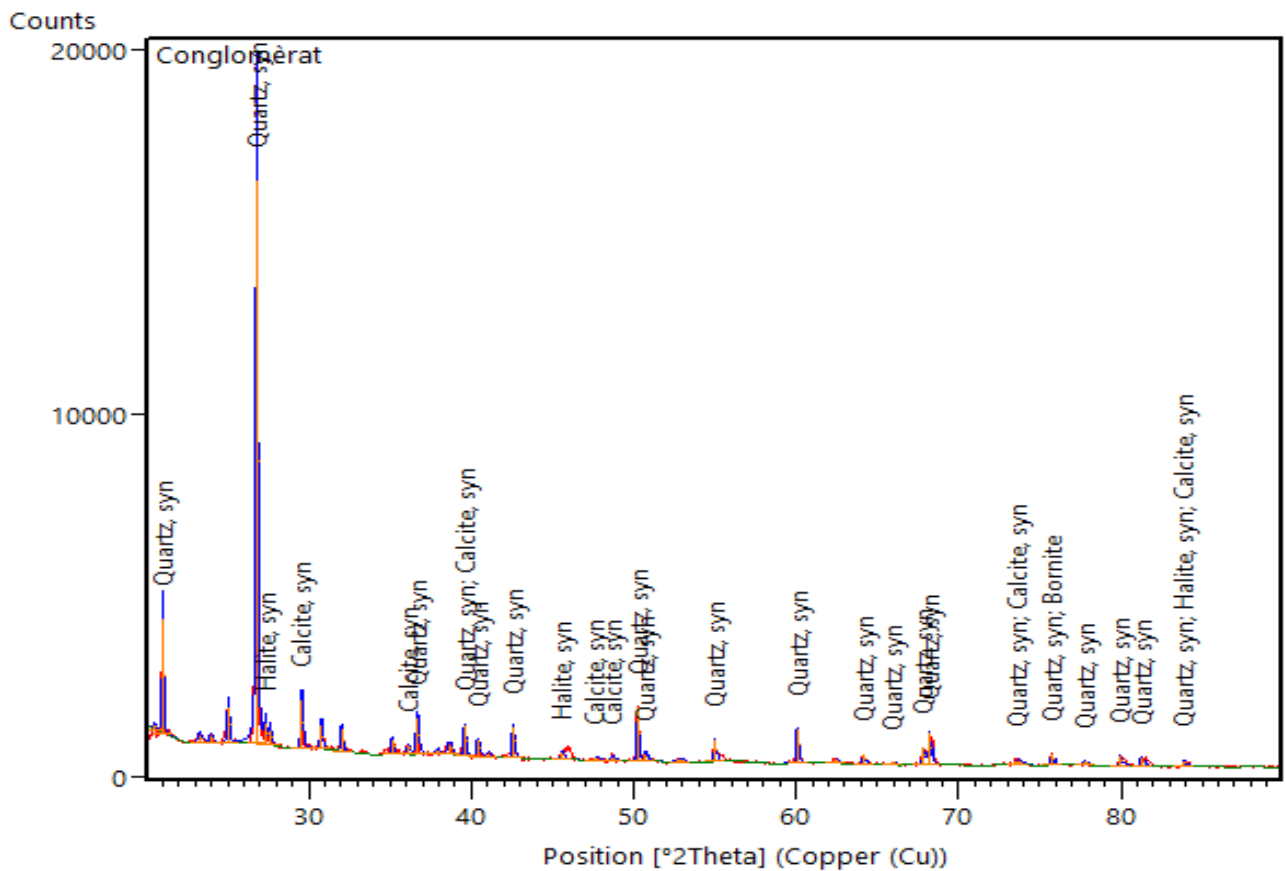


Figure IV.15. Diffractogramme du Conglomérat.

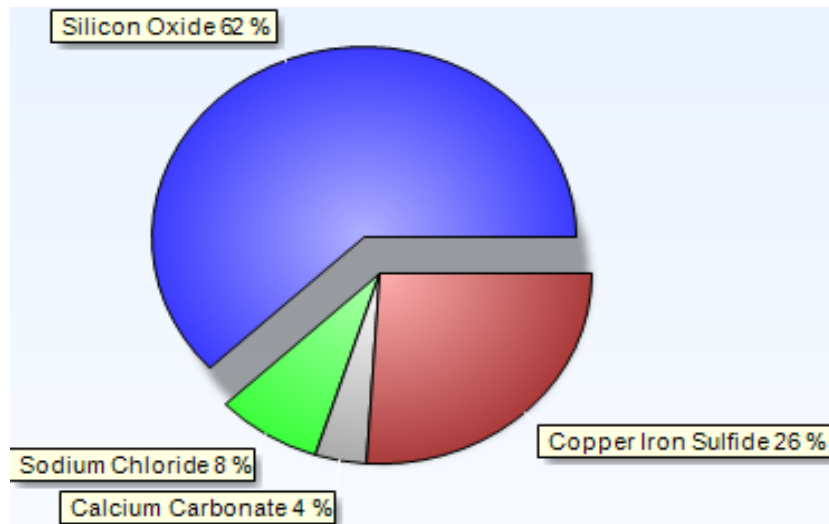


Figure IV.16. Les pourcentages des minéraux du Conglomérat.

### ➤ Interprétation des résultats

L'analyse minéralogique réalisée par diffraction aux rayons X sur le matériau Conglomérat extrait à Ait Yahia Moussa montre que le minéral le plus dominant est le Quartz  $\text{SiO}_2$  représenté sur le diagramme par la couleur bleu, la présence de sulfure de fer de cuivre  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  de couleur marron, l'Halite  $\text{NaCl}$  de couleur verte et des carbonates  $\text{CaCO}_3$  de couleur gris, avec des proportions différentes inférieure à celui confèrent à la roche une dureté élevée.

## IV.3. Caractéristiques physiques

### IV.3.1. Teneur en eau W % [NF P94- 050]

#### IV.3.1.1. Définition

Elle est exprimée en pourcentage %, est le rapport entre la masse de l'eau évaporée par séchage d'un volume de sol ramenée à la masse sèche de ce sol. L'essai permet de renseigner sur l'état d'humidité d'un matériau, de savoir la quantité d'eau existante dans un volume de sol donné relativement à la quantité des grains solides de ce même volume de sol. Cette caractéristique permettra par la suite de déterminer d'autres caractéristiques du sol telles que le degré de saturation, la porosité, ... sa détermination est indispensable et révèle d'un intérêt capital, notamment dans le cas des sols fins sensibles à l'eau.

#### IV.3.1.2. 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  $105^\circ\text{C}$  pendant 24h et le peser une autre fois à sec.

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

#### IV. 3.1.3. Expression des résultats

Les résultats obtenus sont représenté dans le tableau IV.1 :

Tableau IV.1. La teneur en eau.

Roche	Teneur en eau W %
Micaschistes	1.26
Grès	5.27
Conglomérats	4.50
Calcaire	3.10
Marbre	1.20

### IV.3.2. La masse volumique

C'est la masse de l'unité de volume de la roche ( $\text{g/cm}^3$ ). Suivant l'état du matériau, on définit:  $\rho_h$  la masse volumique naturelle,  $\rho_d$  la masse volumique sèche,  $\rho_{\text{sat}}$  la masse volumique saturée et  $\rho_s$  la masse volumique absolue ou masse volumique du solide [22].

#### IV.3.2.1. La masse volumique naturelle $\rho_h$ [NF P 94-053]

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

Avec :

$M_h$  : la masse naturelle; g

$V_t$  : le volume de l'échantillon;  $\text{cm}^3$

Les résultats obtenus sont représenté dans le tableau IV.2 :

**Tableau IV.2.** La masse volumique naturelle.

Roche	l'échantillon et la profondeur de prélèvement(m)	Dimension (cm)		La masse (g)	Le volume ( $\text{cm}^3$ )	La masse volumique naturelle $\rho_h(\text{g/cm}^3)$	La masse volumique naturelle moyenne
		D	H				
Micaschistes	N°01 24.00-24.30	9	18.2	3112	1157.24	2.69	2.80
	N°02 21.00-21.40	9	16.6	3110	1055.51	2.95	
	N°03 21.50-21.70	9.2	18	3310	1195.96	2.76	
Grès	N°01 21.20-21.34	7	13.7	1307	526.97	2.48	2.39
	N°02 10.70-10.86	7.8	15.7	1701	749.82	2.27	
	N°03 21.00-21.14	7	13.7	1268	526.97	2.41	
Conglomérats	N°01 7.10-7.30	7	14	1430	538.51	2.67	2.57
	N°02 20.40-20.60	7.1	14	1390	554.01	2.51	
	N°03 21.70-21.90	7	14	1375	538.51	2.55	
Grès friable	N°01 7.10-7.25	7.8	14	1485	668.60	2.22	2.23
	N°02 20.50-20.65	6.6	12.6	975	430.85	2.26	
	N°03 20.70-20.85	6.7	12.7	985	447.53	2.20	
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.3.2.2. La masse volumique sèche  $\rho_d$  et la masse volumique saturée  $\rho_{sat}$  par pesée hydrostatique [NF P94- 064]**

**A. La masse volumique sèche  $\rho_d$**

La masse volumique sèche d'un échantillon de roche est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme NF P94-064. L'essai consiste à peser l'échantillon à l'air libre, puis à établir une deuxième pesée après paraffinage, et enfin, repeser le tout plongé dans l'eau.



**Figure IV.17.** Préparation les échantillons dans le panier de la pesée hydrostatique

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

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

Avec :

$M_r$  : Masse de la roche.

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

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

$\rho_p$  : 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.3.** 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 le tableau IV.4 :

**Tableau IV.4.** La masse volumique sèche.

Roche	l'échantillon et la profondeur de prélèvement(m)	Masse de la roche $M_r$ (g)	Masse de la roche paraffinée à l'air libre $M_{rp}(g)$	Masse de la roche paraffinée dans l'eau $M'_{rp}(g)$	Masse volumique sèche $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique sèche moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
Micaschistes	N°01 24.00-24.30	25	30	12.2	2.06	2.19
	N°02 21.00-21.40	33	36	17.6	2.20	
	N°03 21.50-21.70	30.8	31.4	17.5	2.33	
Grès	N°01 21.20-21.34	120.6	128.6	67.4	2.31	2.26
	N°02 10.70-10.86	81.1	84.9	42.7	2.14	
	N°03 21.00-21.14	246.4	247.3	140.8	2.33	
Conglomérats	N°01 7.10-7.30	128.9	135.9	73	2.34	2.37
	N°02 20.40-20.60	57.1	59.4	32.6	2.36	
	N°03 21.70-21.90	185.2	187.1	108.5	2.42	
Grès friable	N°01 7.10-7.25	54.1	58.1	30.9	2.38	2.09
	N°02 20.50-20.65	89.1	95.6	43.0	1.97	
	N°03 20.70-20.85	50.1	53.5	23.9	1.94	
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.3, on constate que les roches (Micaschistes, grès, marbre, calcaire, Grès friable, conglomérats) sont des roches denses.

### B. La masse volumique saturée $\rho_{sat}$

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

La masse volumique saturée tous les vides sont remplis d'eau sol constitué de deux phases uniquement : grains solides + eau.

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

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

Avec:

$Msat_r$  : Masse de la roche saturée

$Msat_{rp}$  : 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 représentés dans le tableau IV.5 :

**Tableau IV.5.** La masse volumique saturée.

Roche	l'échantillon et la profondeur de prélèvement(m)	Masse de la roche saturée $Msat_r$ (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> )	Masse volumique saturée moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
Micaschistes	N°01 24.00-24.30	56.6	56.9	33.9	2.49	2.48
	N°02 21.00-21.40	48.6	50.3	28.7	2.47	
	N°03 21.50-21.70	29.7	30.1	17.8	2.50	
Grès	N°01 21.20-21.34	103.6	112.7	59.1	2.39	2.32
	N°02 10.70-10.86	73.8	76.6	40.4	2.23	
	N°03 21.00-21.14	96.9	97.9	55.6	2.35	
Conglomérats	N°01 7.10-7.30	101.1	105.9	58.2	2.39	2.42
	N°02 20.40-20.60	52.6	54.8	30.1	2.36	
	N°03 21.70-21.90	97.5	98.3	58.6	2.51	
Grès friable	N°01 7.10-7.25	64.5	70.1	34.1	2.17	2.13
	N°02 20.50-20.65	102.7	107.0	53.7	2.12	
	N°03 20.70-20.85	105.6	108.8	54.7	2.09	

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

#### IV.3.2.3.1. Définition

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

#### IV.3.2.3.2. Exécution de l'essai

On prend une quantité du roche concassé à la main et le passer au tamis 2mm, ensuite on prend 50g du tamisa et le mettre dans une coupelle de masse connue  $M$ . l'ensemble est introduit dans une étuve réglée à 105°C. On pèse le pycnomètre et son bouchon secs et propre  $M_1$  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 :

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

Avec :

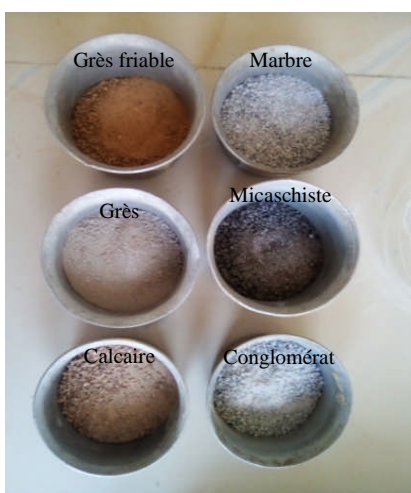
$M_1$  : Masse du pycnomètre vide.

$M_2$ : Masse du pycnomètre avec échantillon.

$M_3$ : Masse du pycnomètre + eau + échantillon.

$M_4$  : Masse du pycnomètre plein d'eau.

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



(a) Pesé de 50g de la roche passant le tamis 2 mm.



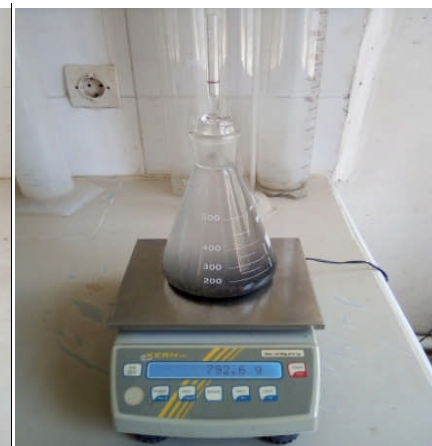
(b) Pesé du pycnomètre à vide M1.



(c) Pèse le pycnomètre et son Bouchon plus l'échantillon M2.



(d) Élimination des bulles d'air Par ébullition à la plaque chauffante



(e) Pèse la masse M3



(f) masse du pycnomètre avec son bouchon plus eau M4

Figure IV.18. Equipement de l'essai.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

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

Roche	M1	M2	M3	M4	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ).
Micaschistes	206.7	256.7	794.5	766.7	2.25
Grès	206.7	256.7	795.8	766.7	2.39
Conglomérats	206.7	256.7	798	766.7	2.70
Grès friable	206.7	256.7	798.5	766.7	2.74
Calcaire	206.7	256.7	797.4	766.7	2.59
Marbre	206.7	256.7	796.5	766.7	2.47

### IV.3.3. Indice des vides et porosité

#### IV.3.3.1. Indice des vides (e)

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

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

Sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés ( $\rho_d$  et  $\rho_s$ ) selon la formule :

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

Vu que les masses volumiques sont déterminées, on déduit l'indice des vides par la deuxième relation.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

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

Roche	l'indice des vides e(%)
Micaschistes	2.74
Grès	5.75
Conglomérats	13.92
Grès friable	31.10
Calcaire	6.15
Marbre	1.23

#### IV.3.3.2. Porosité (n)

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

C'est le rapport du volume des vides  $V_v$  de la roche au volume total  $V$  :

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

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

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

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

Selon la porosité, les roches sont classées en [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 :  $n > 20$  %

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

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

Roche	Porosité (n)
Micaschistes	2,67
Grès	5,437
Conglomérats	12,219
Grès friable	23,722
Calcaire	5,793
Marbre	1,215

#### ➤ Interprétation des résultats

On constate que les roches Micaschistes et Marbre sont des roches de faible porosité, les grès et les calcaire sont des roches de porosité moyenne, les Conglomérats sont des roches de porosité élevée et le Grès friable une roche de grande porosité.

