



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département des Mines et géologie

# *Memoire de Fin d'Etudes*

En vue de l'obtention du Diplôme de Master  
Option : Exploitation minière

*Présenté par*

M<sup>r</sup> LAMAMRA ABDESSATTAR  
M<sup>r</sup> MAMMERIE MOHAMED

## **Thème**

**La Caractérisation du massif rocheux de la mine de  
Boukhadra (wilaya de Tébessa)**

Soutenu le 02 /07 /2015 devant le jury composé de:

Présidente:	M <sup>r</sup> AKDIM.A	M.A.A	U.A.M.B
Encadreur:	M <sup>me</sup> KAMLI.O	M.A.A	U.A.M.B
Examineur:	M <sup>r</sup> GUELMAMI.A	M.A.B	U.A.M.B

*Année Universitaire: 2014-2015*





# Dédicace



*Je dédie ce mémoire de fin d'étude à :*

*A mes très chers parents,*

*A mes grands parents.*

*Mes frères : taïa, idric, yasine, S, A.*

*Et les familles lamamra*

*A mes oncles, mes tantes et tous mes cousins et cousines.*

*A tous mes amis :*

*Djalal, hmida, mohamed, hicham,*

*Et à tous ceux que j'aime et m'aime.*

*Et enfin à tous ceux que j'ai partagés avec eux les  
meilleurs moments de ma vie*

*l.Abdessattar*





# Dédicace



*Je dédie ce mémoire de fin d'étude à :*

*A mes très chers parents.*

*A mes grands parents.*

*Mes frères : oussama, mokhtar amine*

*Et les familles Mammerie*

*A mes oncles, mes tantes et tous mes cousins et cousines.*

*A tous mes amis :*

*Djalal, oussama, reyad, abderaouf.*

*Et à tous ceux que j'aime et m'aime.*

*Et enfin à tous ceux que j'ai partagés avec eux les  
meilleurs moments de ma vie*

*M, Mammerie*



## *Remerciements*

*Nous exprimons notre plus grande gratitude envers Madame kAMLI, notre promotrice. Enseignante à l'université de Bejaia pour l'opportunité qu'elle nous a donnée en travaillant avec elle. Nous avons apprécié sa rigueur qui a guidé notre encadrement ainsi que la discussion et la correction de ce manuscrit*

*Nous sommes sensibles à l'honneur que nous fait Mr AKDIM, Enseignant à l'université de Bejaia, d'avoir accepté de présider le jury*

*Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur GUELMAMI, enseignant à l'université de Bejaia pour tout l'intérêt qu'il a porté à notre travail en acceptant d'examiner ce travail.*

*Nous avons un grand plaisir à remercier les enseignants du département Mines et Géologie, université de Bejaia.*

*Nous tenons également à remercier le personnel C.T.T.P spécialement ainsi que tout le personnel de C.E.T.I.M*

*Nous tenons à remercier enfin les membres de nos deux familles respectives, nos amis pour leur présence et leurs encouragements.*

---

---

## Sommaire

Introduction générale .....	1
Chapitre I : Généralités sur les massifs rocheux et mouvements de terrains	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Les terrains en géotechnique .....	2
I.2.1. Les roches .....	2
I.2.2. Les sols .....	2
I.2.3. Les différences entre « roche » et « sol » .....	2
I.3. Les massifs rocheux .....	3
I.3.1. Contexte géologique et hydrogéologique d'un massif rocheux .....	3
I.3.2. Méthodes d'observation .....	4
I.3.2.1. Par affleurement .....	4
I.3.2.2. Par forage .....	4
I.3.3. Classification des massifs rocheux .....	4
I.3.4. Description de la matrice rocheuse .....	5
I.3.4.1. du groupe original .....	5
I.3.4.2- de la structure .....	6
I.3.4.3- de la granulométrie .....	6
I.3.4.4- de la composition minéralogique .....	6
I.3.5- Description des discontinuités .....	6
I.3.5.1- Classification des discontinuités .....	7
I.3.5.2- Caractéristiques des discontinuités .....	7
I.4- Les mouvements de terrain .....	9
I.4.1. Les glissements .....	10
I.4.1.1. Rupture plane .....	10
I.4.1.2. Rupture circulaire ou rotationnelle .....	11
I.4.1.3. Rupture en dièdres .....	13
I.4.1.4. Rupture par basculement .....	14
I.4.2. Les coulées .....	15
I.4.3. Les écroulements .....	15
I.4.4. Le fluage .....	16
I.6. Conclusion .....	16

---

---

## Chapitre II : propriétés physico-mécaniques des roches

II.1. Introduction .....	17
II.2. Les propriétés physiques des roches.....	17
II.2.1. La porosité .....	17
II.2.2. La masse volumique .....	18
II.2.3. La teneur en eau .....	18
II.2.4. Le degré de saturation.....	18
II.2.5. La dureté .....	19
II.2.6. Le degré de fissuration des roches.....	20
II.2.7- Caractérisation du massif par le RQD .....	21
II.2.8. Module de Young .....	21
II.2.9. L'abrasivité.....	22
II.2.10. L'altérabilité .....	23
II.3. Les propriétés mécaniques des roches .....	23
II.3.1. Définition de la rupture de sol et roche .....	23
II.3.2. Critère de Mohr Coulomb .....	24
II.3.3. Critère de Hoek et Brown .....	24
II.3.4. La cohésion et l'angle du frottement interne .....	27
II.3.5. La résistance à la compression .....	28
II.3.6. La résistance à la traction .....	29
II.3.6.1. Traction directe .....	29
II.3.6.2. Traction indirecte .....	30
II.3.7. La résistance au cisaillement .....	31
II.3.7.1. Cisaillement direct .....	31
II.3.7.2. Cisaillement simple .....	32
II.3.7.3. Cisaillement triaxial .....	33
II.3.8. La résistance à la fragmentation .....	34
II.3.9. La résistance à l'usure .....	35
II.4. Conclusion .....	36

---



---

## CHAPITRE III : Conditions géologiques et minières de la mine de Boukhadra

III.1. Introduction .....	37
III.2. Historique de la mine .....	37
III.3. Conditions géologiques .....	37
III.3.1. Situation géographique du gisement de Boukhadra .....	37
III.3.2. Géologie régionale .....	38
III.3.2.1. Stratigraphie et lithologie .....	38
III.3.3. Tectonique du gisement .....	39
III.3.4. Morphologie du gisement .....	40
III.3.5. Caractéristiques hydrogéologiques du gisement .....	41
III.4. Conditions minières .....	41
III.4.1. Les réserves géologiques .....	41
III.4.1.1. à ciel ouvert .....	41
III.4.2. Régime de travail .....	42
III.4.3. Méthode d'exploitation .....	42
III.4.3.1. Eléments du système d'exploitation .....	42
III.4.4. Chargement et transport .....	45
III.4.4.1. Chargement au niveau de la mine de Boukhadra .....	45
III.4.4.2. Equipement de transport utilisé dans la mine de Boukhadra .....	46
III.4. Conclusion .....	46

## Chapitre IV: Déterminatin des propriétés physico-mécanique du massif de Boukhadra

IV.1. Introduction .....	47
IV.2. Détermination des propriétés physiques .....	47
IV.2.1. Masse volumique réelle (MVR) .....	47
IV.2.2. Masse volumique imbibée (MVI) .....	47
IV.2.3. Le poids volumique sec .....	47
IV.2.4. Le poids volumique humide .....	48
IV.2.5. L'indice d'altération .....	49
IV.2.6. La porosité .....	49
IV.2.7. Le degré de saturation .....	50
IV.2.8. Fissuration des roches .....	50

---



---

---

IV .2.9. Module de Young .....	51
IV .3. Détermination des propriétés mécaniques des échantillons .....	51
IV .3.1. Résistance à la compression .....	52
IV.3.2. Résistance à la traction indirecte (essai brésilien) .....	52
IV.3.3. Cohésion et angle de frottement interne .....	53
IV .4. Détermination des caractéristiques mécaniques du massif rocheux .....	53
IV.4.1. Coefficient d'affaiblissement structural du massif rocheux .....	54
IV.4.2. Le coefficient de diminution de la valeur de l'angle de frottement interne .....	54
IV.4.3. Détermination de la cohésion du massif rocheux .....	55
IV.4.4. Détermination de l'angle de frottement interne du massif rocheux .....	55
IV.5. Les paramètres physiques de différentes formations dans Boukhadra .....	55
IV.6. Les Paramètres mécaniques pour chaque roche .....	56
IV.6.1. la cohésion et l'angle de frottement interne de calcaire .....	56
IV.7. Désignation de la qualité de la roche (RQD) .....	59
IV.8. Interprétation des résultats .....	59
IV.9. Conclusion .....	60
Conclusion générale .....	61
Références bibliographiques	
Annexes	

## Liste des figures

<b>Figure I.1- (a)</b> : classification géométrique des massifs rocheux.....	5
<b>Figure I.1-(b)</b> : illustration de pendage et de l'azimut d'une discontinuité. .	8
<b>Figure I.2-</b> modèle d'un glissement plan des roches et des sols..	11
<b>Figure I.3-</b> modèle d'un glissement circulaire simple.....	11
<b>Figure I.4-</b> Exemples de rupture circulaire .....	12
<b>Figure I.5-</b> modèle des glissements circulaires successifs emboîtés.....	12
<b>Figure I.6</b> : Rupture d'un dièdre (les fissures naturelles sont hachurées)..	13
<b>Figure I.7-</b> Exemples de rupture de dièdres .....	13
<b>Figure I.8-</b> Rupture par basculement (1). .....	14
<b>Figure I.8-</b> Rupture par basculement (2)..	14
<b>Figure I.9-</b> Coulée de boue .....	15
<b>Figure I.10-</b> L'écroulement .....	15
<b>Figure I.11-</b> Le fluage. ....	16
<b>Figure II.1</b> - Diagramme contrainte-déformation..	21
<b>Figure II.2</b> - Abrasimètre LCPC : palette métallique (après essai) et pot de granulats. ....	23
<b>Figure II.3</b> - Rupture d'un sol .....	23
<b>Figure II.4</b> - Les contraintes provoquant la rupture. ....	23
<b>Figure II.5</b> - Représentation de la droite de Mohr-Coulomb. ....	24
<b>Figure II.6</b> - Ajustement du critère linéaire de Mohr-Coulomb au critère non-linéaire de Hoek et Brown, d'après Hoek et Brown (1997). ....	27
<b>Figure II.7</b> - Courbe représentative de $\sigma_c$ en fonction de $\sigma_3$ .....	28
<b>Figure II.8</b> - Dispositif expérimental .....	29
<b>Figure II.9</b> - Schéma de la Compression uniaxiale .....	29
<b>Figure II.10</b> - Essai de traction directe.....	30
<b>Figure II.11</b> - Dispositif expérimental (Essai Brésilien) .....	31
<b>Figure II.12</b> - Schéma de la Traction indirecte .....	31
<b>Figure II.13</b> - Cisaillement direct à la boîte de Casagrande.....	32
<b>Figure II.14</b> - Principe du cisaillement simple.....	33
<b>Figure II.15</b> - Principe de l'essai Triaxial. ....	33
<b>Figure II.16</b> - appareil triaxial.....	34
<b>Figure II.17</b> - Principe de l'essai Los Angeles.....	34
<b>Figure II.18</b> - Machine Los Angeles (le diamètre du tambour est d'environ 71 cm). ....	35