### IV.3.4. Essai au bleu de méthylène [NF P94- 068]

#### IV.3.4.1. Définition

Il a pour objectif la détermination de la quantité de particules argileuses présentes dans un échantillon de matériau.

#### IV.3.4.2. 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.3.4.3. 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 préparât



Figure IV.19. Masse humide des prises d'essai.

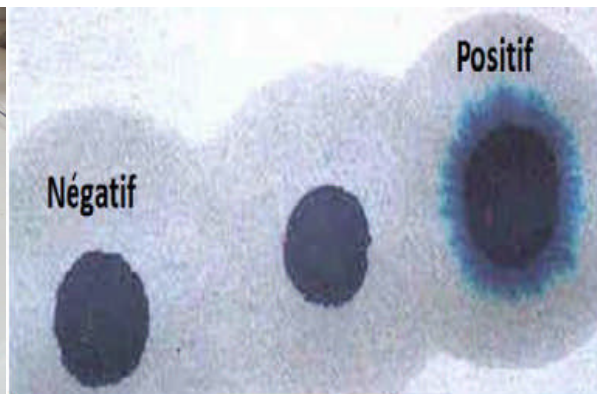


Figure IV.20. Gestion du dosage du bleu de Méthylène.



Figure IV.21. Essai au bleu de méthylène.



Figure IV.22. Echelle de VBS donnée par ARVOR géotechnique.

Tableau IV .9. 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.3.4.4. Expression des résultats

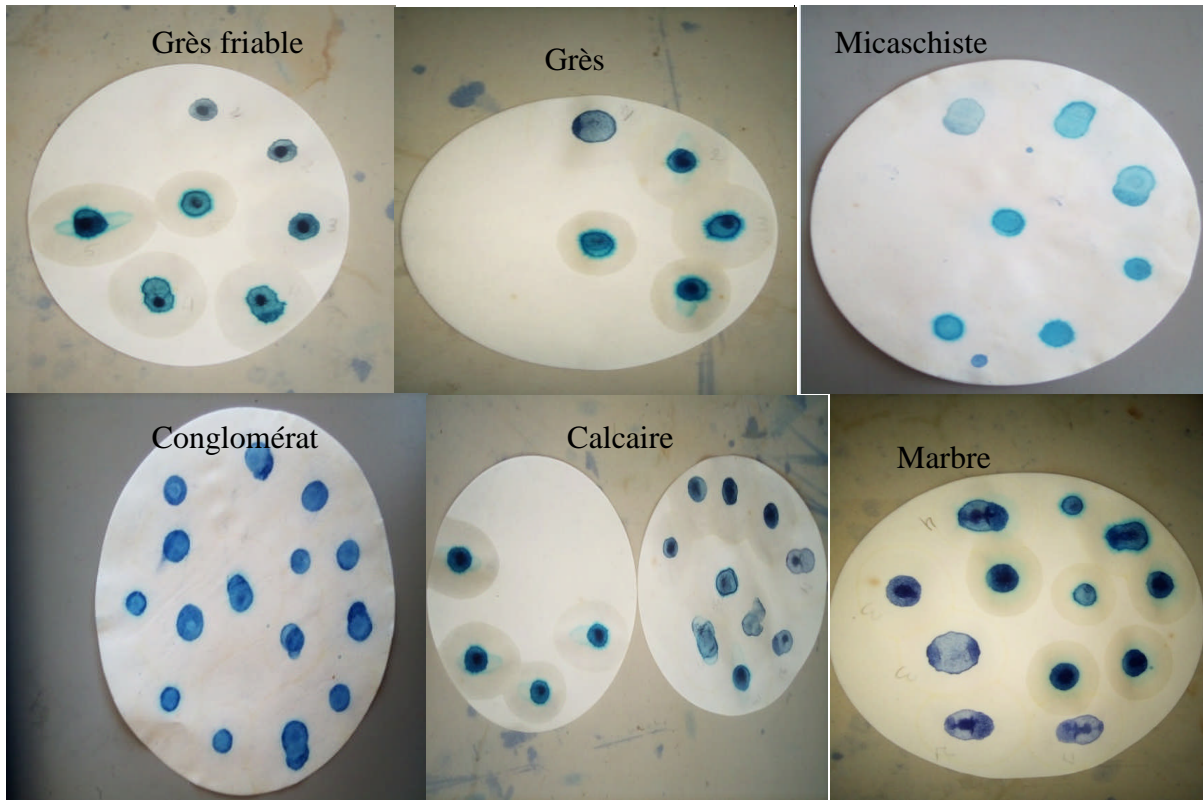


Figure IV.23. Essai du bleu de méthylène sur le papier filtre.

Tableau IV.10. Résultats d'essai au bleu de méthylène.

Matériaux /Paramètre	Grès friable	Grès	Micaschiste	Conglomérat	Calcaire	Marbre
Teneur en eau du matériau W%	5.27	5.27	1.26	4.50	3.10	1.20
Masse humide de la prise d'essai $M_{h1}$	100	100	100	100	100	100
Masse sèche de la prise d'essai $M_0 = \frac{M_{h1}}{1+W}$	15.95	15.95	44.25	18.18	24.39	45.45
Volume de la solution du bleu nécessaire pour atteindre l'adsorption totale (cm <sup>3</sup> )	25	15	15	40	20	59
Masse de bleu introduite $B = V * 0.01$	0.25	0.15	0.15	0.40	0.20	0.59
Valeur au bleu $VBS = \frac{B}{M_0} * 100$	1.57	0.94	0.33	2.20	0.82	1.29
Observation	Sol sablo-limoneux	Sol sablo-argileux	Sol sablo-argileux	Sol sablo-limoneux	Sol sablo-argileux	Sol sablo-argileux

## IV.4. Caractéristiques mécanique

### IV.4.1. Critère de rupture

Un critère de rupture est une relation théorique ou empirique qui caractérise la rupture d'une roche. Il permet de définir par une courbe, les zones de stabilité et d'instabilité de la roche soumise à des sollicitations (compression avec ou sans confinement, traction). Les principaux critères de rupture du roc intact sont le critère de Mohr-Coulomb et le critère de Hoek-Brown.

#### IV.4.1.1. Critère de Mohr Coulomb et le module de Young

En ce qui concerne le critère de rupture Mohr coulomb :

Le cercle de Mohr est une représentation graphique des états de contrainte à deux dimensions, proposée par l'ingénieur allemand Christian Otto Mohr en 1882.

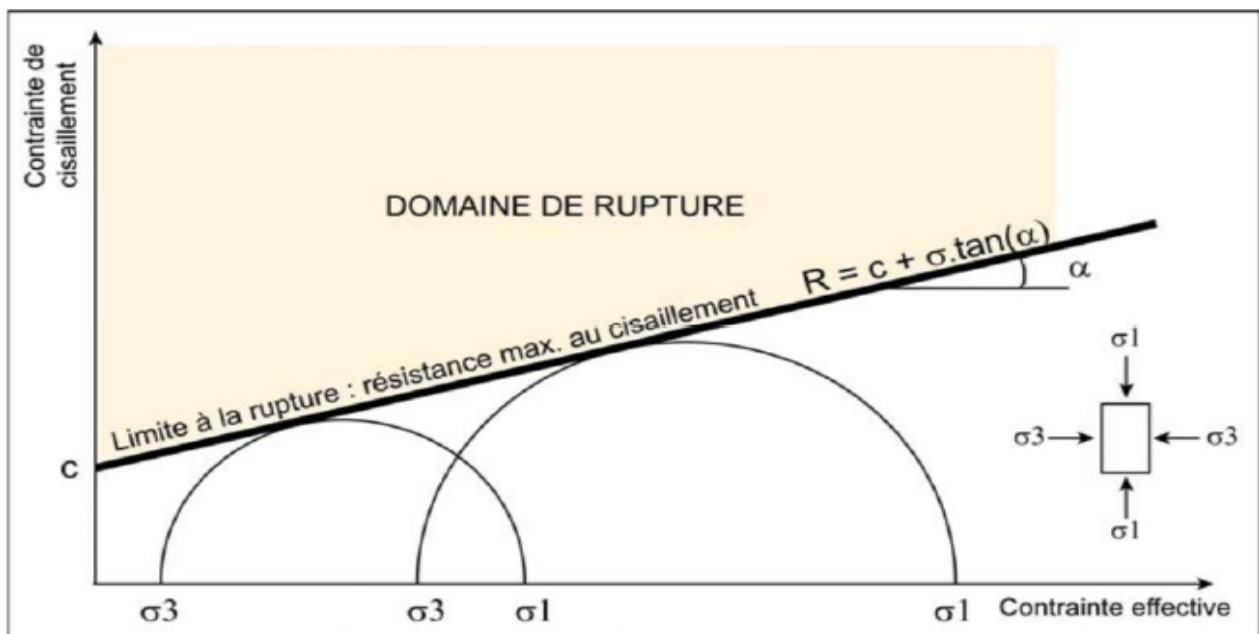
Pour des échantillons d'une même roche, on fait varier expérimentalement  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$ ; on note les valeurs provoquant la rupture et l'angle de rupture correspondant. La représentation graphique dite du Cercle de Mohr situe le domaine de la rupture par rapport aux valeurs des contraintes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  et à une 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].

Le critère de Mohr-Coulomb s'exprime sous la forme :

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

Avec :

- $\tau$ : contrainte de cisaillement ;
- $c$ : cohésion ;
- $\sigma$ : contrainte normale ;
- $\Phi$ : angle de frottement interne.



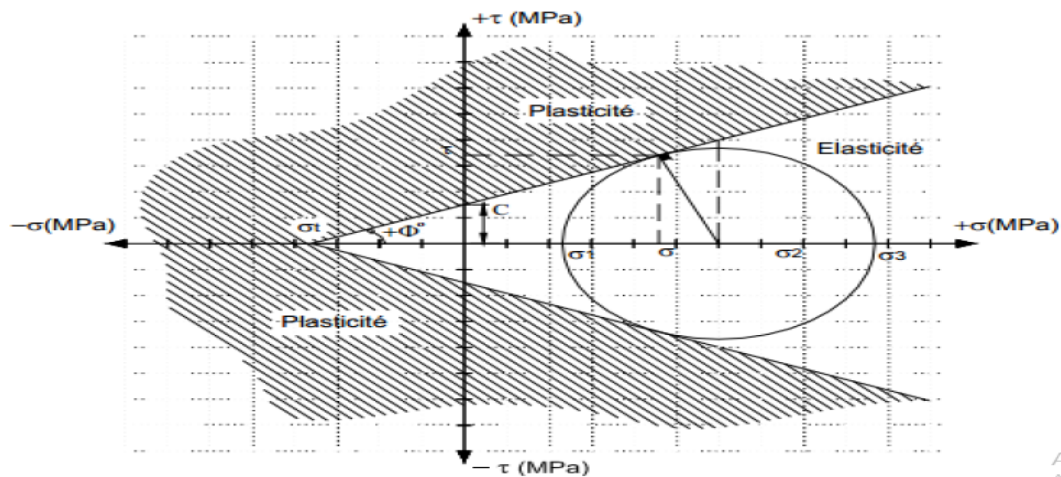


Figure IV.25. Critère de résistance de Mohr-Coulomb représenté dans le plan  $(\tau, \sigma)$  [3].

➤ **Commentaires sur le critère de Mohr-Coulomb**

Le critère de Mohr-Coulomb n'est valable que pour le domaine des confinements faibles. A un haut niveau de confinement, il surestime la résistance. Il surestime aussi la résistance à la traction. Dans la plus part des cas, la mécanique des roches traite des problèmes superficiels et de faible confinement, aussi ce critère est largement employé, grâce à sa simplicité et son succès [39]. Quand au module de Young :

Le physicien britannique Thomas Young (1773-1829) avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte [10]. La loi d'élasticité est la loi de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

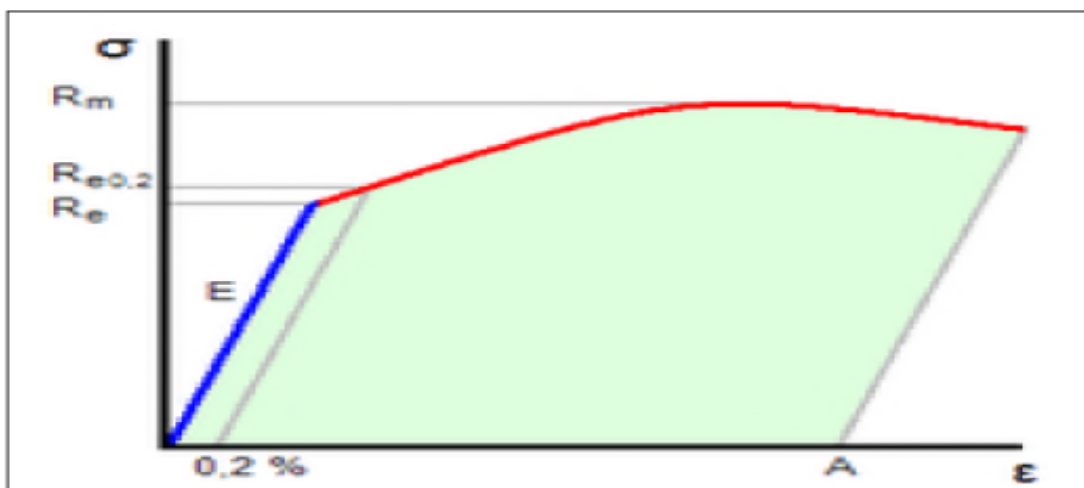


Figure IV.26. Diagramme contrainte-déformation. [10]

Où :

- $\sigma$  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).

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.

#### IV.4.1.2. 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 :

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

Où :

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

**Tableau IV.11.** 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.

➤ **Commentaires sur le critère de Hoek-Brown**

C'est un critère empirique basé sur des résultats réels d'essais obtenus sur diverses roches. L'emploi et le choix des paramètres est très facile. Il peut être étendu aux massifs rocheux. Il est employé couramment en mécanique des roches et dans le dimensionnement des ouvrages. L'enveloppe de résistance de Hoek-Brown n'est pas une ligne droite. C'est une courbe. A haut niveau de contrainte, l'enveloppe s'incurve vers le bas, et donne ainsi une évaluation de résistance inférieure à celle de l'enveloppe de Mohr-Coulomb. [39]

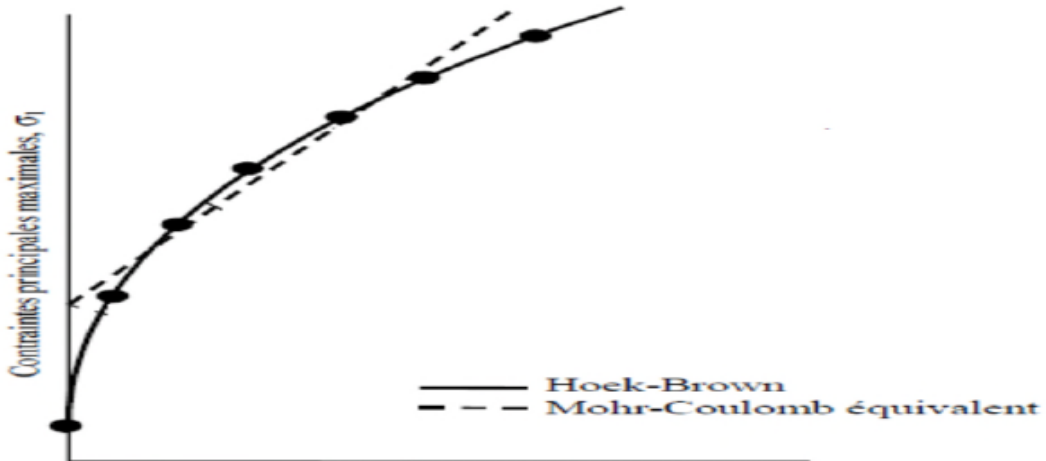


Figure IV. 27. Ajustement du critère linéaire de Mohr-Coulomb au critère non-linéaire de Hoek- Brown, d'après Hoek et Brown. [10]

**IV.4.2. Propriétés mécaniques des roches**

En mécanique des roches, le comportement des roches est caractérisé par les essais suivants :

- Résistance en compression
- Résistance en traction par flexion

**IV.4.2.1. Résistance en compression**

**IV.4.2.1.1. Essai de compression uniaxiale [NF P 94-420]**

Le principe du test consiste à appliquer d'une manière croissante une force de compression sur une carotte de roche intacte selon son axe longitudinal.

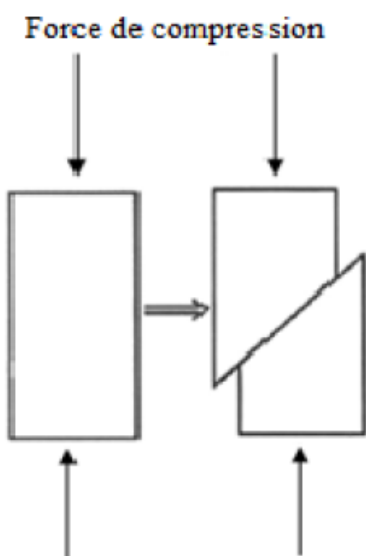


Figure IV. 28. Schéma de principe D'un essai de compression uniaxiale.



Figure IV. 29. Essai de compression uni axiale.

Dans cet essai, l'échantillon est pris sous la forme d'une carotte (éprouvette cylindrique), d'élanement H/D (H: hauteur, D: diamètre) 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 [38].

Elle est donnée par la formule suivante:

$$R_c = \frac{F}{S} \quad [\text{MPa}]$$

Où:

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

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



Figure IV.30. Dispositif expérimental.

En total nous avons réalisé vingt trois (23) essais de compression simple sur différents échantillons issus des sondages carottés réalisés au niveau des massifs rocheux étudiés (voir annexe 04)



a- Epreuve de Calcaire 9.20-9.40m  
PK14+900



b- Epreuve de Marbre 9.10- 9.28m  
PK15+450



c- Epreuve de Micaschiste 21.50-21.70 m  
PK15+400



d- Epreuve de Grès 21.20-21.34m  
PK14+900



e- Epreuve de Grès friable 20.50-20.65m  
PK14+950



f- Epreuve de Conglomérat 21.70-21.90m  
PK13+00

Figure IV.31. Essai de compression simple sur les roches étudiées (laboratoire Béton UMMTO).

➤ **Expression des résultats**

Les résultats obtenus sont représenté dans le tableau IV.12 :

**Tableau IV.12.**La résistance à la compression.

Roche	L'échantillon et la profondeur de prélèvement (m)	Dimension (cm)		Charge F (KN)	La résistance à la compression RC (MPa)	RC C corrigée	RC Moyen
		D	H				
Micaschistes	N°01 24.00-24.30	9	18.2	66.56	10.47	10.47	38.65
	N°02 21.00-21.40	9	16.6	310.97	48.91	47.95	
	N°03 21.50-21.70	9.2	18	382.3	57.54	57.54	
Grès	N°01 21.20-21.34 PK14+900	7	13.7	124.1	32.24	32.24	29.84
	N°02 10.70-10.86 PK14+950	7.8	15.7	708	14.81	14.81	
	N°03 21.00-21.14 PK14+900	7	13.7	97.3	25.27	25.27	
	N°04 13.40-13.6	9	18.2	111.3	28.93	28.93	
	/	9	16.5	310.97	48.91	47.95	
Conglomérats	N°01 7.10-7.30	7	14	23.5	6.11	6.11	26.58
	N°02 20.40-20.60	7.1	14	57.92	14.63	14.63	
	N°03 21.70-21.90	7	14	67.22	17.47	17.47	
	N°04 6.50-6.65 Sandage PK13+00	7.1	14	180.2	45.50	45.50	
	N°05 6.70-6.85 Sandage PK13+00	7.1	13.5	196.8	49.71	49.21	
Grès friable	N°01 7.10-7.25	7.8	14	46.84	9.80	9.52	8.42
	N°02 20.50-20.65	6.6	12.6	23.97	7.00	6.94	
	N°03 20.70-20.85	6.7	12.7	17.74	5.034	4.98	
	N°04 13.40-13.60 PK14+950	7	14	66.56	10.47	10.47	
	N°05 13.10-13.25 PK14+950	7	13.5	39.7	10.31	10.21	

Calcaire	N°01 9.20-9.40 PK14+900	9.2	17.9	73.92	11.13	11.02	21.25
	N°02 6.00-6.18 PK14+950	9.2	18.2	222.7	33.5	33.5	
	N°03 7.30-7.50 PK14+900	9.2	17.4	129.2	19.44	19.24	
Marbre	N°01 9.00-9.20	9.2	17.6	143.12	21.54	21.33	24.97
	N°02 9.10-9.28 PK15+450	9.2	18.2	190.3	28.62	28.62	

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

**Tableau IV.13.** Classification des roches en fonction de la résistance à la compression. [38]

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

**Tableau IV.14.** Classification des massifs rocheux d’Ait Yahia Moussa en fonction de la résistance à la compression.

Roche	R <sub>c</sub> (MPa)	Qualité de la roche
<b>Micaschistes</b>	38.65	Moyenne
<b>Grès</b>	29.84	Moyenne
<b>Conglomérats</b>	26.58	Moyenne
<b>Grès friable</b>	8.42	Moyenne
<b>Calcaire</b>	21.25	Moyenne
<b>Marbre</b>	24.97	Moyenne

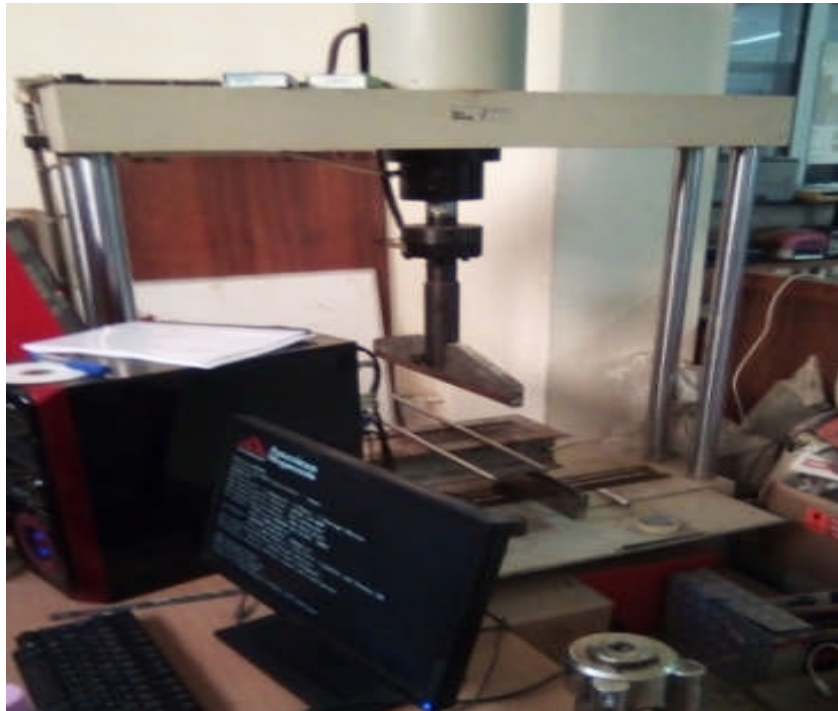
➤ **Synthèse et conclusion**

D’après les résultats obtenus dans les tableaux ci-dessus, on constate que les différentes roches étudiées (Micaschistes, Grès dure, Grès friable, Conglomérats, Calcaire et Marbre) sont classées comme étant une roche moyennement résistante.

**IV.4.2.2. La résistance à la traction**

**IV.4.2.2.1. Essai de traction par flexion [NF P 18-407]**

Cet essai est effectué sous charge concentrée exécuté par un bâti de flexion de type Toni Technique piloté par ordinateur équipé du logiciel Test Expert V7.11, et doté d'un capteur de force de 100 KN. Cette machine est munie d'un dispositif à trois rouleaux, sur les éprouvettes parallélépipédiques des différents types de roche de dimension (4x4x16) [cm<sup>3</sup>].

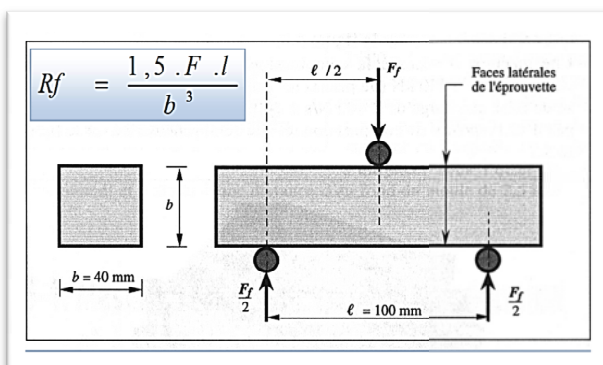


**Figure IV.32.** Machine de l'essai de traction par flexion [Laboratoire UR-MPE/FSI-Boumerdes]

➤ **Dispositif de l'essai de flexion**

**a. Flexion trois points :**

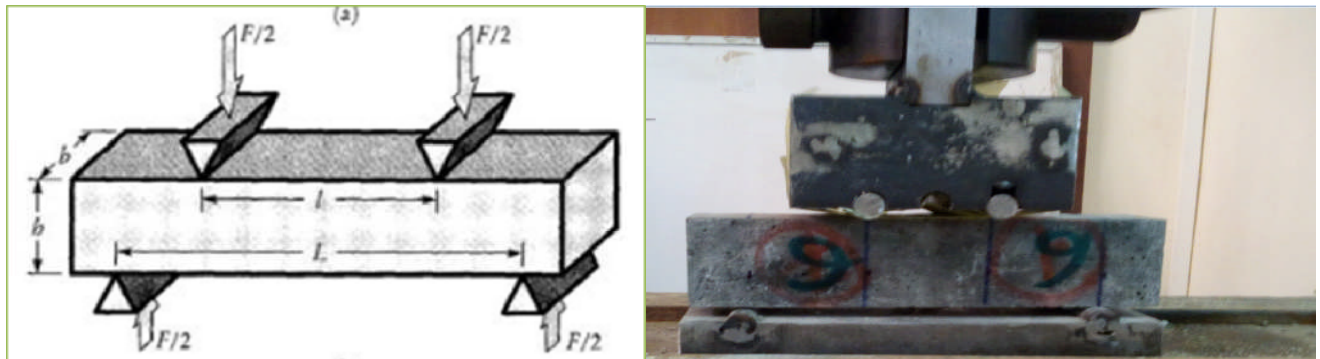
Le dispositif de flexion comporte deux appuis à rouleau de 10 mm de diamètre, distant de 120mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage, et un troisième rouleau de même diamètre, équidistant des deux premiers, et transmettant la charge F. Afin de transmettre une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux rouleaux doivent pouvoir osciller légèrement de leur centre dans le plan vertical perpendiculaire au grand axe de l'éprouvette.



**Figure IV.33.** Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion (3 points) [Laboratoire UR-MPE/FSI-Boumerdes]

**b. Flexion quatre points :**

La Figure IV.34 Montre une structure sous chargement de flexion Quatre-points. Dans ce cas on utilise les mêmes appuis simples, mais on applique deux charges au lieu d'une seule charge concentrée.



**Figure IV.34.** Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (4 points)

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

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

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

$$\sigma_f = \frac{Ff \cdot l}{2b^3}$$

**Avec :**

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

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

$l$  : Longueur qui sépare les deux appuis.

$b$  : Côte de l'éprouvette.

#### IV.4.2.2.2. Essai de traction par flexion trois points

Pour la réalisation des ces essais, nous avons d'abord confectionné les éprouvettes à partir d'échantillons que nous avons récolté sur le terrain au niveau des différents affleurements, et ce avec les dimensions requises pour cet essai. La position initiale de l'échantillon au niveau de l'affleurement a été respectée.

Les essais de traction indirecte ont été effectué au niveau du laboratoire : Composite et Mécanique des Matériaux-Unité de Recherche : Matériaux, Procédés et Environnement-Faculté : Sciences et Ingénierie- Université M'HAMED BOUGARA-Boumerdes.



a- Epreuve de Marbre PK15+450.



b- Epreuve de Micaschiste PK15+300.



c- Epreuve de Grès friable PK14+900.

**Figure IV.35.** Essai de traction par flexion trois points sur les roches étudiées.

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 égale à 110mm.

$b$  : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

➤ **Expression des résultats**

Les résultats obtenus sont représenté dans le tableau IV.15:

**Tableau IV.15.** La résistance à la traction par flexion trois points.

Roche		Dimension [mm]			Charge $F_f$ [KN]	Resistance à la flexion $R_f$ [MPa]	Resistance à la flexion moyen $R_f$ [MPa]
		b	h	l			
Micaschiste	1	30	40	110	2,09	7,18	6,325
	2	40	45	110	2,69	5,47	
Marbre	1	40	45	110	7,69	15,66	19,085
	2	35	40	110	7,64	22,51	
Grès friable	1	40	40	110	0,32	0,842	0,821
	2	35	40	110	0,27	0,800	

Notons que la résistance à la traction d'une roche est très faible par rapport à sa compression à cause des surfaces d'affaiblissement structurales qu'elle renferme.

Pour les échantillons de grès durs et des conglomérats, la résistance à la traction (par flexion à trois points) n'a pas pu être déterminée au laboratoire par manque d'échantillons ou à cause des discontinuités importantes, le cas pour les calcaires, il était donc difficile de réaliser la forme souhaitée (parallélépipédique).

Nous avons utilisé la relation empirique entre la résistance à la traction et à la compression. [41]

$$R_c = 10 R_t$$

On prend

$$R_t = 0,1 R_c$$

**Avec :**

Rt: la résistance à la traction (MPa);

Rc : la résistance à la compression moyenne (MPa).

Les résultats de calcul sont donnés dans le tableau IV.16 :

**Tableau IV.16.** Les résultats de la Résistance a la traction par rapport à sa compression.

Roche	Rc [MPa]	Rt [MPa]
Calcaire	21,25	2,125
Grès	29,84	2,984
Conglomérat	26,58	2,658

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

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

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

**Tableau IV.18.** Classification des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa en fonction de la résistance à la traction.

<b>Roche</b>	<b>Rt(MPa)</b>	<b>Qualité de la roche</b>
<b>Micaschistes</b>	6,325	Résistante
<b>Grès</b>	2,984	Moyenne
<b>Conglomérats</b>	2,658	Moyenne
<b>Grès friable</b>	0,821	Faiblement Résistantes
<b>Calcaire</b>	2,125	Moyenne
<b>Marbre</b>	19,085	Résistantes

#### ➤ Synthèse et conclusion

D'après les résultats obtenus dans les tableaux ci-dessus, on constate que les Micaschistes et le Marbre sont classés comme étant une roche résistante, les roches Grès, Conglomérats et le Calcaire sont classés comme étant une roche moyennement résistante, quand au Grès friable il est classé comme une roche Faiblement Résistante.

**IV.5. Conclusion**

Dans ce chapitre les différents essais réalisés au laboratoire montre que la composition minéralogique facteur déterminant dans la nature géologique des échantillons étudiés , montre que cette dernière a une grande influence sur la qualité de la roche, les différentes propriétés physiques et mécaniques ainsi déterminées à partir des essais effectués au laboratoire et des formules empiriques relatent dans l'ensemble des massifs rocheux de qualité moyenne.