<b>Figure II.19</b> - Appareil Micro Deval.....	36
<b>Figure II.20</b> - Tambour avec billes en acier .....	36
<b>Figure III.1</b> - Situation géographique de la mine de Boukhadra .....	38
<b>Figure III.2</b> - Structure stratigraphique du Djebel de Boukhadra.....	38
<b>Figure III.3</b> - Interprétation géologique du DJ.Boukhadra.....	40
<b>Figure III.4</b> - Eléments du système d'exploitation.....	43
<b>Figure IV.1</b> - Courbe d'écrasement d'éprouvette par la compression. ....	52
<b>Figure IV.2</b> - Enveloppe de rupture par cisaillement selon le critère de Hoek et Brown. ....	58

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Principales classes de déstabilisation sur les versants en fonction des terrains concernés (d'après Campy M., Macaire J.J., 2003). .....	16
<b>Tableau II.1</b> : Echelle de dureté de Mohs .....	19
<b>Tableau II.2</b> : Classification des discontinuités selon ID .....	20
<b>Tableau II.3</b> : Donne la classification de roche selon la valeur de RQD .....	21
<b>Tableau II.4</b> : Durée de vie (mesurée en mètre foré) d'un taillant de forage en fonction de l'abrasivité des roches .....	22
<b>Tableau II.5</b> : Critères de comportement des massifs rocheux (d'après Hoek et Brown) .....	25
<b>Tableau II.6</b> : Classification des roches en fonction de la résistance à la compression .....	29
<b>Tableau II.7</b> : Classification des roches en fonction de la résistance à la traction .....	31
<b>Tableau III.1</b> : Corps minéralisés de Boukhadra .....	40
<b>Tableau III.2</b> : La répartition en temps de production du minerai de fer .....	42
<b>Tableau III.3</b> : Régime de travail de la mine du Boukhadra .....	42
<b>Tableau III.4</b> : Caractéristiques techniques de chariot de forage MERCUR .....	44
<b>Tableau III.5</b> : Caractéristiques techniques de chargeuse ATLAS COPCO .....	46
<b>Tableau III.6</b> : Caractéristiques techniques du camion ATLAS COPCO .....	46
<b>Tableau IV.1</b> : Valeur typiques de poids volumiques et des caractéristiques mécaniques de certains types de roches (d'après Hoek and Bray 1981) .....	49
<b>Tableau IV.2</b> : Intervalles de porosité de plusieurs roches communes (d'après Farmer E, 1968 ; In Winkler E.M, 1994). .....	50
<b>Tableau. IV.3</b> : Classification selon Le module de young .....	51
<b>Tableau IV.4</b> : La valeur de la Résistance à la compression .....	52
<b>Tableau IV.5</b> : La valeur de la Résistance à la traction (brésilien). .....	53
<b>Tableau. IV.6</b> : les Valeurs obtenues de ( $C_{ech}$ ) et ( $\sigma_{ech}$ ).....	53
<b>Tableau IV.7</b> : Coefficient « a » en fonction de la cohésion C .....	54
<b>Tableau IV.8</b> : Cohésion $C_m$ et angle de frottement interne $\phi_m$ de massif rocheux .....	55
<b>Tableau IV.9</b> : Les paramètres physiques de différentes formations dans Boukhadra .....	55
<b>Tableau IV.10</b> : Les valeurs de la résistance à (compression , traction ) de calcaire et marneet minerai dans le djébel de Boukhadra .....	56
<b>Tableau IV 11</b> : les valeurs de ( ) en fonction de ( n ) .....	57
<b>Tableau IV.12</b> : Cohésion et angle du frottement interne de chaque roche .....	58
<b>Tableau IV.13</b> : les valeurs de RQD de massif rocheux de Boukhadra .....	59

## Liste des symboles

- $\rho_s$  : la masse volumique des grains solides.  
 $\rho_h$  : la masse volumique naturelle.  
 $\rho_d$  : la masse volumique sèche.  
 $\rho_{sat}$  : la masse volumique saturée.  
 $\gamma_s$  : le poids volumique des grains solides.  
 $\gamma_h$  : le poids volumique naturel.  
 $\gamma_d$  : le poids volumique sec.  
 $\gamma_{sat}$  : le poids volumique saturé.  
 $c$  : la résistance au cisaillement.  
 $\sigma_N$  : la contrainte normale.  
 $\phi$  : l'angle de frottement interne du sol.  
 $\sigma'$  : la contrainte effective,  
 $\alpha_g$  : l'angle général du gradin.  
 $\alpha_T$  : l'angle général du talus.

## Liste d'abréviation

- $V_t$  : le volume total.  
 $V_v$  : le volume des vides.  
 $V_w$  : volume de l'eau.  
 $V_s$  : le volume des grains solides.  
P : la porosité.  
 $M_s$  : la masse du matériau sec.  
 $M_h$  : la masse naturelle.  
 $M_{sat}$  : la masse saturée.  
 $M_a$  : masse imbibée pesée dans l'eau.  
 $M_{vr}$  : masse volumique réelle.  
 $M_{vi}$  : masse volumique imbibée.  
 $M_T$  : la masse totale.  
 $M_s$  : la masse sèche des grains solides.  
 $M_w$  : la masse d'eau.  
W : la teneur en eau.  
ID : l'indice de discontinuité du massif rocheux.  
E : module de Young.  
C : la cohésion du sol.  
 $R_c$  : la résistance à la compression.  
 $R_T$  : la résistance à la traction.  
 $S_r$  : le degré de saturation.  
MDE : le coefficient Micro Deval.  
 $H_g$  : la hauteur du gradin.  
 $L_{tr}$  : la profondeur du trou.  
 $L_s$  : la sous foration.  
LB : la longueur du bloc LB.  
 $N_t$  : le nombre de trous.  
I : l'indice d'altération.  
 $L_{ch}$  : la longueur de la charge.  
 $V_B$  : volume des roches à abattre.  
 $A_{BR}$  : l'indice d'abrasivité du matériau ou bien du sol.  
BK : Boukhadra

## Introduction générale :

La modification des talus et des versants naturels est l'un des mécanismes de leur déstabilisation, les gigantesques mines à ciel ouvert et souterraines existantes actuellement dans le monde, présentent une des causes directes de cette modification par l'extraction des millions de mètres cubes de minerais et de roches et plusieurs impacts (environnementaux, socio-économiques...) dus à cette extraction.

La caractérisation d'un massif dans les mines, est une approche importante pour mettre des remèdes aux problèmes de stabilité soit des talus des mines à ciel ouvert ou des toits des galeries des mines souterraines, avec la profondeur très importante des mines modernes, un changement de caractéristiques des massifs dans les mines influe directement sur :

- ✓ l'augmentation ou diminution des quantités du minerai extraites.
- ✓ la stabilité à long terme des ouvrages miniers.

La caractérisation d'un massif lors d'une exploitation à ciel ouvert ou souterraine nécessite une identification détaillée de tous les facteurs géologiques et géotechniques du massif en question, les conditions tectoniques, les propriétés physiques et mécaniques des roches, la fracturation du massif, la situation hydrogéologique, etc.

Ce présent mémoire fournit une caractérisation du massif de la mine de Boukhadra (minerai et stériles) structuré suivant le plan :

- ✓ généralités sur les massifs rocheux et les mouvements de terrains.
- ✓ Les propriétés physico-mécaniques des roches.
- ✓ Conditions géologiques et minières de la mine de Boukhadra.
- ✓ Estimation pratique des caractéristiques physico-mécaniques du massif (minerai et stériles) de la mine de Boukhadra d'après : L'identification au laboratoire des propriétés physiques et l'identification des propriétés mécaniques d'après des essais mécaniques de base et des calculs empiriques.

# Chapitre 01

Généralités sur les massifs rocheux et mouvements de terrains

## Chapitre I : Généralités sur les massifs rocheux et mouvements de terrains

### I.1-Introduction :

La reconnaissance des massifs rocheux permet de comprendre les problèmes qui peuvent se poser lors de l'étude d'un projet minier ou de construction. L'identification des propriétés d'un terrain constitue le lien entre la cause d'un sinistre et les remèdes que l'on propose de mettre en place.

### I.2-Les terrains en géotechnique :

En géotechnique, un terrain peut être une roche, un sol ou en un géomatériau intermédiaire entre les roches et les sols, des matériaux de transition entre sols et roches nommés SIRT (sols indurés et roches tendres comme les marnes). [1]

#### I.2.1-Les roches :

En géotechnique, une roche est un agrégat naturel massif de matière minérale. En géologie, on appelle roche tout élément constitutif de l'écorce terrestre, cela recouvre donc les roches au sens géotechnique, mais aussi le sol, le pétrole, l'eau des nappes, etc. [2]

#### I.2.2-Les sols :

Un sol est un mélange de particules minérales et organiques, d'êtres vivants, d'eau et d'air. Parmi les particules minérales, on trouve du quartz, des micas, des feldspaths, des argiles, etc. [2]

#### I.2.3-Les différences entre « roche » et « sol » :

Les praticiens de la mécanique générale diront avec une certitude et un certain dédain que travailler sur les roches et les sols, c'est bonnet-blanc et blanc-bonnet, cet argument maintes fois entendu montre une réelle méconnaissance des géomatériaux. Il convient tout d'abord de bien différencier ce que nous appellerons par la suite roches et sols, voici une définition d'origine mécanique [3] :

- a- Roches : Géomatériaux possédant une cohésion ( $C > 0$ ) et une résistance à la compression simple supérieure à 20 MPa.
- b- Sols : Géomatériaux pulvérulents ou cohésifs mais ne présentant pas en pratique de résistance à la compression simple et la cohésion disparaît par dissolution.
- c- La règle plus générale veut que l'on désigne par roches les terrains profonds et par sols les terrains de surface.

- d- Certaines roches, telles les marnes à faible % de CaCO<sub>3</sub> ou les granites très fracturés et altérés sont inclassables, leurs comportement au cours de la recherche, n'est ni celui d'un sol ni celui d'une roche classique.

On conçoit donc que la limite entre un sol et une roche altérée ne soit pas définie nettement. Le sol est un matériau meuble, ce caractère étant fondamental. Il ne suffit cependant pas à définir un sol naturel car certains matériaux produits par l'homme présentent aussi ce caractère. Par exemple les sous produits miniers et les granulats concassés (sable, gravier, ballast...) sont aussi des matériaux meubles. Le mécanicien des sols étudie donc aussi bien des sols naturels que des matériaux fabriqués artificiellement à partir de sols ou de roches et présentant un caractère meuble. [3]

### **I.3-Les massifs rocheux :**

Dans la présente étude on s'intéresse beaucoup plus aux 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. [4]

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.[4]

#### **I.3.1-Contexte géologique et hydrogéologique d'un massif rocheux :**

La connaissance du cadre géologique général dans lequel se situe le massif est nécessaire pour expliquer sa structure et la nature de la roche (unités géologiques concernées par le projet, relations entre elles, principaux accidents, histoire tectonique, etc..).

La description des conditions hydrogéologiques des discontinuités étant généralement associée à l'étude structurale du massif, il est également nécessaire de connaître le contexte hydrogéologique général : identification des aquifères et de leur mode de fonctionnement (type de perméabilité, conditions d'alimentation, exutoires, etc..).

Si la géologie générale du site est mal connue, une étude détaillée peut être nécessaire, utilisant les différents outils et méthodes de la géologie : levés de terrain, cartographie, recueil de données hydrogéologiques, interprétation de photographies, imagerie géophysique, sondages, puits et galeries de reconnaissance.

Pour l'étude structurale, il est parfois nécessaire de segmenter le massif étudié en sous-ensembles homogènes. [4]

### **I.3.2- Méthodes d'observation :**

En ingénierie des roches, on cherche à caractériser des volumes rocheux dont les dimensions sont comparables à celles des ouvrages envisagés (de quelques mètres à quelques hectomètres). Comme il est impossible d'observer directement de tels volumes dans les trois dimensions, les observations s'effectuent sur des parties visibles de la surface du massif (affleurements) ou grâce à des sondages, galeries ou puits de reconnaissance. Ces "échantillons" de massif rocheux doivent englober un nombre suffisant de discontinuités pour en comprendre l'organisation. Les informations suivantes, décrivant les conditions d'échantillonnage que doivent être relevées. [4]

#### **I.3.2.1- Par affleurement :**

- ✓ Nature de l'affleurement : naturel (falaise, lit d'une rivière, roche moutonnée, etc..) ou artificiel (talus de déblai réalisé à l'explosif, sondage à pelle mécanique, etc..).
  - ✓ Représentativité : situation géographique et géologique, dimensions, pente, orientation.
- [4]

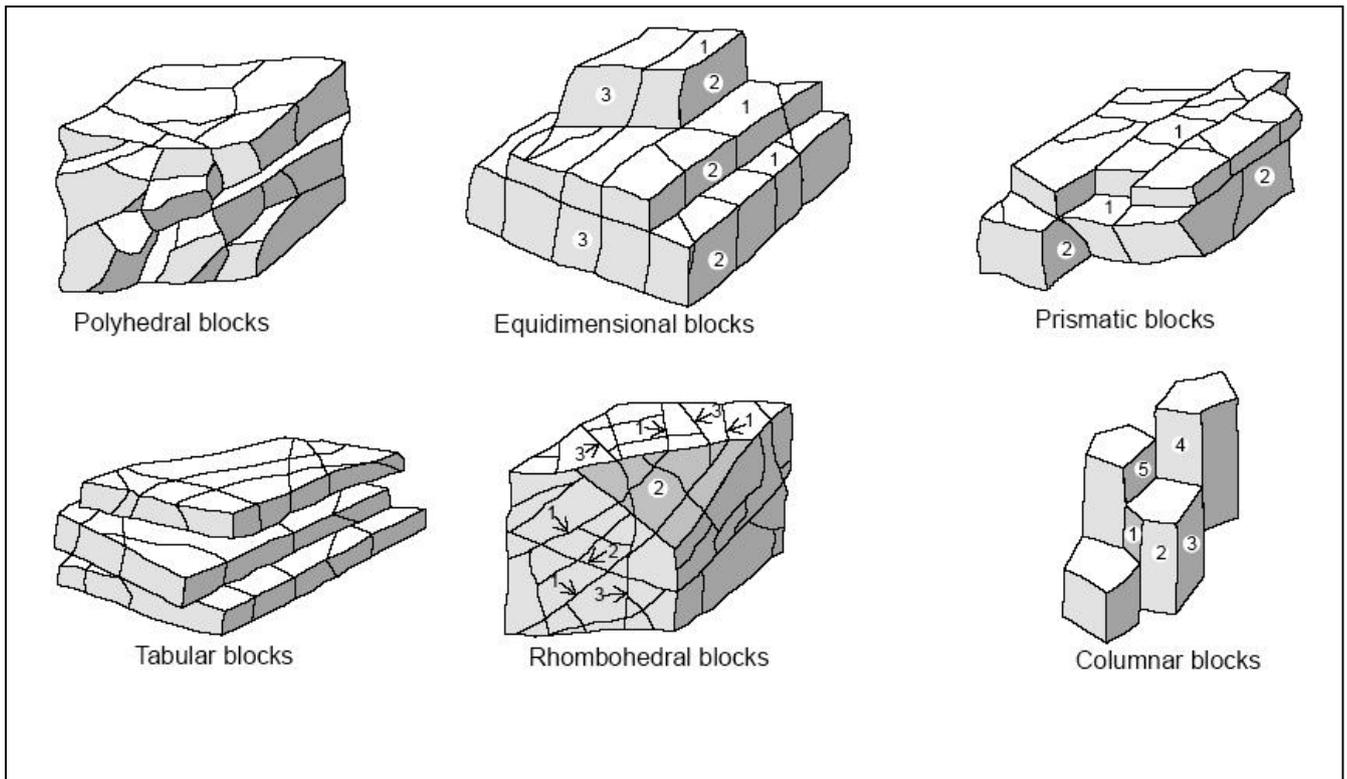
#### **I.3.2.2- Par forage :**

- ✓ Forage carotté (avec orientation des carottes) ou descriptif (avec observation endoscopique).
- ✓ Méthode de creusement de la galerie ou du puits (fracturation induite).
- ✓ Inclinaison et direction du forage de la galerie ou du puits. [4]

### **I.3.3 -Classification des massifs rocheux :**

Divers auteurs ont essayé de regrouper les structures géométriques des massifs rocheux dans des catégories bien définies. Cela est illustré dans la figure suivante pour une série de massifs rocheux (Palmström [1995]). Nous distinguons les massifs à blocs polyédriques, équidimensionnels, prismatiques, tabulaires, rhombohydriques, en colonnes, les massifs à bancs minces dont l'épaisseur est moins épaisse que la longueur et les massifs comprenant plusieurs familles de fractures. [4]

La figure suivante illustre les six familles précédemment citées :



**Figure I.1.a** - classification géométrique des massifs rocheux. [4]

### I.3.4 -Description de la matrice rocheuse :

Le Comité Français de Mécanique des Roches définit la roche comme étant « *un assemblage de minéraux qui ont acquis des liaisons plus ou moins fortes au cours de leur histoire géologique* ». [4]

Pour la classification, l'identification lithologique des roches est basée sur la détermination :

#### I.3.4.1- du groupe original :

- ✓ roches sédimentaires : résultent de l'altération physique ou chimique des roches préexistantes on distingue des roches : clastiques, chimiques, organiques (calcite, dolomie).
- ✓ roches métamorphiques : résultent de la transformation sous haute température et pression des roches préexistantes, soit en métamorphisme régional (les micaschistes) soit en métamorphisme de contact (le marbre).
- ✓ roches magmatiques : résultent de refroidissement du magma soit en forte profondeur (plutoniques : les granites), soit en faible profondeur (les roches volcaniques), on distingue aussi les roches pyroclastiques.

**I.3.4.2-de la structure :**

- ✓ stratifiées : avec parfois des remplissages des vides, comme les marnes.
- ✓ feuilletées : avec discontinuités qui sont caractérisées par une ouverture très mince.
- ✓ massives : sans discontinuités originales précises, comme les calcaires, marbre.

**I.3.4.3- de la granulométrie :**

Les termes descriptifs de la granulométrie (fondés sur la matrice rocheuse) par exemple amorphe : pour les roches de texture vitreuse.

**I.3.4.4-de la composition minéralogique :**

En portant une attention particulière sur :

- ✓ Les minéraux silicatés associés (les quartz et feldspaths).
- ✓ Les minéraux de couleur noire (les micas, amphiboles, pyroxène).
- ✓ Les minéraux argileux.
- ✓ Les minéraux carbonatés (calcite, dolomite).
- ✓ Les matériaux amorphes siliceux (le verre).
- ✓ Les matériaux carbonés (la houille).
- ✓ Les sels (la halite (sel gemme), le gypse).
- ✓ Les minéraux gonflants (l'anhydrite).
- ✓ Les sulfures (la pyrite).

**I.3.5- Description des discontinuités :**

Afin d'étudier le comportement mécanique ou hydraulique d'un massif rocheux, il est essentiel de connaître son degré de fracturation ainsi que la répartition des discontinuités dans l'espace. 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.