## **Chapitre V**

### **Caractérisation Et Classification Géomécanique**

#### **Des Massifs Rocheux d'Ait Yahia Moussa**

## Chapitre V

### Caractérisation Et Classification Géomécanique Des Massifs Rocheux d'Ait Yahia Moussa

#### V.1. Introduction

Le principal objectif de l'étude des discontinuités, notamment des diaclases et des plans de stratification, ainsi que leurs caractéristiques est de définir les paramètres nécessaires à une évaluation de la stabilité des talus. Le calcul du RQD, RMR, Q, GSI ainsi que SMR est nécessaire pour caractériser et classer le massif rocheux basé sur l'étude primaire qui est l'étude des discontinuités.

#### V.2. Etude des discontinuités

L'acquisition de données liées aux discontinuités améliorera l'interprétation et la compréhension de la structure et des conditions géotechniques de la masse rocheuse; cette activité est donc fondamentale à la planification des travaux d'excavation.

Pour obtenir les données qu'on va les voir après on a utilisé:

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

#### V.2.1. Caractéristiques rocheuse

Les caractéristiques de la masse rocheuse de l'affleurement. Décrivez le principal type de roche, le degré d'altération, les caractéristiques de la stratification et estimez la résistance de la roche. Le rapport doit reprendre 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 géologue	Craie, halite, potasse
R1	Très friable	L'échantillon s'effrite s'il est frappé d'un coup sec avec la pointe d'un marteau de géologue; il peut être écaillé à l'aide d'un canif	Roche extrêmement altérée/dégradée
R0	Extrêmement Friable	L'échantillon se marque sous la pression de l'ongle	Salbande rigide

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

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

### V.2.2. Mesure de l'orientation des discontinuités

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

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

On note toujours:

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

Le pendage et direction de pendage – au moins 7 mesures par ensemble

On note ces données sous la forme suivante: "direction de pendage/pendage "



a) la direction de la couche



b) le pendage

Figure V.1. Conseil pour l'orientation des ensembles de discontinuités (Calcaire d'Ait Yahia Moussa).

### V.3. La présentation des données et des mesures

#### V.3.1- Le premier affleurement : Micaschistes



Figure V.2. Des photos du premier affleurement.

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

Localisation / ID	X: 581109 m	Y: 4058716 m	DATE:23 /06/2019
Type de roche	Caractéristiques de la stratification rocheuse	La résistance de la roche (R0-R6)	Le degré d'altération de la roche
Micaschistes	Massivité (pas de stratification)	R3ouR4	III

	Type	Dip Dir [°]	Dip [°]	Espacement [m]	Persistance [m]	Rugosité	JRC	Ouverture [mm]	Remplissage
D1	J			1,450	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	8-10	9	Quartzite
D2	F			0,400	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	8-10	10	Quartzite
D3	J			0,300	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	8-10	15	Quartzite

D1	D2	D3
145/39SW	220/60NW 220/30NW	99/80SW 111/82SW 110/85SW 120/82SW

➤ **La projection stéréographique**

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

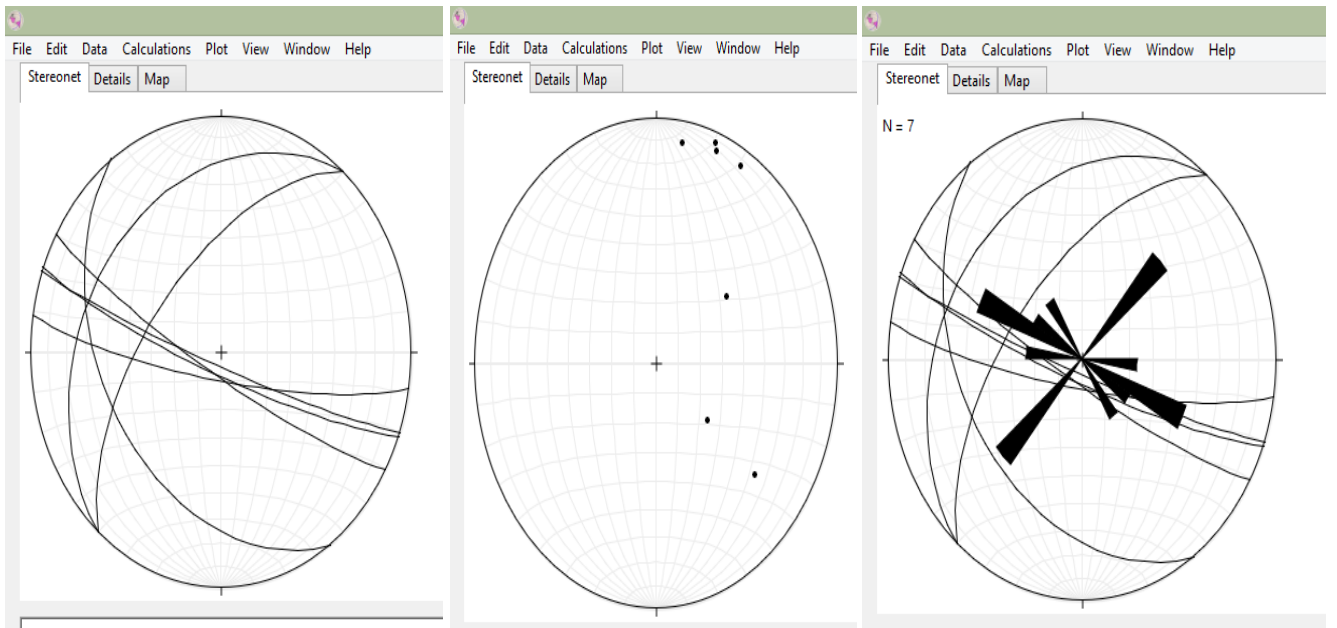
On convient souvent que le point dont on prive la sphère sera un des pôles de celle-ci; le plan de projection peut être celui qui sépare les deux hémisphères, nord et sud, de la sphère, qu'on appelle plan équatorial. On peut également faire une projection stéréographique sur n'importe quel plan parallèle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

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

Deux propriétés importantes:

- tout cercle sur la sphère hormis ceux passant par le pôle sud sera transformé en un autre cercle dans le plan équatorial;
- les angles sont conservés pendant la transformation (transformation conforme).

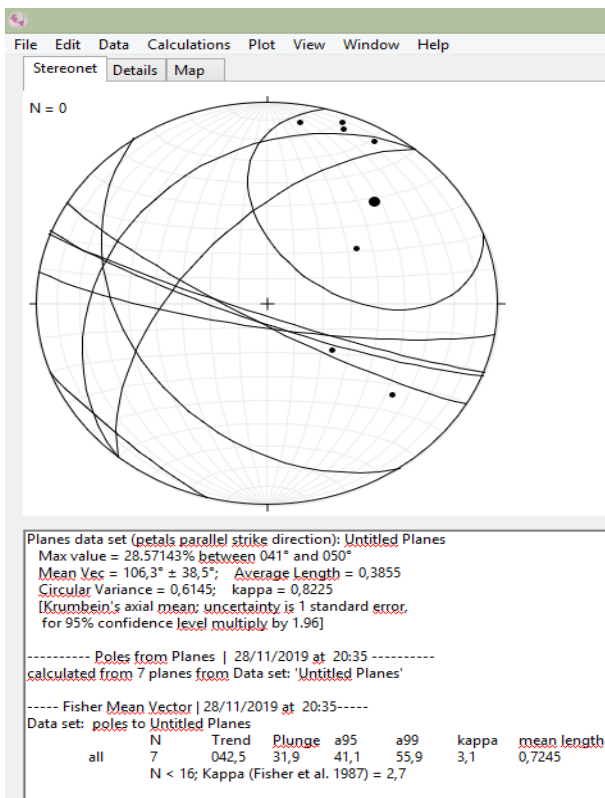
Grâce au logiciel Stèreront 10 on a pu représenter les discontinuités et par la suite faire une projection stéréographique qui nous permet de définir le vecteur moyen de fracturation afin qu'on puisse déterminer le SMR (Slope Mass Rating).



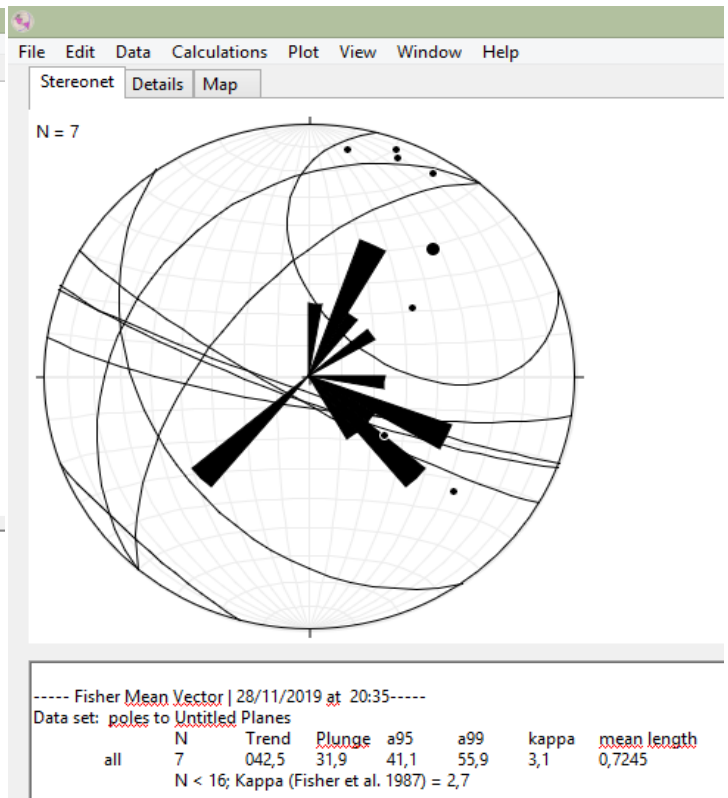
a) La projection des plans

b) la projection des poles

c) rosace directionnelle des discontinuité



d) le vecteur moyen de discontinuité



e) Projection d'ensemble.

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

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

- ✓ La valeur du **vecteur moyen** (des discontinuités) est de direction 42,5°
- ✓ Sa plongée est de 31,9 °

V.3.2-Le deuxième affleurement : Grès

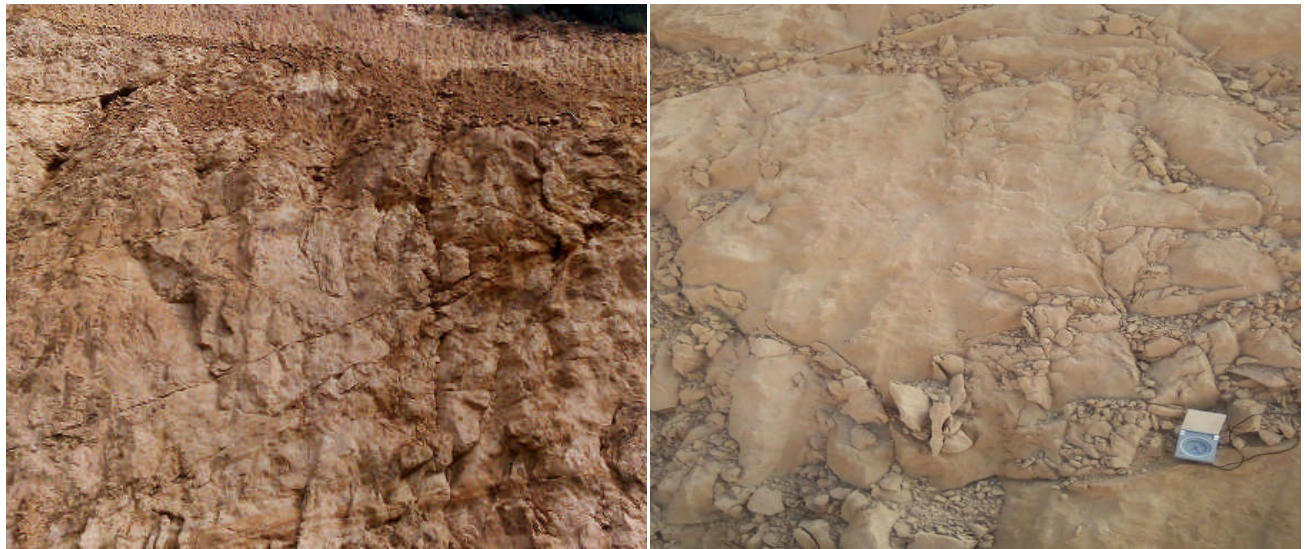


Figure V.4. Photos du deuxième affleurement.

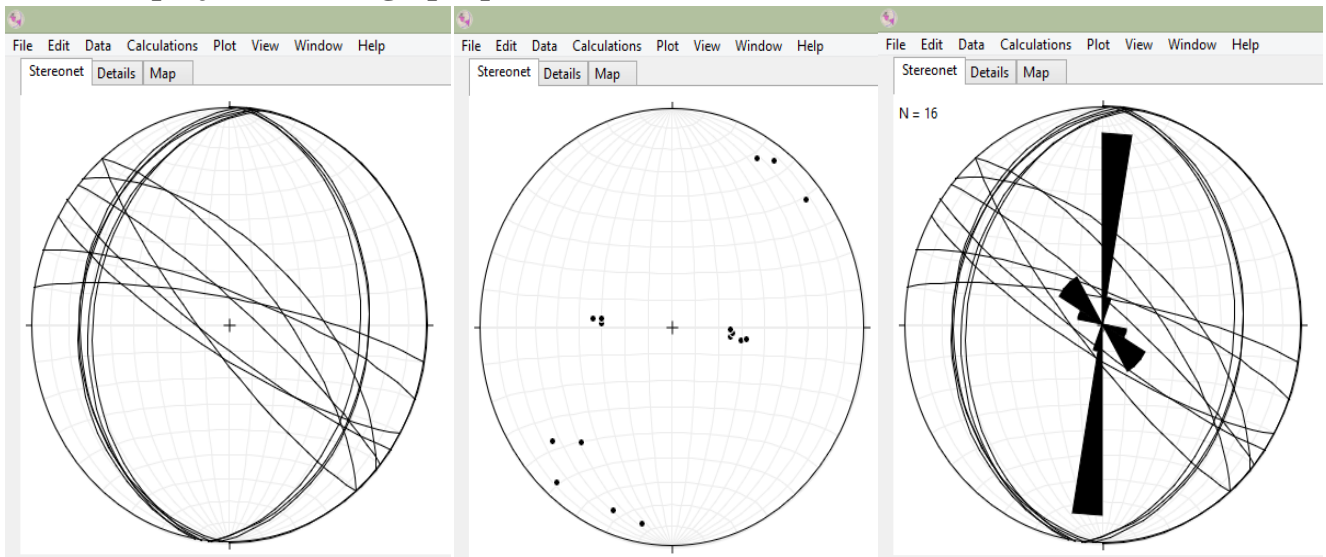
Nous avons pris ces mesures et ces remarques sur le premier massif rocheux de Grès :

Localisation / ID	X: 581047 m	Y: 4059205 m	DATE:24 /06/2019
Type de roche	Caractéristiques de la stratification rocheuse	La résistance de la roche (R0-R6)	Le degré d'altération de la roche
Grès	Stratification <b>régulière</b> et <b>ondulée.</b>	R1	IV

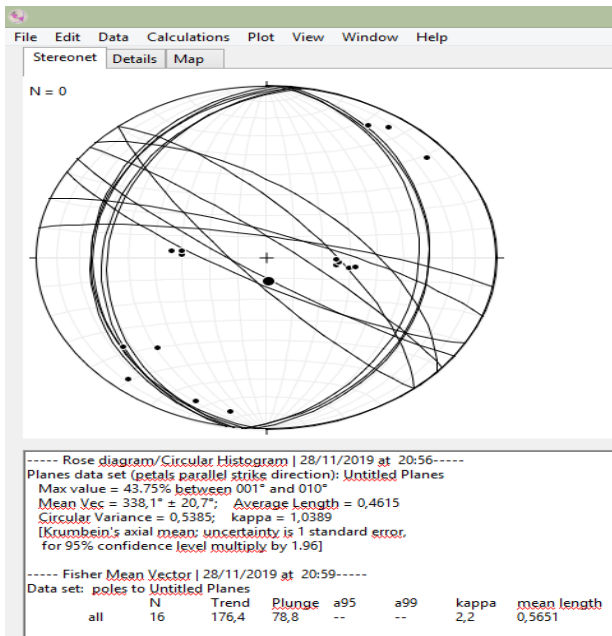
	Type	Dip Dir [°]	Dip [°]	Espacement [m]	Persistane [m]	Rugosité	JRC	Ouverture [mm]	Remplissage
D1	J			3,20	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	8-10	1	Quartz et fer
D2	FI			2,20	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	8-10	2	Quartz et fer
D3	FI			2,20	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	8-10	3	Quartz et fer
D4	FN			2,00	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	8-10	2	Quartz et fer
D5	FN			2,00	Persistance élevée 10-20	Rugueuse	8-10	3	Quartz et fer

D1	D2	D3	D4	D5
8/25NW	10/30NW 5/26NW 8/32NW 2/25NW	5/34SE 3/30SE 6/30SE	132/60NE 140/70NE 130/82NE 100/80NE 110/78NE	140/80SE 125/82SE 120/78SE

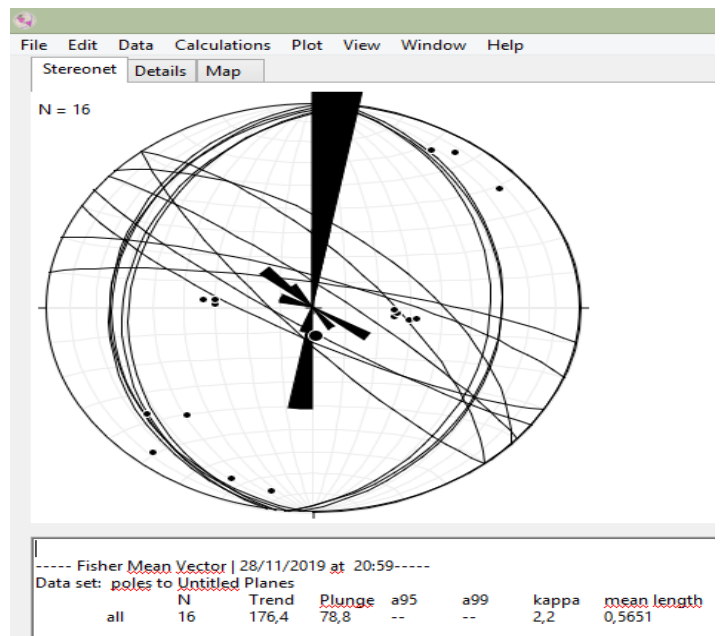
➤ La projection stéréographique



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



d) le vecteur moyen de discontinuité



e) Projection d'ensemble

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

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

- ✓ La valeur du **vecteur moyen** (des discontinuités) est de direction 176.4°
- ✓ Sa plongée est de 78.8°

## V.3.3-Le troisième affleurement : Calcaire



Figure V.6. Photos du troisième affleurement.

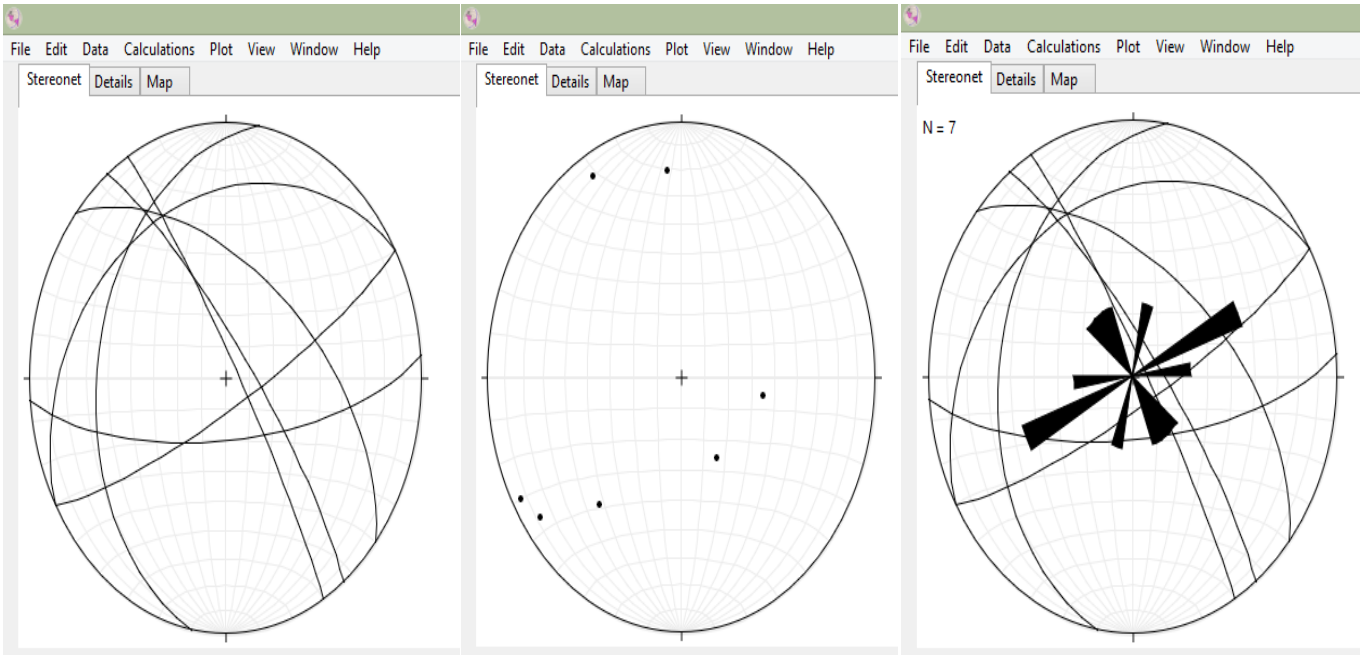
**Nous avons pris ces mesures et ces remarques sur le premier massif rocheux de Calcaire :**

Localisation / ID	X:581043.10 m	Y:4059086.38 m	DATE: 25/06/2019
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

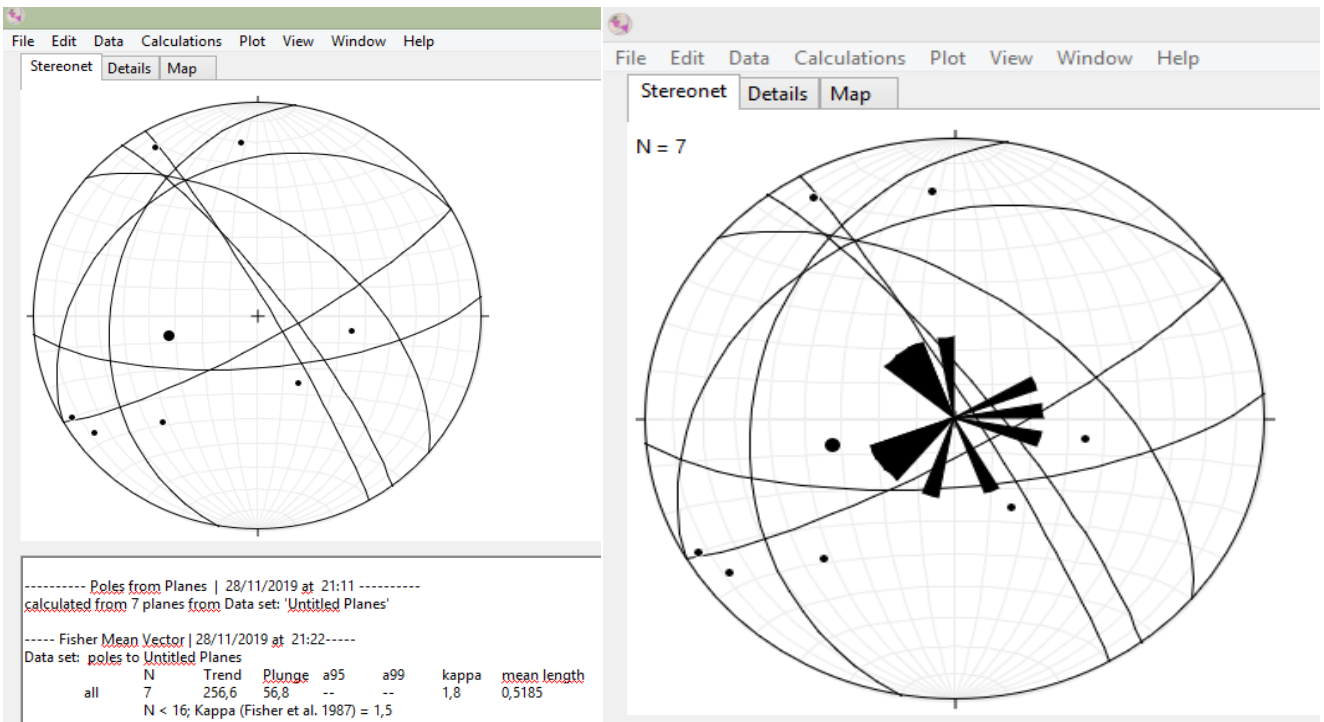
➤ La projection stéréographique



a) La projection des plans

b) la projection des poles

c) rosace directionnelle des discontinuités



d) le vecteur moyen de discontinuité

e) Projection d'ensemble.

Figure V.7. Projection stéréographique des discontinuités du massif de Calcaire.

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-Le quatrième affleurement : Marbre

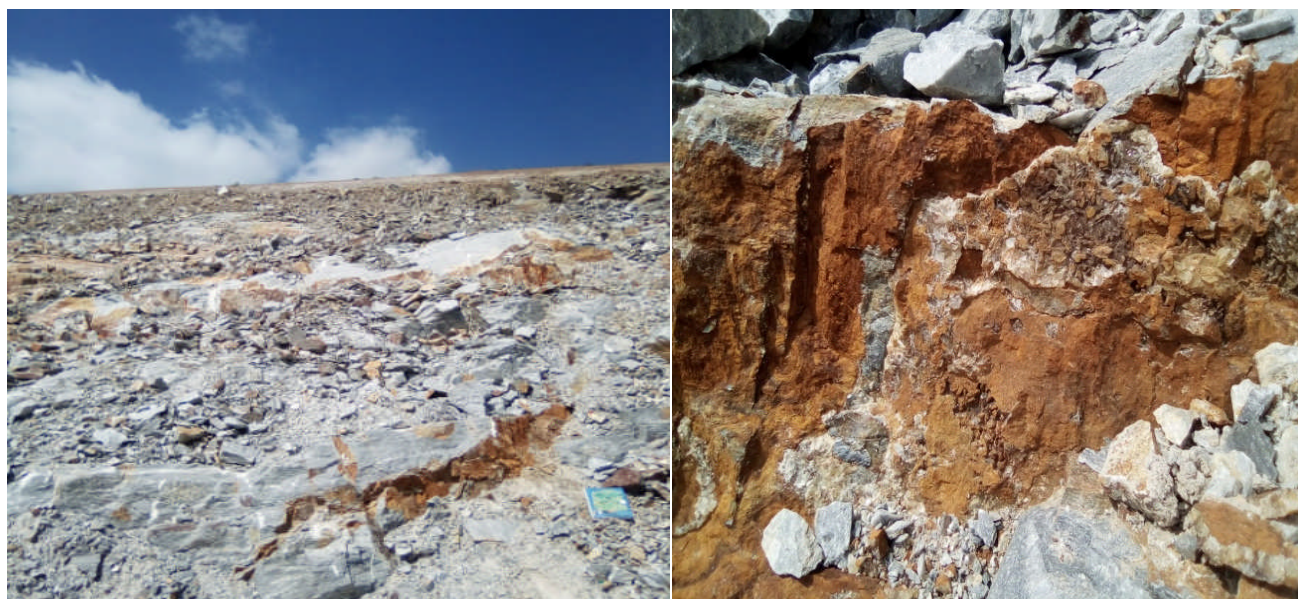


Figure V.8. Photos du quatrième affleurement.

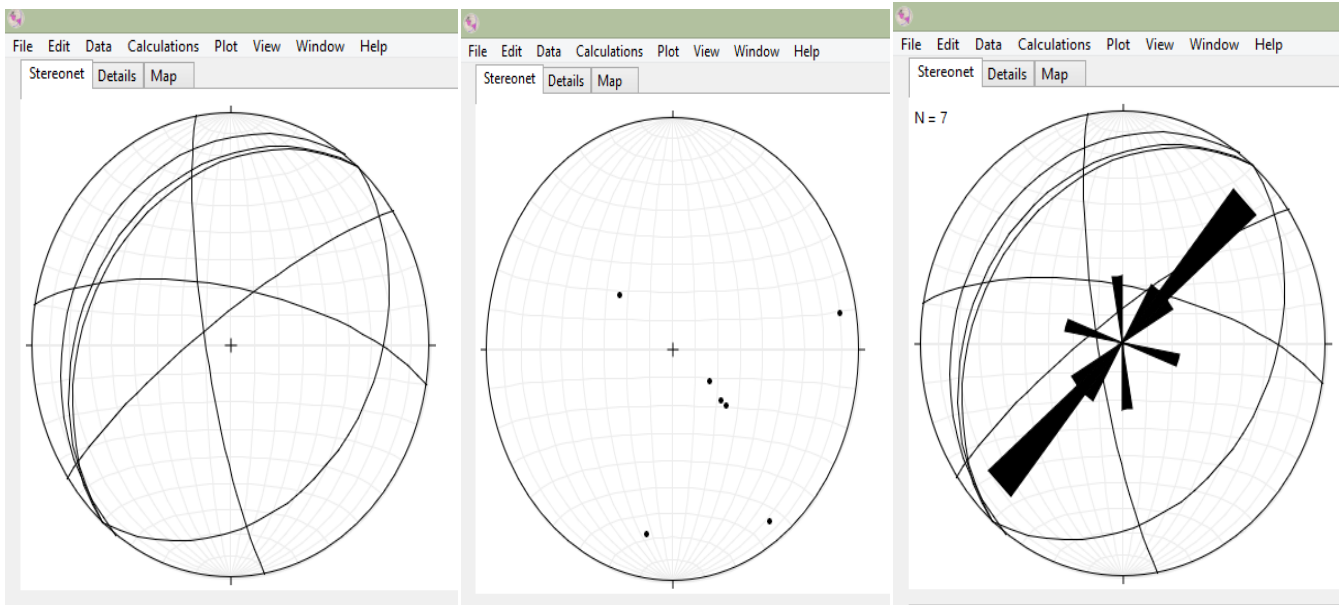
**Nous avons pris ces mesures et ces remarques sur le premier massif rocheux de Marbre:**

Localisation / ID	X: 581065.49 m	Y:4058751.39 m	DATE: 26/06/2019
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

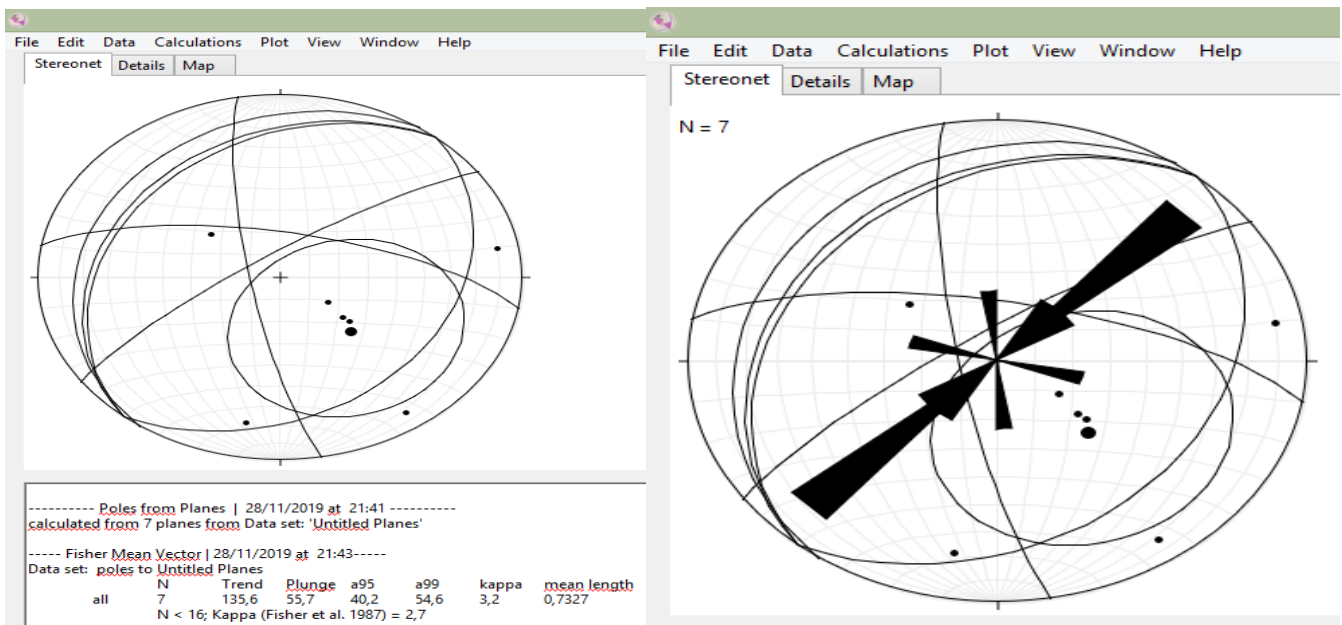
➤ La projection stéréographique



a) La projection des plans

b) la projection des poles

c) rosace directionnelle des discontinuité



d) le vecteur moyen de discontinuité

e) Projection d'ensemble

Figure V. 9. 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°
- ✓ Sa plongée est de 55.7°

**V.4. Classification Géomécanique des massifs rocheux d’Ait Yahia Moussa**

**V.4.1. Système du RQD (Rock Quality Designation)**

Dans le but de la reconnaissance géologique des terrains ou bien l’identification de leurs nature géotechnique (Etat de fracturation, RQD, caractérisation mécanique,...etc.) des sondages d’exploration ont été réalisé sur le terrain du tracé routier (PK 13 au PK 15) de la pénétrante de Tizi-Ouzou –Bouira. (Voir annexe 05)

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. 3.** RQD des différents massifs.