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

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

[4]

**I.3.5.1- Classification des discontinuités :**

On distingue généralement quatre grandes familles de discontinuités, par exemple pour les falaises calcaires : [3]

a- Les joints de stratification :

Ce sont des joints qui découpent régulièrement le massif en bancs parallèles, d'épaisseurs variables en fonction de la nature des séquences de dépôt et de leur mode de mise en place. La stratification provoque des discontinuités de forte extension. [3]

b- Les diaclases :

Ce sont des discontinuités de faible extension, généralement intra-bancs sans déplacement relatif des épontes. Dans les roches sédimentaires de couverture, les diaclases issues des différentes phases de déformation (plissement de la roche), elles sont généralement perpendiculaires aux bancs. [3]

c- Les failles :

Ce sont des discontinuités comportant un déplacement relatif des épontes, liées à des épisodes de déformation, les failles présentent généralement une extension (continuité) importante. [3]

d- Les fractures :

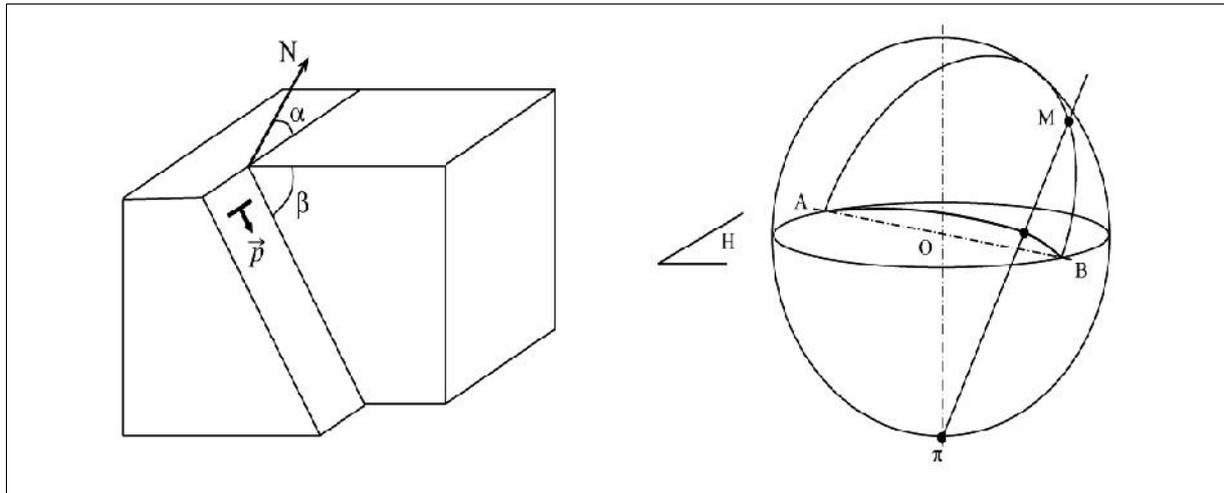
Ce sont des discontinuités de forte extension, généralement intra-bancs sans déplacement relatif des épontes. [3]

**I.3.5.2- Caractéristiques des discontinuités :**a- L'orientation (azimut) :

Est définie par la direction d'une horizontale du plan mesuré de 0 à 180° par rapport au nord, angle de la projection horizontale du vecteur (p) avec le Nord en tournant vers l'Est. Il vaut ( + 90), (Figure 1.b). [3]

b- Le pendage :

C'est l'inclinaison du plan par rapport à la verticale, mesurée de 0 à 90°, il est caractérisé aussi par un sens de plongement, c'est l'angle que fait le vecteur (p) avec le plan horizontal ( ), (figure I.1.b). [3]



**Figure I.1.b** - illustration de pendage et de l'azimut d'une discontinuité. [3]

c- L'espacement :

C'est la distance mesurée perpendiculairement entre deux plans appartenant à une même famille de discontinuité. L'espacement moyen nous renseigne sur le débitage en blocs et sur la déformabilité et la perméabilité du massif. [3]

d- La persistance :

C'est la longueur de la trace de l'intersection d'une discontinuité sur la surface topographique (appelée également continuité ou extension). [3]

e- L'ondulation et la rugosité:

Qui influe sur la résistance au cisaillement de la discontinuité à travers l'existence ou non d'ondulation à grande échelle et la présence ou non d'aspérités à petite échelle. [3]

f- L'ouverture :

C'est la distance entre les deux lèvres de la discontinuité, ce facteur influe surtout sur la circulation des eaux (ruissellement). [3]

g- Le degré d'altération et le remplissage :

L'altération chimique affaiblit les caractéristiques des discontinuités. Le matériau de remplissage s'il existe influe sur le comportement mécanique des discontinuités en fonction de ses propres caractéristiques mécaniques et de sa quantité (par exemple un remplissage d'argile augmente la cohésion mais diminue le frottement). [3]

#### I.4-Les mouvements de terrain :

Le terme générique « mouvements de terrain » désigne l'arrachement et le déplacement le long des pentes de sols et de matériaux rocheux sous l'effet direct de forces de gravité. [5]

Ces phénomènes diffèrent au niveau de l'évolution de l'instabilité, de la vitesse du mouvement durant la phase d'instabilité majeur, de la surface de rupture, de la nature géologique des terrains et de leur désorganisation ; les différents types de mouvements de terrains sont classés en fonction du type de matériau impliqué et de type de mécanisme de déformation et de rupture.

De nombreuses classifications ont été proposées pour rendre compte de la diversité des mouvements de terrain. Les principaux critères de classification retenus sont :

- Types de terrain affectés.
- Types de mouvements.
- Vitesse de processus.
- Taux de remaniement des matériaux après le mouvement.

Dans la terminologie, On peut distinguer :

a- Les mouvements liés à la présence des vides souterrains (dissolution, karst, carrières souterraines...).

b- Les mouvements liés à la présence d'une pente, pour lesquels on distingue :

-**les glissements de terrain** : terme général utilisé pour désigner les mouvements du sol meuble où les matériaux se déplacent principalement par glissement avec des vitesses assez variables (quelques centimètres par jour à quelques mètres par heure).

-**les écoulements**, comme les coulées boueuses et les laves torrentielles, caractérisés par un transport de type fluide de matériaux saturés.

c- Les mouvements gravitaires profonds: aux mécanismes souvent complexes, qui peuvent acquérir des dimensions pluri-hectométriques et affecter l'ensemble d'un versant rocheux.

d- Les phénomènes de chauffage qui se développent dans des formations géologiques présentant une anisotropie mécanique marquée (schistosité, foliation ou litage fortement redressé).

Ces phénomènes peuvent évoluer en mouvement profond, en glissement rationnel ou en chute de blocs. [5]

Les mouvements de terrain les plus fréquents sont classés en :

- ✓ Glissements.
- ✓ Coulées.
- ✓ Ecoulement.
- ✓ Fluages.

#### **I.4.1- Les glissements :**

Ils se caractérisent par la translation latérale d'une certaine masse de matériaux au niveau d'une surface de rupture nettement individualisée et se produisent généralement dans des matériaux faiblement cohérents (marnes, argiles..). Les glissements sont les mouvements qui affectent le plus fréquemment les ouvrages de génie civil et génie minier. [7]

##### ➤ **Principales causes des glissements :**

Plusieurs facteurs contribuent au déclenchement des glissements, les plus importants étant :

- la nature des terrains : les terrains argileux sont prédisposés aux glissements.
- l'action de l'eau : l'eau est dans la plupart des cas la cause principale dans la mise en mouvement des terrains.
- les causes mécaniques externes : citons parmi les causes mécaniques externes, le terrassement au pied du talus, les entailles effectuées dans les talus stables, toute surcharge naturelle ou artificielle déposée sur une pente, les vibrations naturelles (séismes) ou artificielles (explosion, machines ou engins roulants ...).[7]

##### ➤ **Description des modes de rupture :**

Selon la forme de la surface de rupture, on distingue trois types de glissements :

#### **I.4.1.1-Rupture plane :**

Cette rupture se produit suivant un plan le long d'une discontinuité géologique majeure : faille, plan de stratification ou une famille de fissures parallèle au talus et présentant une inclinaison défavorable dans le sens du talus. (Figure I.2).

La ligne de rupture suit une couche mince de mauvaises caractéristiques sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée « couche savon ». [6]

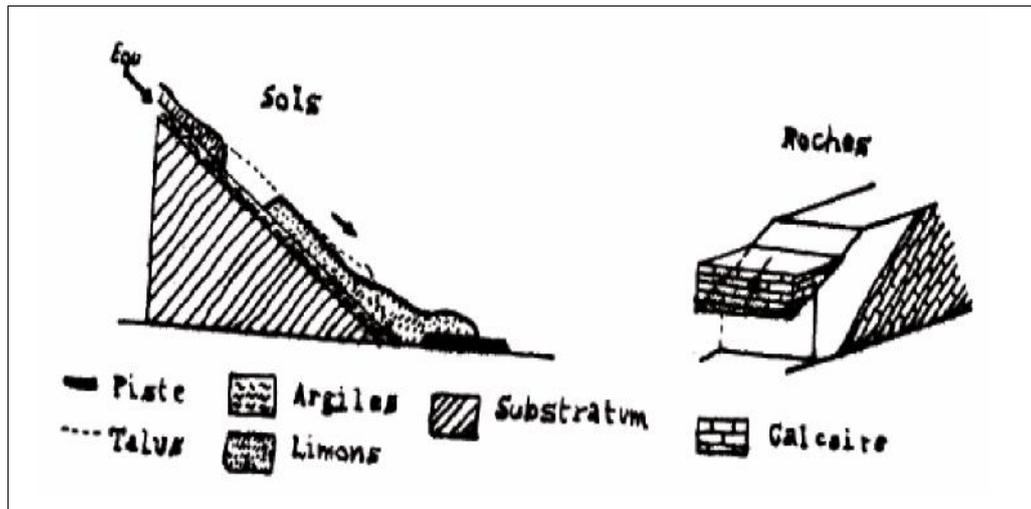


Figure I.2- modèle d'un glissement plan des roches et des sols. [6]

C'est l'un des modes de rupture le plus dangereux surtout lorsqu'il se produit le long d'une faille principale. Des volumes de roche importants peuvent être déplacés dans ce cas.

#### I.4.1.2- Rupture circulaire ou rotationnelle :

Cette rupture se produit dans un terrain homogène de faible résistance mécanique (faible cohésion). Le massif ne présentant pas de directions préférentielles de glissement, la rupture se fait par cisaillement du terrain le long d'une loupe de glissement (ligne circulaire).