<b>Roches</b>	<b>Sondage</b>	<b>Profondeur (m)</b>	<b>RQD (%)</b>	<b>Qualité de la roche</b>
<b>Micaschistes</b>	V6 P2	19 → 25	33,5	Pauvre
<b>Grès</b>	V6 P2	6.5 → 13	50,5	Moyenne
<b>Conglomérats</b>	V6 P2	13 → 19	74,8	Moyenne
<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 constate que les cinq massifs rocheux (Micaschistes, Grès, Conglomérats, Calcaire, Marbre) dont la qualité varie de très pauvre à moyenne.

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

Tableau V.4. Classification RMR Bieniawski (1989) de micaschistes.

Couches	Micaschistes					
Paramètre	Rc (MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR De Base
Mesure	38,65	33,5	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Epente Altérées	0,2-0,6 m	Complètement sec	57
Valeurs extrêmes de la classification	25-50	25-50				
Note	4	8	20	10	15	

Tableau V.5. Classification RMR Bieniawski (1989) de Grès.

Couches	Grès					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR De Base
Mesure	29,84	50,5	Surface lustrées ou remplissage <5 mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	>2m	Humide	57
Valeurs extrêmes de la classification	25-50	50-75				
Note	4	13	10	20	10	

Tableau V.6. 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 <5 mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	0,2-0,6m	Complètement sec	50
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	50-75				
Note	2	13	10	10	15	

Tableau V.7. 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 <5 mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	0,2-0,6m	Complètement sec	50
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	<25				
Note	2	13	10	10	15	

Tableau V. 8. Classification RMR des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa.

Les Couches	RMR de base	Classe du massif Rocheux	Description du massif rocheux
Micaschiste	57	III	Rocher moyen
Grès	57	III	Rocher moyen
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.

**Les caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR :**

**a) la cohésion:**

$$C_{\text{éq}} \text{ (kPa)} \approx 5 \text{ RMR}$$

**b) l'angle de frottement:**

$$\varphi_{\text{éq}}(^{\circ}) \approx 0,5 \text{ RMR} + 8,3 \pm 7,2$$

**c) le module de Young:**

$$E_{\text{éq}} \text{ (GPa)} \approx 10^{(RMR-10)/40}$$

Tableau V.9. Les caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR

Roches	la cohésion C (bar)	l'angle de frottement $\varphi$ (Degré)	le module de Young E(GPa)
Micaschistes	2,85	36,8	14.96
Grès	2,85	36,8	14.96
Calcaire	2,50	33,3	10
Marbre	2,50	33,3	10

V.4.3. Système Q

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

Paramètres	Micaschistes	Grès	Calcaire	Marbre
RQD	33,5	50,5	53,5	20,69
Jn	1	0,5	1	1
Jr	1,5	1,5	1,5	1,5
Ja	0,75	3	2	0,75
Jw	1	1	1	1
SRF	5	5	5	5
Q	13,4	10,1	8,03	8,28
Qualité du massif rocheux	Bonne	Bonne	Moyenne	Moyenne

➤ Synthèse et conclusion

D'après les résultats du Q-système et le tableau II.6, on déduit que les Micaschistes et les Grès ont une bonne qualité. En revanche, les autres roches de Calcaire et de Marbre 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 (voir annexes 03).

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
Micaschistes	57	57	52	Rocher moyen
Grès	57	62	57	Bon Roche
Calcaire	50	50	45	Rocher moyen
Marbre	50	50	45	Rocher moyen

➤ Synthèse et conclusion

D'après les résultats du GSI et le tableau II.7, on déduit que les roches de Grès ont une bonne qualité. En revanche, les autres roches de Micaschistes, Calcaire et de Marbre sont de qualité moyenne.

**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 des joints $\beta_j$
Micaschistes	120°	42.5°	70°	31.9°
Grès	130°	176.4°	65°	78.8°
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.8 .P29

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

Le massif	RMR <sub>base</sub>	F1	F2	F3	F4	SMR
Micaschistes	57	1	1	-25	0	32
Grès	57	1	1	-25	0	32
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 étudiés.

Le massif	SMR	Classe	Description	Stabilité	Chute	Probabilité de chute
Micaschistes	32	III	Mauvaise	Instable	Plane ou grand dièdre	0.6
Grès	32	IV	Mauvaise	Instable	Plane ou grand dièdre	0.6
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 et le tableau II.9 on peut résumer les principales caractéristiques de la pente : On a obtenu dans les quatre massifs Micaschistes, Grès, Calcaire et Marbre les valeurs du SMR comme suit : 32, 32, 25,25.

On voit que la valeur du SMR dans les quatre massifs Micaschistes, Grès, Calcaire et Marbre 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 voir le Tableau V.13.

**V.5.Conclusion**

Dans ce chapitre on a calculé le RQD, RMR, Q et GSI qui nous a permis de caractériser, classer et définir la qualité des massifs d' Ait Yahia Moussa qui est de qualité moyenne pour le massif de Micaschistes, Calcaire et Marbre de bonne qualité pour le Grès.

Le calcul du SMR confirme l'existence du deuxième problème que puissent rencontrer ces massifs, notre résultat affirme que les pentes des falaises de Micaschistes et Grès sont instable (classe IVa) ce qui implique un important soutènement et des grands ouvrages à faire à savoir Béton projeté renforcé, mur de soutènement ou excavation et drainage cités dans le Tableau II.10.

Les pentes des falaises de Calcaire et Marbre sont instables (classe IVb) 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.10.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

L'objectif principal de ce travail est de caractériser et classer les massifs rocheux d'Ait Yahia moussa au niveau du tronçon PK13 au PK15 du projet de la pénétrante Tizi Ouzo-Bouira.

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 et ce pour la classification des massifs.

L'analyse structurale que nous avons effectuée sur le terrain à l'échelle de l'affleurement nous a permis d'identifier les différentes familles directionnelles de discontinuités qui disloquent les différents massifs. Le versant PK14 à formations gréseuses friables et le versant PK15 semblent bien les plus touchés par la fracturation et l'altération.

Le calcul par méthodes : RQD, RMR, Q et GSI qui nous a permis de caractériser, classer et définir la qualité des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa, Les résultats ont montré que les massifs des Micaschistes, Calcaire et Marbre sont de qualité moyenne quand aux grés durs, ils se classent dans la catégorie : Bonne qualité.

L'application du système SMR sur les versants a permis de définir la qualité de pente des massifs rocheux d'Ait Yahia Moussa, ces dernières s'avèrent instables (classe IV) vu l'hétérogénéité des formations du terrain et l'intensité de la fracturation ce qui implique un important soutènement et des grands ouvrages à faire à savoir : Béton projeté renforcé, mur de soutènement ou excavation et drainage profond.

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

# **Bibliographie**

## Références bibliographiques

- [1] Baud J.P et Gambien M., [2011], «Classification des sols et des roches à partir d'essais d'expansion cylindrique en haute pression », France, 326 pages.
- [2] AFTES., [2003], «Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et la réalisation des ouvrages souterrains».
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Zhao J., [2007], «Roches et massifs rocheux», part 1, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [6] 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.
- [7] 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 Abderahmane Mira de Bejaïa.
- [8] Kimour Mohamed, [2016], « Developpement 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-
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Zhao J., [2008], « Propriétés des discontinuités », part 3, cours de mécanique des roches, L'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [12] Hudson J.A., [1993], «Comprehensive rock engineering-principales, practice and projects », rock Testing and Site Characterization, Oxford, vol 3.
- [13] Barton N.et Choubey V., [1977], « The shear strength of rock joints in theory and practice », Edition Rock Mech.
- [14] Boucif R. et Tamourt M., [2015], «Etude de stabilité du flanc Nord de la mine de kef Essnoun-Tébessa», Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 148 pages.
- [15] 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.
- [16] 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.

- [17] Palmstrom, A. "Rmi - A rock mass characterization system for rock engineering purposes". University of Oslo, Ph.D. Thesis, 400 p. 1995.
- [18] Bieniawski, Z. T. "Classification of Rock Mass for engineering: the RMR system and future trends". Comprehensive Rock Engineering. J. A. Hudson. 3; Rock Testing and Site Characterization. 1993.
- [19] Melle SADEK Kahina et Melle CHAOUCH Ibtissem. [2016] « Caractérisation et classification du massif rocheux du Djebel de Boukhadra -Tébessa- » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [20] 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.
- [21] Bieniawski, Z. T. "Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering". New York John Wiley and Sons. 1989.
- [22] Duffaut P. et Homand F., [2000], «Manuel de mécanique des roches », Tome 1 : fondements, Comité français de mécanique des roches, 87 pages.
- [23] Barton, N., R. Lien, et al. (1974). "Engineering classification of rock masses for the design of rock support." Rock Mechanics 6(189-236). 1974.
- [24] Hoek, E. and E.T. Brown. "Underground Excavations in Rock", London: Instn. Min. Metall. 1980.
- [25] Singh, B. R. K, Goel. "Rock mass classification: a practical approach in Civil Engineering". Oxford, Elsevier Science Ltd .1999.
- [26] Romana, M. (1985) « New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes». In International Symposium on the Role of Rock Mechanics (pp 49–53). Zacatecas, Mexico.
- [27] Ait Taleb Abdelkader [2017] « Evaluation De La Dégradation Chimique Des Granulats Schisteux A L'essai Géométrique 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.
- [28] Chekir Mohammed et Mani Nidal. [2016] «Caractérisation et classification géomécanique du massif rocheux d'Aokas Bejaia » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [29] Schroeder Ch., [2010], « Etude de stabilité des parois rocheuses », Revenue de société Belge de géologie de l'ingénieur et de mécanique des roches (SBGIMR), 90 pages.
- [30] Amara Idir [2018] «Etude de comportement d'un tronçon du tunnel d'Ait Yahia Moussa» Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme de Master En Géotechnique, Université De Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou.
- [31] ABACHA I, (2015), " Etude de la sismicité de la région Nord-Est de l'Algérie", Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas de Sétif, Option-Sismologie, pp.21-24.
- [32] [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com) Image satellites Landsat /copernicus 2019.
- [33] DOMZIG A, (2006), " Déformation active et récente, et structuration tectono sédimentaire de la marge sous-marine algérienne", Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale- Ecole Doctorale des Sciences de la Mer, Spécialité-Géosciences Marines, pp.17.

- [34] WASSILA N, (2005), ‘ Etude des formations carbonatées du versant Sud du massif de L’Oum Settas : Approche quantitative et qualitative’, Thèse de doctorat, Université Mentouri- Constantine, Option-Géologie des substances utiles, pp.4
- [35] LAGOUAG Mohamed Yacine, (2014), ‘ Etude des lamproïtes du Nord-Est algérien’’, Thèse de magister, Université de Setif 1, Option- Géologie et Ressources Minérales, pp.28.
- [36] MOUSSAOUI N, (2011), ‘ Etude de la microsismicité de la region de kherrata’’, Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, Option-Sismologie, pp.5.
- [37] RPOA-2008 (Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d’art), Document technique règlementaire du Ministère des Travaux Publics, pp. 14-15.
- [38] Chenafa W. et M’zoughem K., [2006], «Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain el kebira (Sétif) », Mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du Diplôme d’ingénieur d’état en géologie, Université de Ferhat Abbas de Sétif, 68 pages.
- [39] Zhao J., [2008], «Mécanique et propriétés des massifs», part 2, cours de mécanique des roches, L’école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [40] A.N.A (Agence Nationale des Autoroutes), Rapport géologique et géotechnique du projet d’étude du tunnel d’Ait Yahia Moussa. Août-2016.
- [41] Jean-François SERRATRICE et Jean-Louis DURVILLE., «Description des roches et des massifs rocheux Exploitation de deux bases de données», bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 211 - septembre-octobre 1997 - réf. 4154 - pp. 73-87.
- Norme AFNOR la teneur en eau [NF P94- 050].
- Norme AFNOR Densité volumique humide [NF P94- 053].
- Norme AFNOR Densité volumique sèche [NF P94- 064].
- Norme AFNOR Densité volumique des grains solides [NF P94- 054].
- Norme AFNOR Essai au bleu de méthylène [NF P94 -068].
- Norme AFNOR Essai de compression uniaxiale [NF P 94-420].
- Norme AFNOR Essai de traction par flexion [NF P 18-407].

**Annexes**

**Annexe 01** : Caractérisation du massif suivant Q-système.

**Annexe 01.A** : Paramètre  $J_r$  (paramètre de rugosité des joints), (Barton et al. 1974).

(a) Epontes en contact (b) Epontes en contact après cisaillement de moins de 10 cm	$J_r$	(c) Epontes hors contact après cisaillement	$J_r$
Joints discontinus Joints ondulés, rugueux ou irréguliers Joints ondulés, lisses Joints ondulés, striés (lisses, luisants, polis) Joints plans, rugueux ou irréguliers Joints plans, lisses Joints plans, striés	4 3 2 1,5 1,5 1,0 0,5	Zone argileuse d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact  Zone sableuse, graveleuse ou broyée d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact	1,0
<b>Note:</b> (i) Les descriptions se réfèrent à des éléments de petites ou moyennes dimensions dans cet ordre.		<b>Note:</b> (i) Majorer la valeur de 1,0 si l'espacement moyen des joints de la famille principale est supérieur à 3m.  (ii) $J_r = 0,5$ si les joints plans et striés comportent des linéations orientées de telle sorte qu'elles peuvent amorcer une rupture.	