On distingue le glissement rotationnel simple et complexe (composé). [6]

##### a). Glissement rotationnel simple :

Ce type de glissement est très fréquent. La surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à un cylindre. Dans un tel glissement, on distingue (figure I.3) au sommet des fissures de traction et un escarpement, correspondant au départ de la surface de glissement, et à la base un bourrelet formé par des matières glissées. Dans certains cas, la surface de rupture peut être assimilée à un cercle, d'où le nom de glissement circulaire. [6]

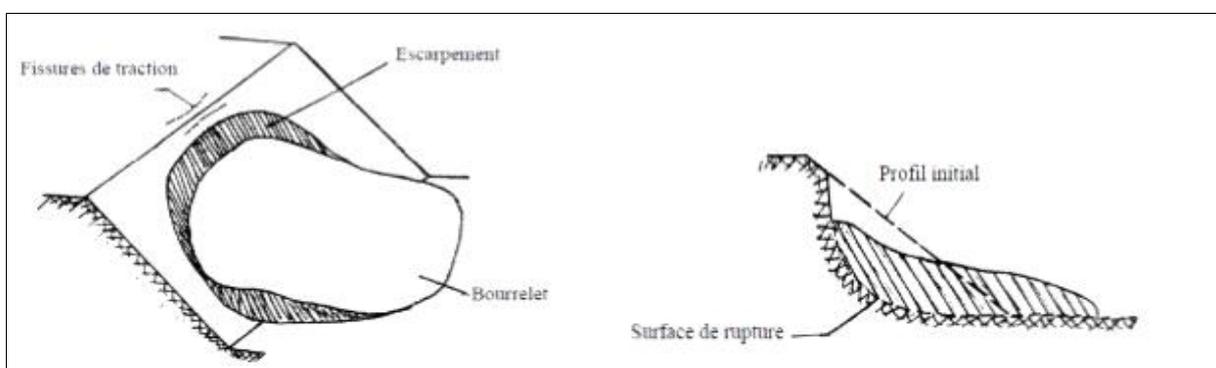
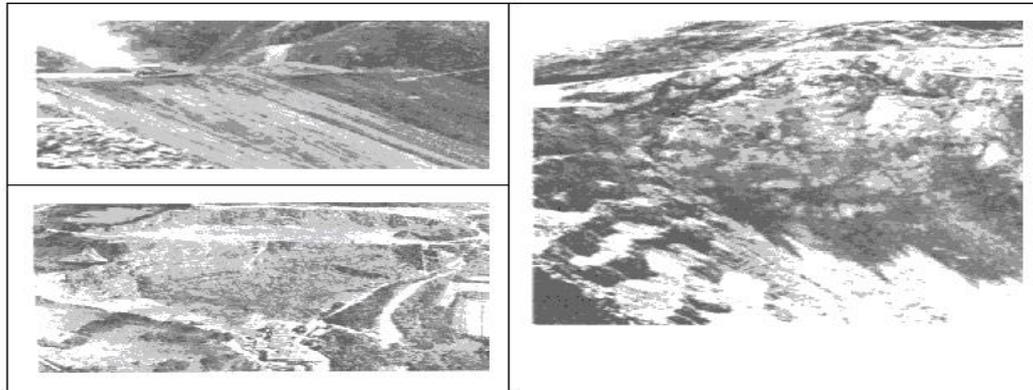


Figure I.3- modèle d'un glissement circulaire simple. [6]

Les terrains favorables à ce mode de rupture sont les sols, les remblais, les roches homogènes peu compétentes ainsi que les roches résistantes mais dont le niveau de fracturation leur confère des caractéristiques mécaniques en masse très faibles. Des exemples sont donnés dans la figure I.4.

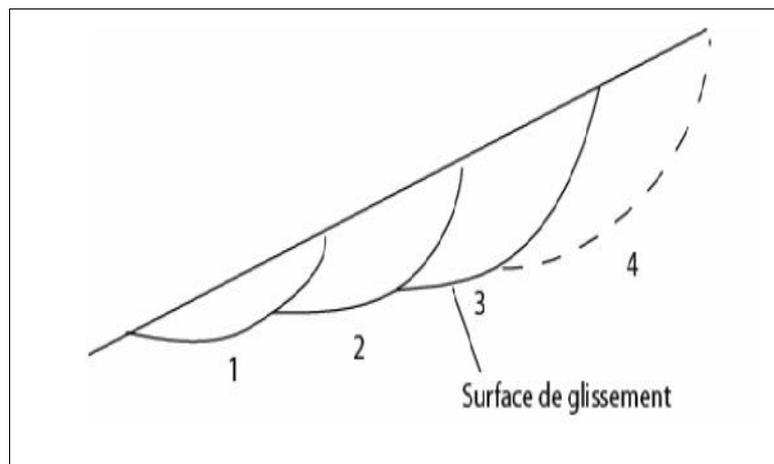


**Figure I.4-** Exemples de rupture circulaire. [7]

Ce mode de rupture est également très dangereux. Lorsque les conditions de stabilité ne sont pas satisfaites, des volumes de roche très élevés peuvent être déplacés.

**b). Glissement rotationnel complexe :**

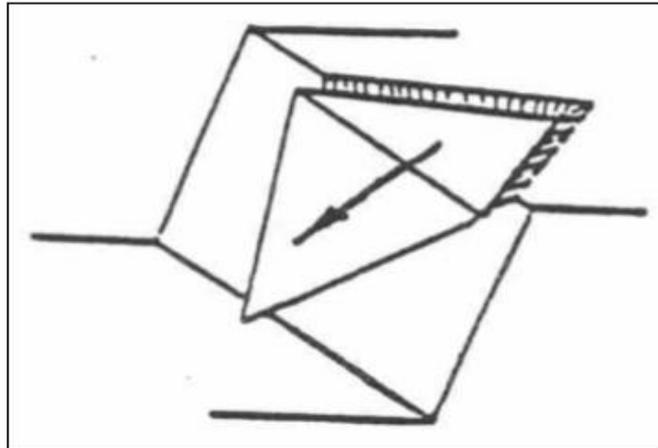
Ce type de glissement est rare. Il s'agit des glissements multiples emboîtés les uns dans les autres, dus souvent à la suppression de la butée provoquée par le glissement précédent, ce qui entraîne des glissements successifs remontant vers l'amont. [7]



**Figure I.5-** modèle des glissements circulaires successifs emboîtés. [7]

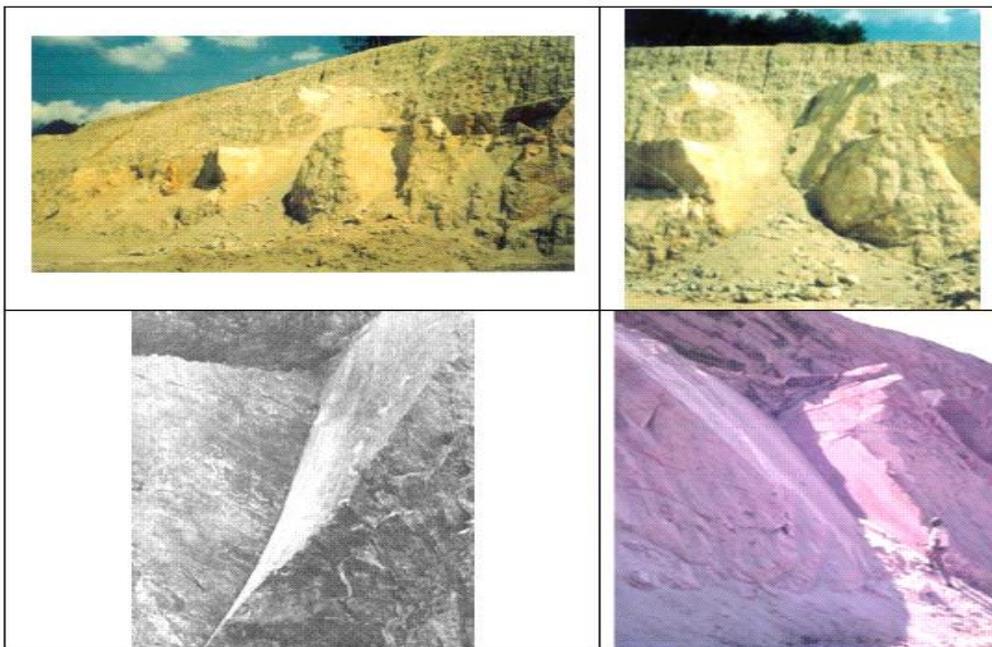
### I.4.1.3- Rupture en dièdres :

Cette rupture se produit lorsque le terrain est découpé par une fracturation principale caractérisée par plusieurs orientations. Conjuguées avec l'orientation du talus, les fissures forment des blocs qui se trouvent dégagés par les surfaces libres du talus (gradins, banquettes) et qui sous l'effet des forces mises en jeu se détachent et chutent. (figure I.6). [7]



**Figure I.6** : Rupture d'un dièdre (les fissures naturelles sont hachurées). [7]

Ce mode de rupture est moins dangereux que les deux précédents. Il se produit généralement à une plus petite échelle (1 ou 2 gradins), mais il peut causer des dommages importants. Plusieurs exemples sont donnés en figure I.7.



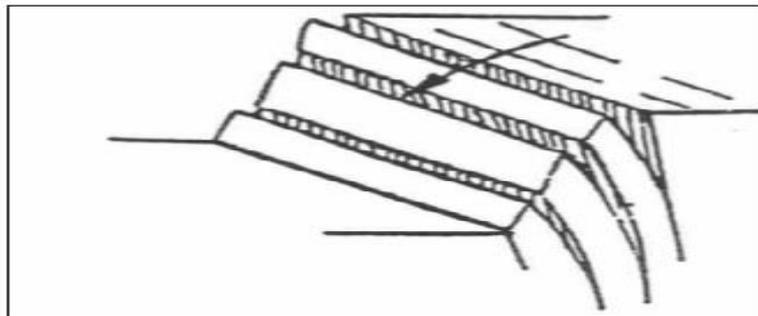
**Figure I.7**- Exemples de rupture de dièdres. [7]

#### I.4.1.4- Rupture par basculement :

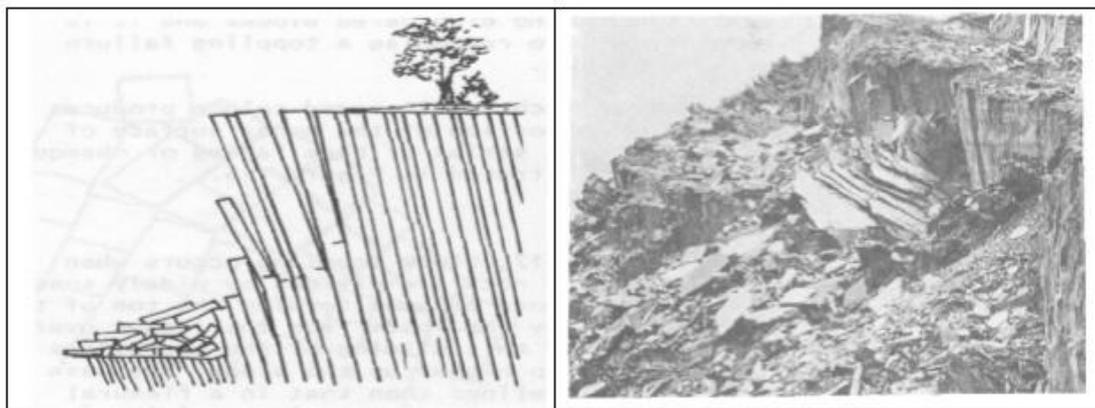
Ce mode de rupture est beaucoup plus rare que les 3 autres précédents. Il se produit lorsque le massif est découpé par une famille de fissures importantes qui présente les caractéristiques suivantes :

- ✓ orientation parallèle au talus.
- ✓ fort pendage.
- ✓ écartement réduit entre les fissures, ce qui conduit à la formation de plaques de faible épaisseur.