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

	Caractère du joint		Conditions	Ja
	<b>Epontes en contact</b>	Joints propres	Joint serré, recimenté	Remplissage de quartz, épidote,... etc.
Epontes non altérées			Pas d'enduit.	1
Epontes légèrement altérées			Enduit minéral non radoucissant, grains sans argile	2
Enduits ou remplissage		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 épaisses d'argile	10-13		

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

<b>Influence de l'eau en charge</b>	<b>Jw</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 JW en cas de mise en place d'un dispositif de drainage;

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

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

<b>Nombre de famille de diaclases</b>	<b>Jn</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 xJn 2. Pour un portail, utilisez 2 x Jn	

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

<b>Ouvrage recoupant des zones de faiblesse la Provoquant 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).	SFR=10		
	Zones de faiblesse individuelles, contenant de l'argile ou rocher décomposé chimiquement (profondeur de l'excavation <50m)	5		
	Zones de faiblesse individuelles, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement (profondeur de l'excavation >50m)	2,5		
	Nombreuses de zones de cisaillement en rocher sain, sans argile (toutes profondeurs)	7,5		
	Zones de cisaillement individuelles en rocher sain, sans argile (profondeur de l'excavation <50 m)	5		
	Zones de cisaillement individuelles en rocher rigide, sans argile (profondeur de l'excavation >50 m)	2,5		
	Joint ouverts, rocher très fracturé et décomprimé, "morceaux de sucre",... etc. (toutes profondeurs)	5		
Note:				
(i) Réduire l'indice SFR de 25% à 50 % si les zones de cisaillement influent sur l'excavation mais la traversent pas.				
		Sc/σc	σq/σc	SFR
Roche sain, problèmes de contraintes in situ	Contrainte faible, excavation peu profonde	>200	<0,01	2,5
	Contraintes moyennes	200-10	0,0 1-0,3	1
	Contrainte importante, structure très serré (condition normalement favorable à la stabilité mais peut être défavorable à la tenue des piédroits)	10-5	0,3-0,4	0,5-2
	Mouvement de toit modérer (rocher massif)	5-3	0,5-0,65	5-50
	Quelque chute de toit (rocher massif)	3-2	0,65-1	50-200
	Chutes de toit importantes (rocher massif)	<2	>1	200-400
Note:				
(ii) Si l'état de contraintes est fortement anisotrope : pour $5 < \sigma_1/\sigma_3 < 10$ , réduire $\sigma_c$ 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.				

			$\sigma\theta/\sigma C$	SFR
Rocher poussant	Déformation plastique du rocher sous l'action de fortes contraintes naturelles	Moyennes pressions	1-5	5-10
		Fortes pressions	>5	10-20
Rocher gonflant	Action chimique en fonction de la présence d'eau	Moyennes pressions		5-10
		Fortes pressions		10-15

## Annexe 02 :

Elancement d'une éprouvette cylindrique rapport entre la hauteur de l'éprouvette et son diamètre.

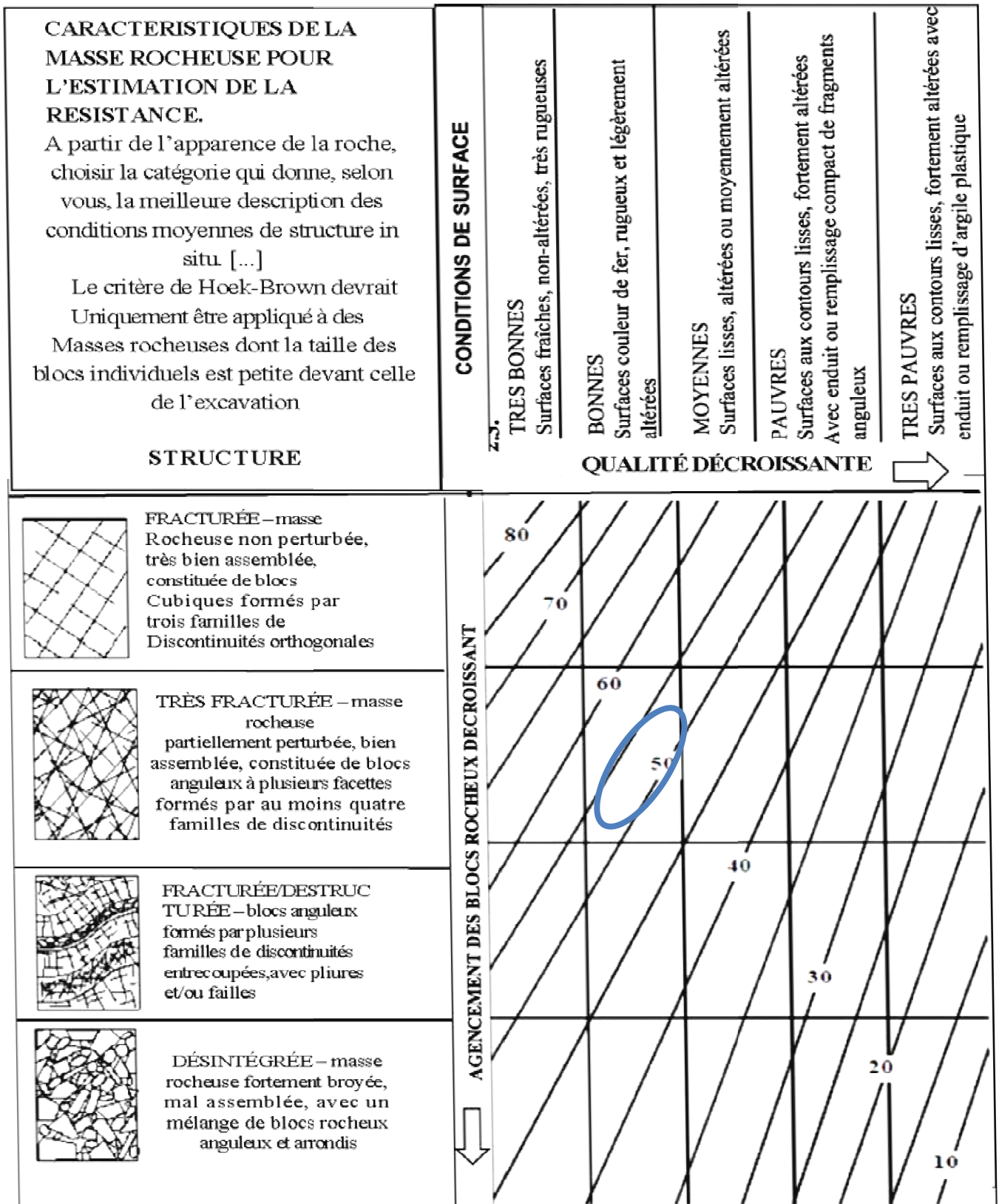
DIRECTION TECHNIQUE  
DEPARTEMENT LABORATOIRES  
LABORATOIRE MATERIAUX

La résistance à la compression d'un béton se mesure par compression de cylindres droits et d'une hauteur double de leur diamètre. Si cette dernière condition n'est pas remplie, la résistance obtenue sera divisée par un coefficient de correction donné dans le tableau ci-dessous :

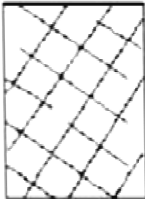
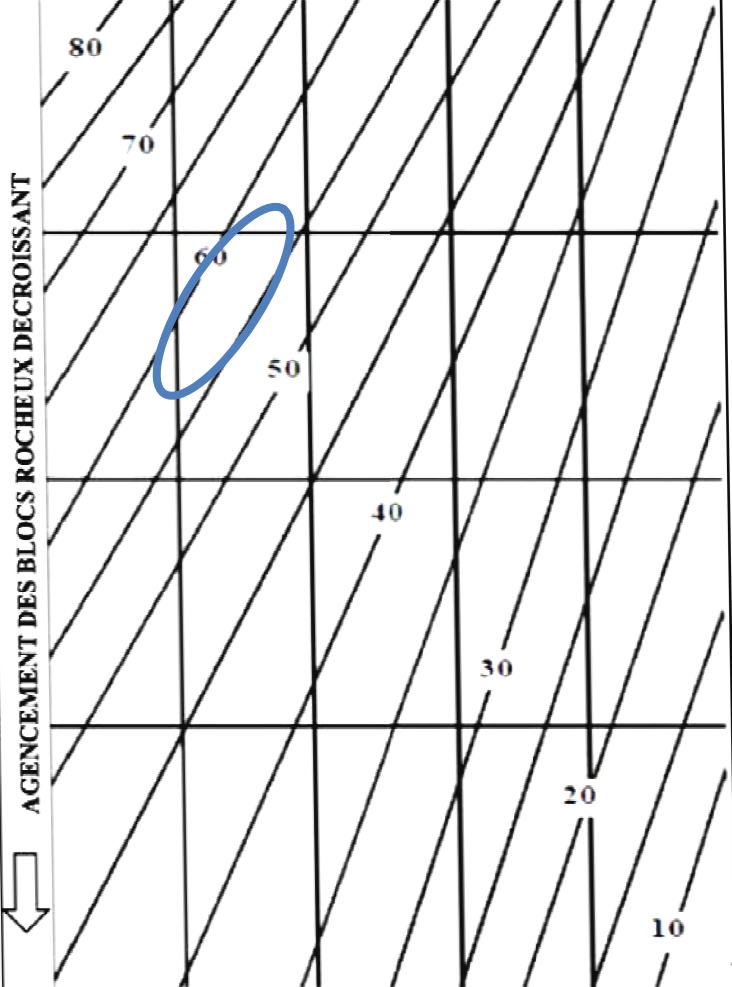



RAPPORT H / D	COEFFICIENT DE CORRECTION
De 2.78 à 2.55	0.95
De 2.54 à 2.40	0.96
De 2.39 à 2.27	0.97
De 2.26 à 2.16	0.98
De 2.15 à 2.05	0.99
De 2.04 à 1.95	1.00
De 1.94 à 1.87	1.01
De 1.86 à 1.80	1.02
De 1.79 à 1.74	1.03
De 1.73 à 1.68	1.04
De 1.67 à 1.62	1.05
De 1.61 à 1.57	1.06
De 1.56 à 1.52	1.07
De 1.51 à 1.47	1.08
De 1.46 à 1.42	1.09
De 1.41 à 1.38	1.10
De 1.37 à 1.33	1.11
De 1.32 à 1.29	1.12
De 1.28 à 1.25	1.13
De 1.24 à 1.21	1.14
De 1.20 à 1.17	1.15
De 1.16 à 1.14	1.16
De 1.13 à 1.11	1.17
De 1.10 à 1.09	1.18
De 1.08 à 1.07	1.19
De 1.06 à 1.04	1.20
De 1.03 à 1.02	1.21
De 1.01 à 1.00	1.22
De 0.99 à 0.98	1.23
De 0.97 à 0.95	1.24
De 0.94 à 0.93	1.25
De 0.92 à 0.91	1.26
De 0.90 à 0.90	1.27
De 0.89 à 0.88	1.28
De 0.87 à 0.86	1.29
De 0.85 à 0.85	1.30

**Annexe 03 : Caractérisation du massif suivant le GSI.**

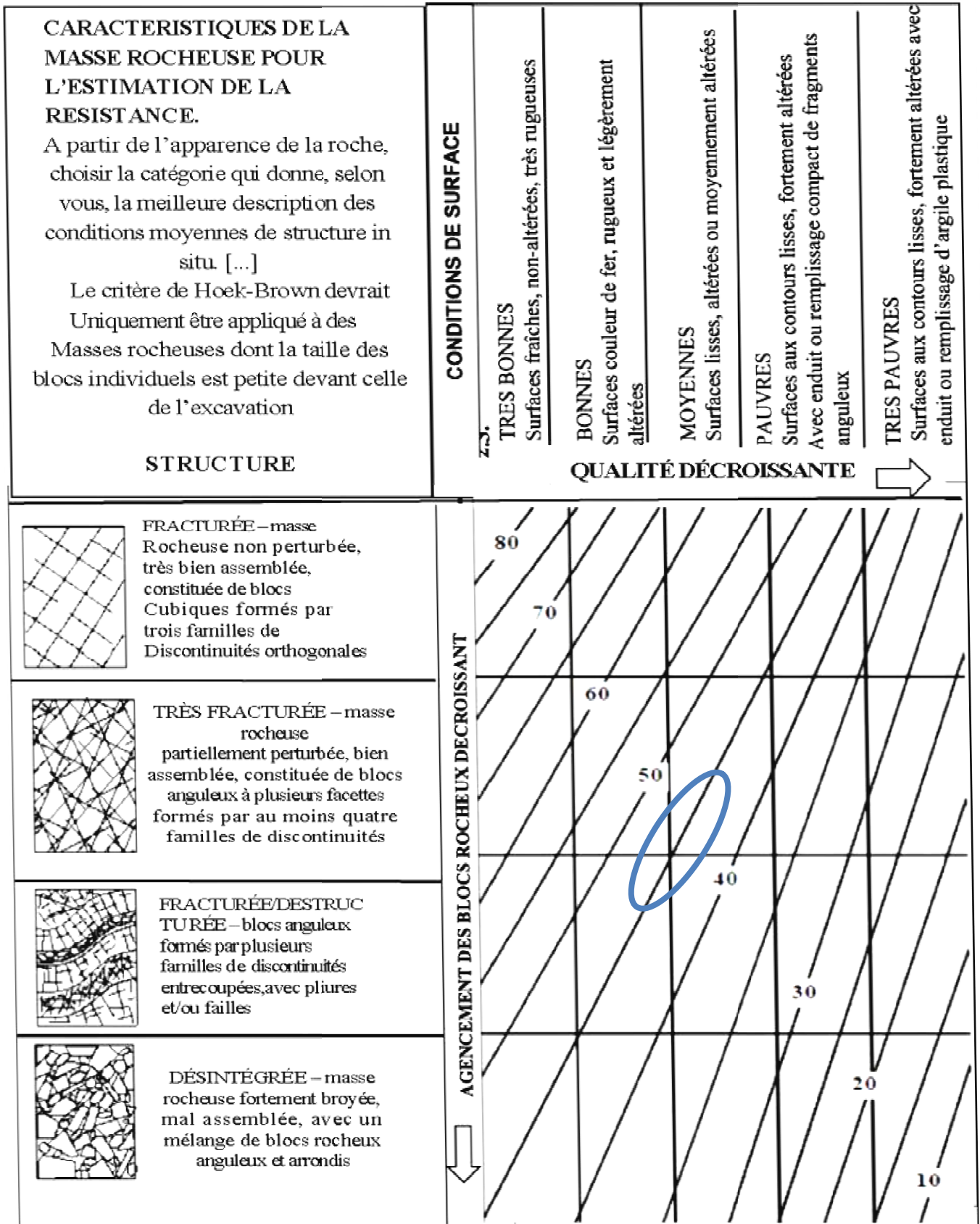
**Annexe 03.A : Couche des Micaschistes.**



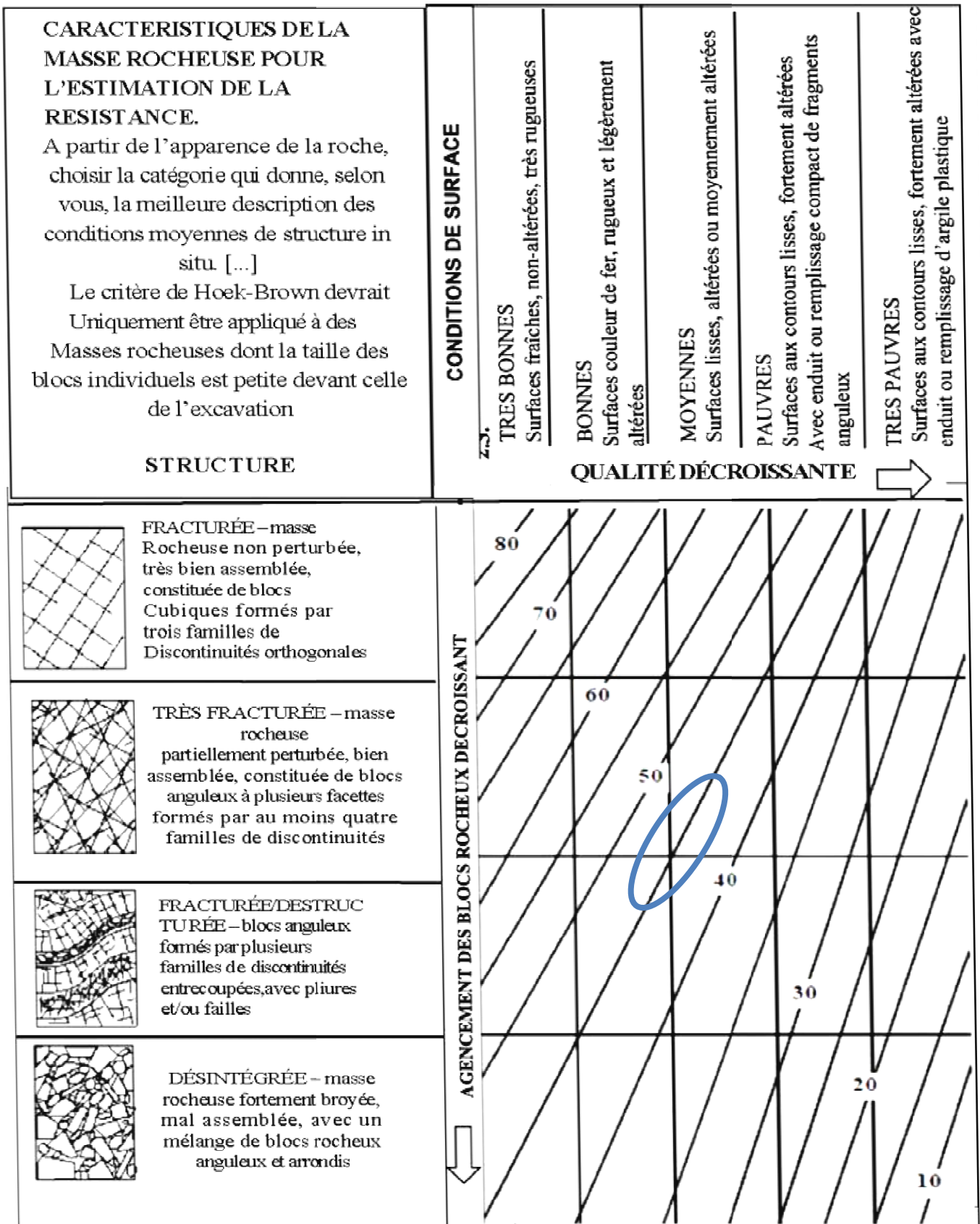
Annexe 03.B : Couche du Grès.