La rupture se produit par décollement des plaques et leur basculement (figures. I.8 ). Une dégradation progressive des gradins pourrait conduire à l'instabilité du talus. [7]



**Figure I.8-** Rupture par basculement (1). [7]



**Figure I.8-** Rupture par basculement (2). [7]

### I.4.2- Les coulées :

Elles se produisent à partir du matériel meuble, momentanément saturé en eau, prenant alors une consistance plus ou moins visqueuse, parfois proche de la fluidité. On distingue plusieurs types de coulées telle que : coulées boueuses (incluant coulée de blocs, de terre, de boue, lave torrentielle, avalanche de débris et se produisant surtout en montagne (figure I.9)), coulées de solifluxion (déplacement lent des sols en milieu périglaciaire, résultant de l'instabilité de la partie dégelée du sol, en surface, au cours de l'été). [7]

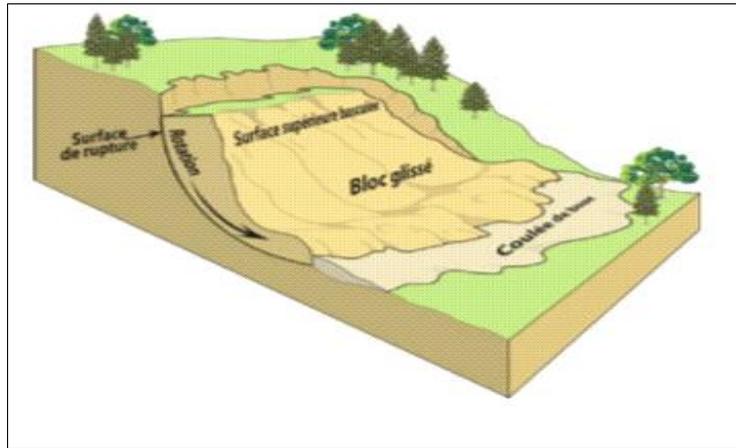


Figure I.9- Coulée de boue.[7]

### I.4.3- Les écroulements :

Ce sont des chutes soudaines de masses rocheuses. On utilise le terme de chute de pierres pour le détachement de quelques unités de volume inférieur à  $1 \text{ dm}^3$ , ou chute de blocs pour un volume supérieur. Le terme écroulement est utilisé quand il s'agit de la chute soudaine d'une masse rocheuse qui se détache d'une paroi en se désorganisant. [7]

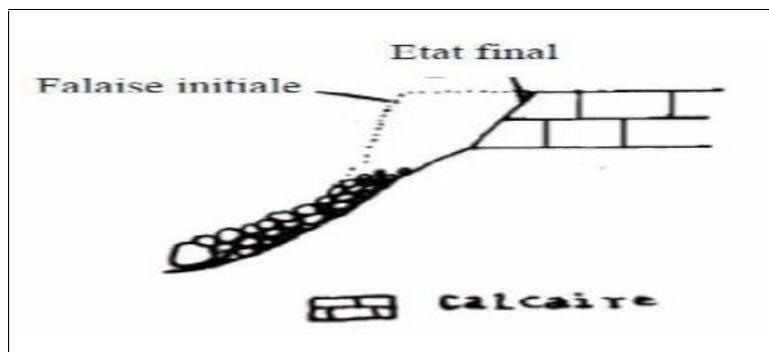


Figure I.10- L'écroulement. [7]

#### I.4.4-Le fluage :

Il correspond à des mouvements lents, dus à des sollicitations proches de la rupture (domaine plastique). Dans l'exemple de la figure I.11, le banc de marne flue sous le poids de la falaise calcaire. Ceci peut provoquer une fissuration du banc calcaire peu déformable et un risque d'écroulement de la falaise. [7]

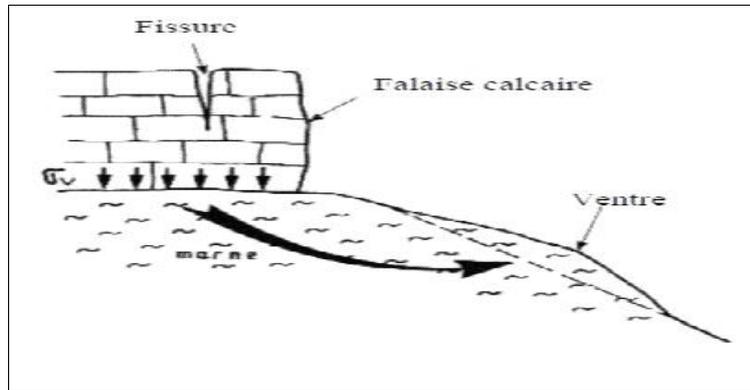


Figure I.11- Le fluage. [7]

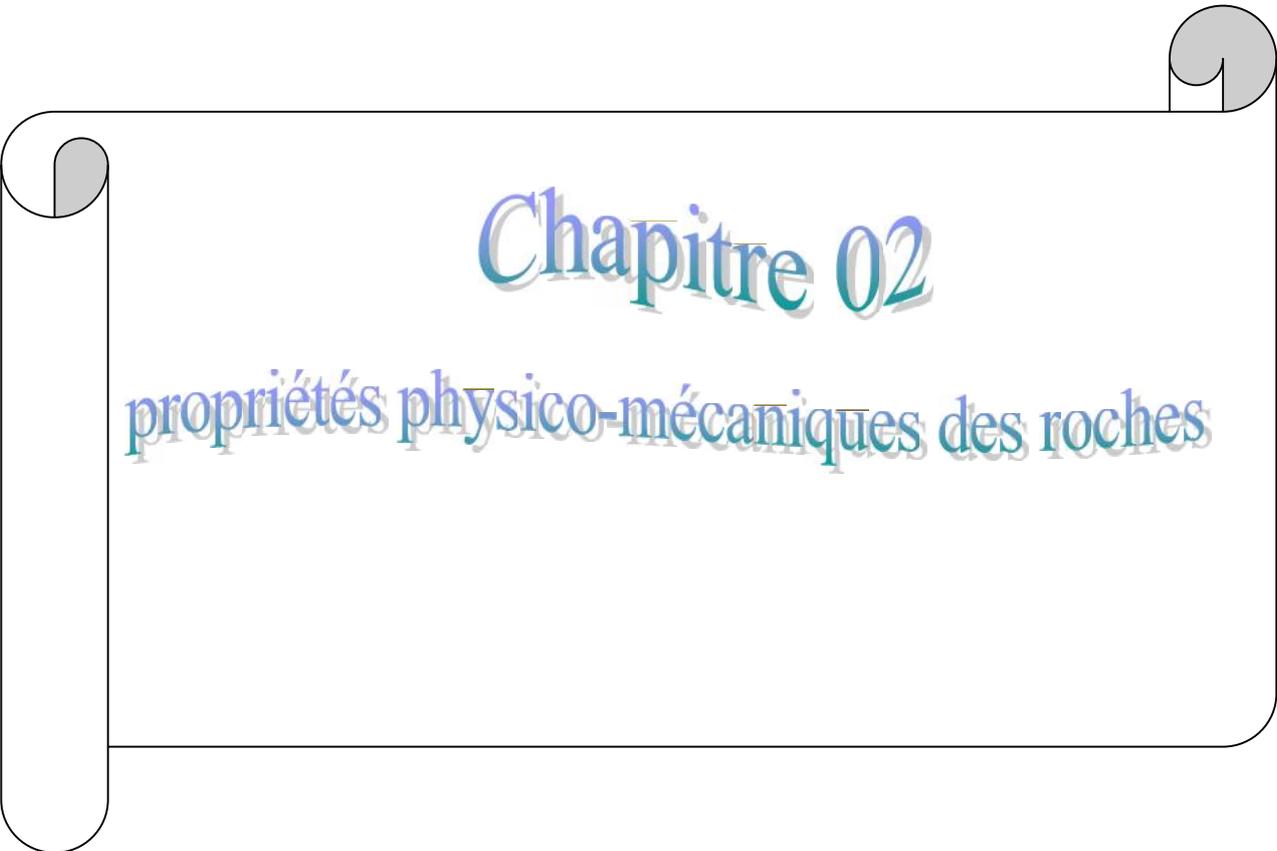
Une compilation des différents types de mouvements de terrain est donnée dans le tableau I.1.

**Tableau. I.1** : Principales classes de déstabilisation sur les versants en fonction des terrains concernés (d'après Campy M., Macaire J.J., 2003). [5]

Classes	Terrains concernés	Vitesse Moyenne
Glissement de terrain	Roches peu cohérentes -Marnes, alluvions, moraines, calcaires.	. Quelques cm à quelques m par jour. Discontinu (saisons).
Coulées	Roches meubles	Plusieurs m par seconde (variable selon fluidité).
Ecroulement	Roches cohérentes.	Déclenchement très rapide. Chute en quelques secondes.
Fluage	Roches stratifiées ou non.	Très lent, quelques cm par an.

#### I.5-Conclusion

Après avoir identifier les deux composantes du massif rocheux -roche et discontinuités- il convient de s'intéresser maintenant à leur assemblage pour appréhender le comportement global autour du massif à étudier.

A decorative scroll graphic with a black outline and grey shading on the rolled-up ends, framing the text.

# Chapitre 02

propriétés physico-mécaniques des roches

## Chapitre II : propriétés physico-mécaniques des roches

### II.1- Introduction:

Les propriétés physico-mécaniques des roches sont une source capitale pour la compréhension de leurs comportements dont la complexité est avérée. L'analyse de ces dernières constitue la clé pour la résolution d'éventuels problèmes de stabilité.