<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>QUALITÉ DÉCROISSANTE</b> →</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 DÉCROISSANT</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 familles de discontinuités</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 03.C : Couche du Calcaire.

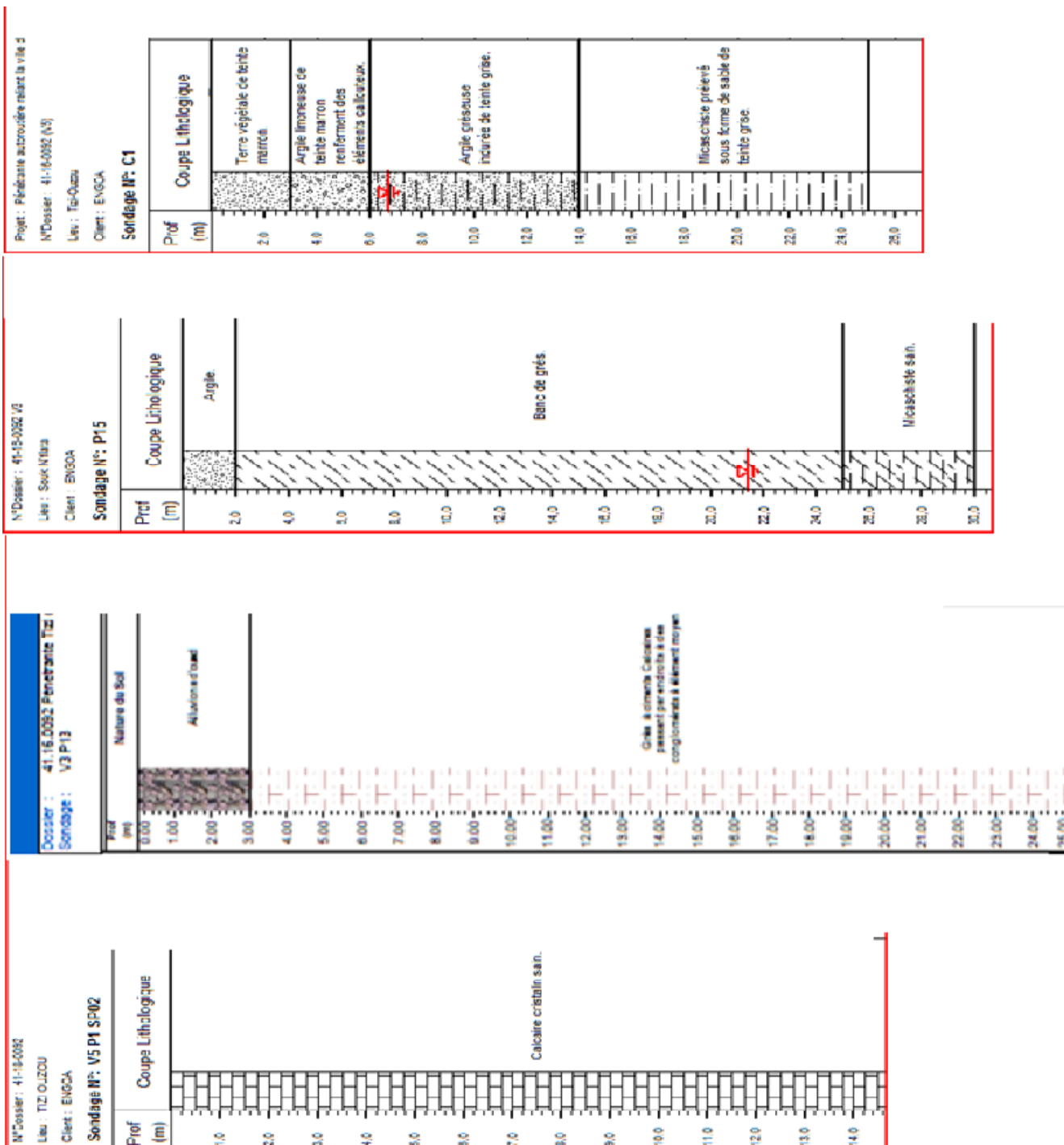


Annexe 03.D : Couche du Marbre.



**Annexe 04 :**

Coupes lithologiques des sondages carottés réalisés au niveau du terrain d'étude (PK13 au PK15).

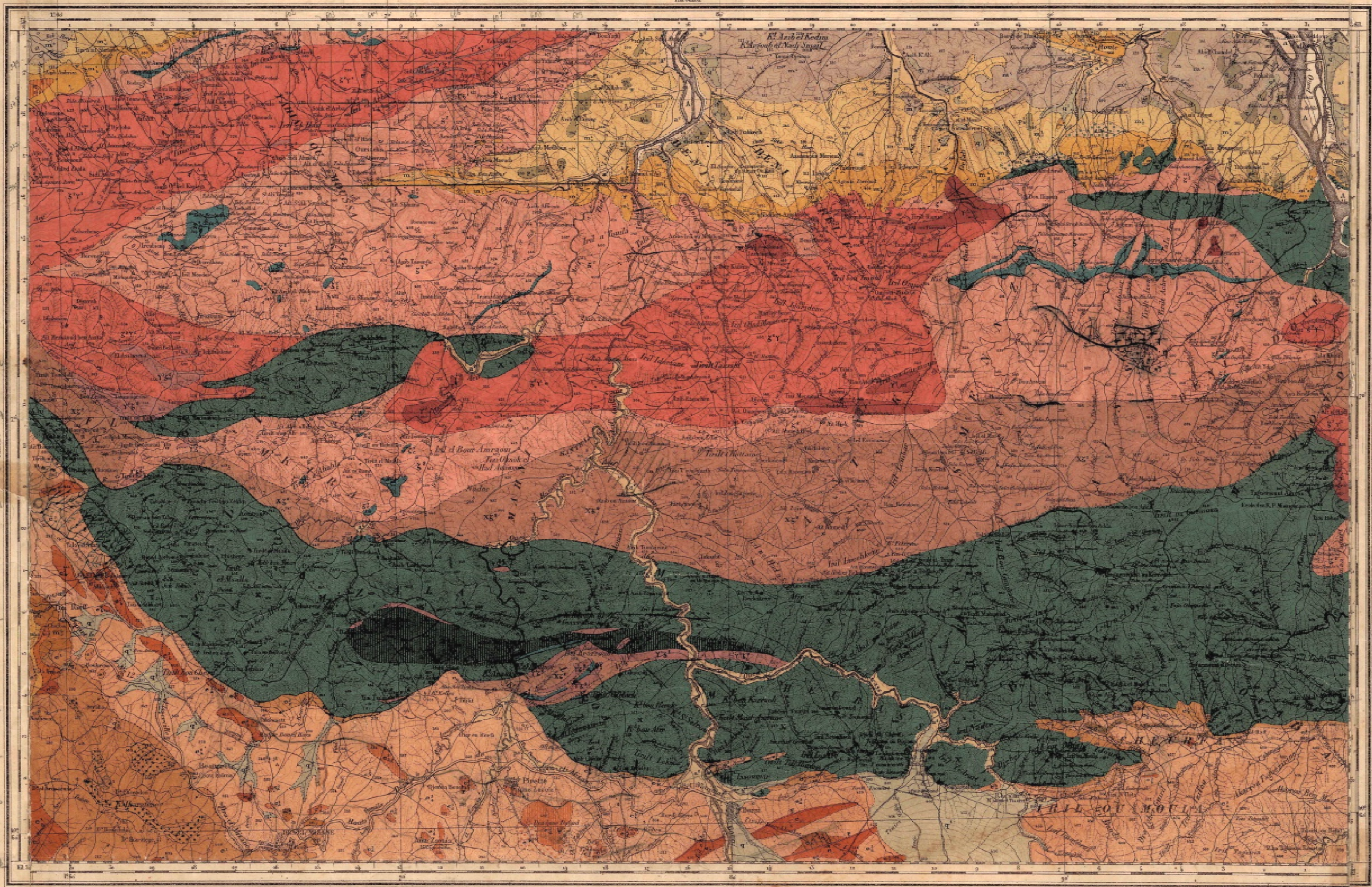


**Annexe 05:** Une sondeuse d'un carottier à prise d'échantillons sur le PK 15+550m.



Les explorations et travaux géologiques ont été commencés en 1894 à 1897 par M. P. Fournier, Professeur de Géologie à l'École des Sciences d'Alger, et continués de 1904 à 1906 par M. A. Sarrasin, Professeur de Géologie à l'École des Sciences d'Alger. Cette carte géologique a été dressée par M. Sarrasin, sous la direction de M. P. Fournier. Elle a été publiée en 1906 par le Service Géologique de l'Algérie. Le format est de 1 mètre sur 1 mètre.

- TERRAINS RÉGIONNAUX**
- A
  - al
  - q
  - q<sup>1</sup>
  - q<sup>2</sup>
  - q<sup>3</sup>
  - q<sup>4</sup>
  - q<sup>5</sup>
  - q<sup>6</sup>
  - q<sup>7</sup>
  - q<sup>8</sup>
  - q<sup>9</sup>
  - q<sup>10</sup>
  - q<sup>11</sup>
  - q<sup>12</sup>
  - q<sup>13</sup>
  - q<sup>14</sup>
  - q<sup>15</sup>
  - q<sup>16</sup>
  - q<sup>17</sup>
  - q<sup>18</sup>
  - q<sup>19</sup>
  - q<sup>20</sup>
  - q<sup>21</sup>
  - q<sup>22</sup>
  - q<sup>23</sup>
  - q<sup>24</sup>
  - q<sup>25</sup>
  - q<sup>26</sup>
  - q<sup>27</sup>
  - q<sup>28</sup>
  - q<sup>29</sup>
  - q<sup>30</sup>
  - q<sup>31</sup>
  - q<sup>32</sup>
  - q<sup>33</sup>
  - q<sup>34</sup>
  - q<sup>35</sup>
  - q<sup>36</sup>
  - q<sup>37</sup>
  - q<sup>38</sup>
  - q<sup>39</sup>
  - q<sup>40</sup>
  - q<sup>41</sup>
  - q<sup>42</sup>
  - q<sup>43</sup>
  - q<sup>44</sup>
  - q<sup>45</sup>
  - q<sup>46</sup>
  - q<sup>47</sup>
  - q<sup>48</sup>
  - q<sup>49</sup>
  - q<sup>50</sup>



- TERRAINS ADJACENTS**
- X
  - X<sup>1</sup>
  - X<sup>2</sup>
  - X<sup>3</sup>
  - X<sup>4</sup>
  - X<sup>5</sup>
  - X<sup>6</sup>
  - X<sup>7</sup>
  - X<sup>8</sup>
  - X<sup>9</sup>
  - X<sup>10</sup>
  - X<sup>11</sup>
  - X<sup>12</sup>
  - X<sup>13</sup>
  - X<sup>14</sup>
  - X<sup>15</sup>
  - X<sup>16</sup>
  - X<sup>17</sup>
  - X<sup>18</sup>
  - X<sup>19</sup>
  - X<sup>20</sup>
  - X<sup>21</sup>
  - X<sup>22</sup>
  - X<sup>23</sup>
  - X<sup>24</sup>
  - X<sup>25</sup>
  - X<sup>26</sup>
  - X<sup>27</sup>
  - X<sup>28</sup>
  - X<sup>29</sup>
  - X<sup>30</sup>
  - X<sup>31</sup>
  - X<sup>32</sup>
  - X<sup>33</sup>
  - X<sup>34</sup>
  - X<sup>35</sup>
  - X<sup>36</sup>
  - X<sup>37</sup>
  - X<sup>38</sup>
  - X<sup>39</sup>
  - X<sup>40</sup>
  - X<sup>41</sup>
  - X<sup>42</sup>
  - X<sup>43</sup>
  - X<sup>44</sup>
  - X<sup>45</sup>
  - X<sup>46</sup>
  - X<sup>47</sup>
  - X<sup>48</sup>
  - X<sup>49</sup>
  - X<sup>50</sup>
- TERRAINS ÉPIZOÏQUES**
- T
  - T<sup>1</sup>
  - T<sup>2</sup>
  - T<sup>3</sup>
  - T<sup>4</sup>
  - T<sup>5</sup>
  - T<sup>6</sup>
  - T<sup>7</sup>
  - T<sup>8</sup>
  - T<sup>9</sup>
  - T<sup>10</sup>
  - T<sup>11</sup>
  - T<sup>12</sup>
  - T<sup>13</sup>
  - T<sup>14</sup>
  - T<sup>15</sup>
  - T<sup>16</sup>
  - T<sup>17</sup>
  - T<sup>18</sup>
  - T<sup>19</sup>
  - T<sup>20</sup>
  - T<sup>21</sup>
  - T<sup>22</sup>
  - T<sup>23</sup>
  - T<sup>24</sup>
  - T<sup>25</sup>
  - T<sup>26</sup>
  - T<sup>27</sup>
  - T<sup>28</sup>
  - T<sup>29</sup>
  - T<sup>30</sup>
  - T<sup>31</sup>
  - T<sup>32</sup>
  - T<sup>33</sup>
  - T<sup>34</sup>
  - T<sup>35</sup>
  - T<sup>36</sup>
  - T<sup>37</sup>
  - T<sup>38</sup>
  - T<sup>39</sup>
  - T<sup>40</sup>
  - T<sup>41</sup>
  - T<sup>42</sup>
  - T<sup>43</sup>
  - T<sup>44</sup>
  - T<sup>45</sup>
  - T<sup>46</sup>
  - T<sup>47</sup>
  - T<sup>48</sup>
  - T<sup>49</sup>
  - T<sup>50</sup>

Echelle 1/50 000

LÉGENDE TECHNIQUE

Matérialurgie	Matériaux de Construction	Matériaux d'ornement	Matériaux d'empiècement	Briqueteries
$\frac{h}{x}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{x^2}{x}$ Ardoises (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{h}{x}$ Grès (Oued d'Alger)
$\frac{h}{x}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{h}{x}$ Grès (Oued d'Alger)
$\frac{h}{x}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{h}{x}$ Grès (Oued d'Alger)
$\frac{h}{x}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{v}{m^2}$ Grès (Oued d'Alger)	$\frac{h}{x}$ Grès (Oued d'Alger)