Parmi les propriétés physiques, les plus importantes: la masse volumique, la porosité, l'humidité et la dureté.... Les propriétés mécaniques sont : la résistance à la compression, la résistance à la traction et la résistance au cisaillement (l'angle de frottement interne et la cohésion).

### II.2- Les propriétés physiques des roches

#### II.2.1- La porosité :

La porosité traduit la faculté d'un sol à stocker un fluide (air, eau) dans ses interstices, également appelés pores. Elle ne dépend pas essentiellement de la taille des grains mais surtout de leur agencement. [8]

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

La détermination de la porosité se donne par la formule suivante :

$$P = \frac{V_v}{V_t} \times 100$$

La porosité varie de quelque % à plus de 40 % dans les roches sédimentaires, elle est plus faible, dans les roches magmatiques, souvent inférieure à 1 %. Les essais géotechniques au laboratoire militaire de Canada ont porté une classification des roches selon leur porosité comme suivant : [9]

- Roches de faible porosité :  $0 < p < 5$  %.
- Roches de porosité moyenne :  $5 < p < 10$  %.
- Roches de porosité élevée :  $10 < p < 20$  %
- Roches de grande porosité :  $p > 20$  %.

### II.2.2- La masse volumique :

C'est la masse de l'unité de volume de la roche (g/cm<sup>3</sup>). Suivant l'état du matériau, on définit :

$\rho_s$  la masse volumique absolue ou masse volumique du solide,  $\rho_h$  la masse volumique naturelle,  $\rho_d$  la masse volumique sèche et  $\rho_{sat}$  la masse volumique saturée. [6]

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} ; \rho_d = \frac{M_s}{V_t} ; \rho_h = \frac{M_h}{V_t} ; \rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{V_t}$$

Avec :

$M_s$  : la masse du matériau sec ; g.

$V_s$  : le volume des grains après broyage ; cm<sup>3</sup>.

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

$M_h$  : la masse naturelle ; g.

$M_{sat}$  : la masse de l'échantillon saturée ; g.

$\rho_d$  dépend de la porosité de la roche, par contre  $\rho_s$  ne dépend que de la minéralogie.

### II.2.3- La teneur en eau :

C'est le rapport de la masse d'eau  $M_w$ , à la masse du solide sec. [6]

$$W = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_T - M_s}{M_s}$$

Où :

$M_w$  : est la masse d'eau.

$M_T$  : est la masse totale de l'échantillon.

$M_s$  : est la masse sèche des grains solides.

### II.2.4- Le degré de saturation :

C'est le rapport du volume de l'eau contenue dans l'échantillon au volume des vides. [6] [10]

$$S_t = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

Où :

$V_w$  : volume de l'eau dans l'échantillon, cm<sup>3</sup>.

$V_v$  : volume des vides, cm<sup>3</sup>.

### II.2.5- La dureté :

La dureté d'un minéral est due à la structure du cristal lui-même : comment les atomes qui le forment, à l'échelle microscopique, sont organisés. Plus ces atomes sont liés fortement entre eux, plus le minéral sera dur. C'est donc une propriété propre au minéral, et elle permet de le reconnaître. Certains minéraux peuvent changer de couleur, mais pas de dureté. La mesure de la dureté permet donc de reconnaître un minéral. [11]

Le scientifique, Friedrich Mohs, a eu l'idée de choisir dix minéraux, et de les classer du plus tendre au plus dur; s'ils sont numérotés de 1 à 10, et servent d'échelle : c'est ce que l'on appelle l'échelle de Mohs :

**Tableau II.1** : Echelle de dureté de Mohs. [11]

Minéral	Dureté
Talc	1
Gypse	2
Calcite	3
Fluorine	4
Apatite	5
Orthose	6
Quartz	7
Topaze	8
Corindon	9
Diamant	10

Si un minéral raye un minéral, forcément le premier minéral est plus dur que le second.

Il existe aussi des pointes de métal numérotées, et créées spécialement pour cela : chacune a une dureté égale à un des minéraux de l'échelle de Mohs : ils sont très pratiques pour mesurer la dureté, surtout quand le scientifique travaille en exploration sur le terrain. Cette mesure de dureté est essentiellement réservée aux pierres calcaires. La détermination de la largeur d'une rayure fournit pour chaque matériau une valeur chiffrée de la dureté. Ceci présente l'avantage de pouvoir mettre en relation les valeurs de dureté avec celles se rapportant à des caractéristiques physiques et mécaniques. [12]

La caractéristique de dureté s'obtient par la mesure de la largeur d'une rayure faite sur la surface rectifiée d'un bloc de pierre. La valeur obtenue est en relation avec la difficulté de taille et l'usure des instruments. La largeur des rayures varie en général de 0,1 mm pour les pierres les plus dures à 3,5 mm pour les plus tendres.

Pour notre cas, ce qui nous intéresse le plus c'est la dureté de l'ensemble de la roche et non de ces minéraux constitutifs ; cette dernière est évaluée selon l'échelle du professeur Protodiakonov de 1 à 20.

### II.2.6- Le degré de fissuration des roches :

Les fissures ou les discontinuités sont la clef du comportement des roches et des massifs rocheux. On peut les définir comme des vides plats dont le rapport de l'épaisseur à la longueur est de l'ordre de  $10^{-3}$ . Sous l'effet des charges, ces fissures se referment progressivement, donc avec un changement de géométrie, et comme pour les sols, avec une non-linéarité entre efforts et déformations, du moins tant que les fissures ne sont pas complètement fermées, ce qui se produit à des pressions variables selon les roches et leur état de fissuration, mais qui peut être de l'ordre de 25 à 50 MPa pour un calcaire (soit la pression géostatique correspondant à une profondeur de 1 000 à 2 000 m). [13]

La présence des fissures a une importance considérable (à l'échelle du joint de grains).

L'indice de fissuration est égal à la distance moyenne entre les fissures :

$$ID = \frac{L}{n}$$

L : longueur de la partie étudiée du massif (en m).

n : nombre de fissures sur la partie mesurée.

Le tableau II-2 donne une classification des roches en fonction des valeurs de ID.

**Tableau II.2** : Classification des discontinuités selon ID. [13]

Classe	Intervalle moyen entre discontinuités ID (cm)	Densité des discontinuités
ID 1	> 200	Très faible
ID 2	60 à 200	Faible
ID 3	20 à 60	Moyenne
ID 4	6 à 20	Forte
ID 5	< 6	Très forte

### II.2.7- Caractérisation du massif par le RQD :

L'observation des carottes permet de déterminer un paramètre empirique proposé par D.Deere en 1964, le Rock Quality Designation, rapport en pourcentage entre la longueur cumulée des carottes supérieures à 10 cm et la longueur totale de carotte considérée. [14] (1m pour l'AFTES) :

$$\text{RQE} = \frac{\sum L_{>10\text{cm}}}{L_{\text{totale}}} * 100$$

Un RQD de 80 à 100% signifie donc que l'on a affaire à une roche peu ou pas fracturée.

#### Remarque :

Cet indicateur peut être trompeur : pour un même massif stratifié, on pourra conclure à un RQD de 0% ou de 100% au même endroit selon l'inclinaison du forage. Il est donc important de repérer la direction et l'inclinaison des forages, puis de corréliser les résultats entre eux. [14]

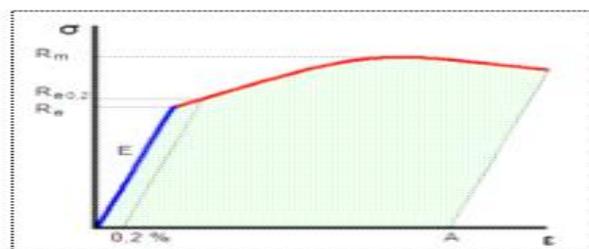
**Tableau II.3 :** Donne la classification de roche selon la valeur de RQD. [14]

RQD (%)	Qualité de la roche
< 25	très mauvaise
25-50	Mauvaise
50-75	Passable
75-90	Bonne
90-100	Excellente

### II.2.8- 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. [7]

La loi d'élasticité est la loi de Hooke :  $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ .



**Figure II.1-** Diagramme contrainte-déformation. [7]

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 engendre 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. [7]

### II.2.9- L'abrasivité :

L'abrasivité caractérise la capacité d'une roche à provoquer l'usure d'un outil tel que pièce de concasseur, taillant de forage (tableau II.3), molette ou pic de machine foreuse. Cette propriété est importante pour les travaux d'exploitation des matériaux rocheux, en souterrain comme à ciel ouvert. Elle dépend à la fois de la teneur en minéraux durs (quartz notamment) et de la résistance de l'assemblage des grains (cohésion de la roche). [15]

**Tableau II.4** : Durée de vie (mesurée en mètre foré) d'un taillant de forage en fonction de l'abrasivité des roches. [15]

Taillant de forage	Longueur forée (m)	
	Roche abrasive	Roche peu abrasive
Taillant fileté à picots >64mm ou taillant fond de trou à picots	400 à 1000	1200 à 2500
Taillant fileté à plaquettes	200 à 400	800 à 1000
Fleuret monobloc	150 à 200	600 à 800

Pour estimer l'abrasivité d'un matériau, on peut utiliser l'abrasimètre LCPC, constitué d'un pot métallique que l'on remplit de granulats 4/6,3 mm, et dans lequel tournent à grande vitesse une palette métallique (figure II.2). La perte de poids subie par la palette après 5 min de rotation, exprimée en mg d'acier, est divisée par la masse en kg de granulats traités: on obtient ainsi l'indice  $A_{BR}$  de la roche. On estime en général que les valeurs supérieures à 1 500 peuvent conduire à de fortes usures d'outils.



**Figure II.2** - Abrasimètre LCPC : palette métallique (après essai) et pot de granulats. [7]

### II.2.10-L'altérabilité :

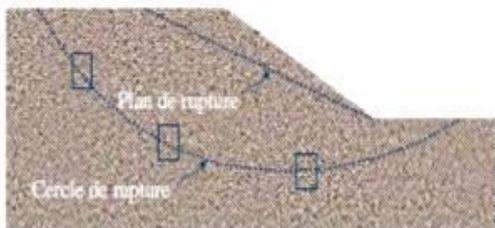
On appelle altérabilité la sensibilité d'une roche aux modifications du milieu environnant. L'altération physico-chimique traduit la capacité de gonflement, de délitage ou de dissolution d'une roche. Divers essais existent pour quantifier l'altérabilité d'une roche ; aucun cependant ne s'est véritablement imposé. En France, pour la réutilisation en terrassement des matériaux rocheux, a été défini un coefficient de dégradabilité, fondé sur l'évolution granulométrique de granulats après des cycles d'immersion-séchage conventionnels : l'essai met bien en évidence le caractère évolutif des roches marneuses ou schisteuses. [16]

## II.3- Les propriétés mécaniques des roches

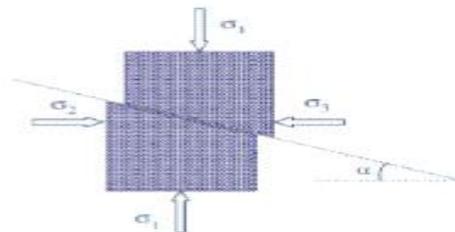
### II.3.1- Définition de la rupture:

La résistance au cisaillement d'un sol est la résistance interne par unité de surface qu'un sol peut offrir pour résister à une rupture ou à un cisaillement le long d'un plan.

La contrainte appliquée pouvant causer la rupture doit être déterminée en utilisant un plan critique donné → Cercle de Mohr. [11]



**Figure II.3** - Rupture d'un matériau. [11]



**Figure II.4** - Les contraintes Provoquant la rupture. [11]

### II.3.2- Critère de 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 la contrainte tangentielle 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  $\alpha$ . [15]

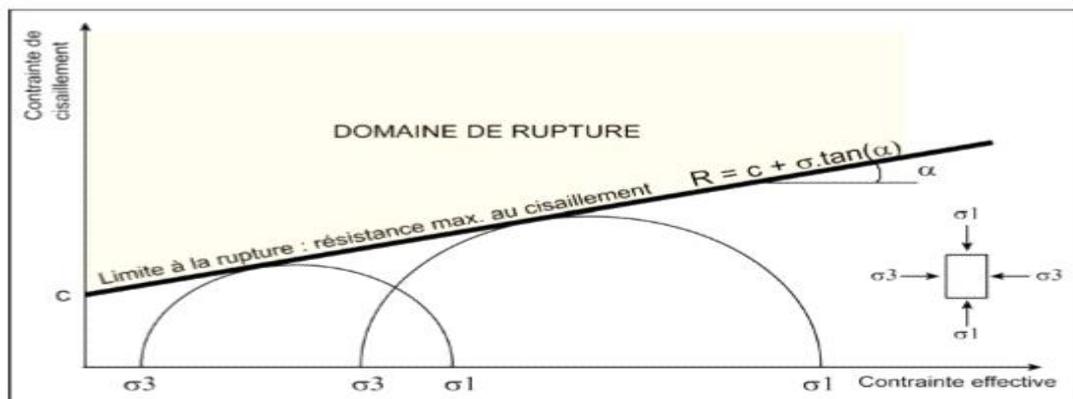


Figure II.5- Représentation de la droite de Mohr-Coulomb. [15]

### II.3.3- 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. [17]

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 de 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. [18]

Le principe de ce critère de rupture est dans le fait que la contrainte de cisaillement tangentielle appliquée sur une facette augmente moins vite avec la contrainte normale  $\sigma_n$  qu'avec le critère habituel de Mohr-Coulomb.

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

A et B sont des constantes qui définissent la forme de l'enveloppe dans le plan de Mohr.  $R_c$  est la résistance à la compression uniaxiale de la roche.  $\tau_c$  est la résistance au cisaillement.  $\sigma_n$  est la contrainte normale. T est lié au massif rocheux et qui se calcule par la formule suivante :

$$T = \frac{1}{2} \left( m - \sqrt{m^2 - 4s} \right)$$

Où

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

Hoek et Brown ont proposé, en fonction de la nature lithologique dominante et du degré de fracturation et de l'altération moyenne du massif, des lois de comportement empiriques pour les masses rocheuses considérées (Tableau II.5). A partir de là on peut alors raisonner sur un massif rocheux équivalent comme on le ferait sur un sol homogène.

**Tableau II.5 :** Critères de comportement des massifs rocheux (d'après Hoek et Brown). [18]

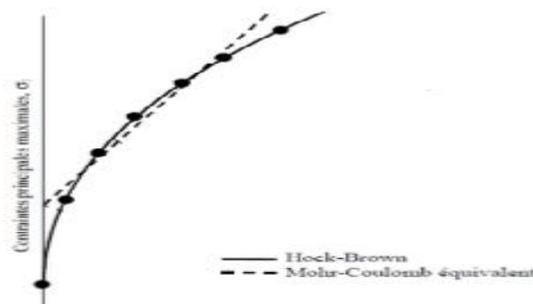
La qualité de la masse rocheuse	roches carbonatées avec le clivage de cristaux bien développés (dolomie, calcaire, marbre).	roches argileuses lithifiées, schiste argileux clivage normal.	roches sableuses avec cristaux solides et peu développés de clivage de cristal (grès et de quartzite).	roches ignées cristalline à grains fins polyminérales (andésite, dolérite, diabase et rhyolite).	Roches cristallines ignées et métamorphiques à grains grossiers polyminérales (amphibolite, gabbro, gneiss, granite et quartzdiorite).
Echantillon intact de roche de taille spécimen de laboratoire	m = 7.0 s = 1.0 A = 0.816 B = 0.658	m = 10.0 s = 1.0 A = 0.918 B = 0.677	m = 15.0 s = 1.0 A = 1.044 B = 0.692	m = 17.0 s = 1.0 A = 1.086 B = 0.696	m = 25.0 s = 1.0 A = 1.220 B = 0.705

sans fissures. Taux CSIR 100, Taux NGI500.	T = - 0.140	T = - 0.099	T = - 0.067	T = - 0.059	T = - 0.040
Masse rocheuse de très bonne qualité d'une roche intacte non altérée avec des fissures de 3m. Taux CSIR 85, Taux NGI 100.	m = 3.5 s = 0.1 A = 0.651 B = 0.679 T = - 0.028	m = 5.0 s = 0.1 A = 0.739 B = 0.692 T = - 0.020	m = 7.5 s = 0.1 A = 0.848 B = 0.702 T = - 0.013	m = 8.5 s = 0.1 A = 0.883 B = 0.705 T = - 0.012	m = 12.5 s = 0.1 A = 0.998 B = 0.712 T = - 0.008
Masse rocheuse de bonne qualité fraîche d'une roche légèrement altérée, légèrement fissurés de 1 à 3m. Taux CSIR 65, Taux NGI 10.	m = 0.7 s = 0.004 A = 0.369 B = 0.669 T = - 0.006	m = 1.0 s = 0.004 A = 0.427 B = 0.683 T = - 0.004	m = 1.5 s = 0.004 A = 0.501 B = 0.695 T = - 0.003	m = 1.7 s = 0.004 A = 0.525 B = 0.698 T = - 0.002	m = 2.5 s = 0.004 A = 0.603 B = 0.707 T = - 0.002
Masse rocheuse de qualité moyenne d'une roche moyennement altérée avec des fissures espacées de 0.3 à 1 m. Taux CSIR 44, Taux NGI 1,0.	<b>m = 0.14</b> <b>s = 0.0001</b> <b>A = 0.198</b> <b>B = 0.662</b> <b>T = - 0.0007</b>	m = 0.20 s = 0.0001 A = 0.234 B = 0.675 T = - 0.0005	m = 0.30 s = 0.0001 A = 0.280 B = 0.688 T = - 0.0003	m = 0.34 s = 0.0001 A = 0.295 B = 0.691 T = - 0.0003	m = 0.50 s = 0.0001 A = 0.346 B = 0.700 T = - 0.0002
Masse rocheuse altérée de mauvaise qualité avec des fissures de 30 à 500mm et des rainures de stérile propre. Taux CSIR 23, Taux NGI 0.1.	m = 0.04 s = 0.00001 A = 0.115 B = 0.646 T = - 0.0002	m = 0.05 s = 0.00001 A = 0.129 B = 0.655 T = - 0.0002	m = 0.08 s = 0.00001 A = 0.162 B = 0.672 T = - 0.0001	m = 0.09 s = 0.00001 A = 0.172 B = 0.676 T = - 0.0001	m = 0.13 s = 0.00001 A = 0.203 B = 0.686 T = - 0.0001
Masse rocheuse fortement altérée de très mauvaise qualité avec de nombreux fissures espacées de moins de 50mm	m = 0.007 s = 0 A = 0.42 B = 0.534 T = 0	m = 0.010 s = 0 A = 0.050 B = 0.539 T = 0	m = 0.015 s = 0 A = 0.061 B = 0.546 T = 0	m = 0.017 s = 0 A = 0.065 B = 0.548 T = 0	m = 0.025 s = 0 A = 0.078 B = 0.556 T = 0

(Les valeurs en gras sont les valeurs qui seront utilisés pour la réalisation de nos calculs).

A l'aide de l'expression de la contrainte tangentielle ci-dessus, on estime les valeurs de la cohésion  $C$  et l'angle du frottement  $\phi$  qui caractérisent le comportement mécanique de chaque matériau équivalent et peuvent être utilisées dans les calculs de stabilité.

Le modèle de Hoek-Brown s'adapte à un très grand nombre de milieux rocheux, plus ou moins fracturés. Cependant, la plupart des logiciels de géotechnique sont écrits en fonction du critère de rupture de Mohr-Coulomb. L'approche la plus rigoureuse est celle qui a été proposée par Bray, et rapportée par Hoek (1983). Elle consiste à traiter le problème comme une série de tests triaxiaux. Les équations de Mohr-Coulomb sont alors ajustées aux résultats de ces tests par une méthode de régression linéaire. Toutefois, les paramètres de frottement obtenus à l'issue de cette analyse ne restent corrects que pour des contraintes proches de celles utilisées pour les tests. [18]



**Figure II.6-** Ajustement du critère linéaire de Mohr-Coulomb au critère non-linéaire de Hoek-Brown, d'après Hoek et Brown (1997). [19]

### II.3.4- La cohésion et l'angle du frottement interne :

En ce qui concerne la cohésion  $C$ , il faut souligner le rôle important de l'eau. En effet, lorsque la quantité d'eau est très importante, les particules du sol sont séparées les unes des autres et la cohésion du sol est alors nulle. En revanche la présence d'eau peut donner une certaine cohésion, cohésion apparente, à des sols qui n'en n'ont aucune lorsqu'ils sont secs. Dans les argiles et limons, cette cohésion apparente peut être très élevée. A noter que les sols grossiers, comme les graviers, ont une cohésion nulle, quelle que soit leur teneur en eau.

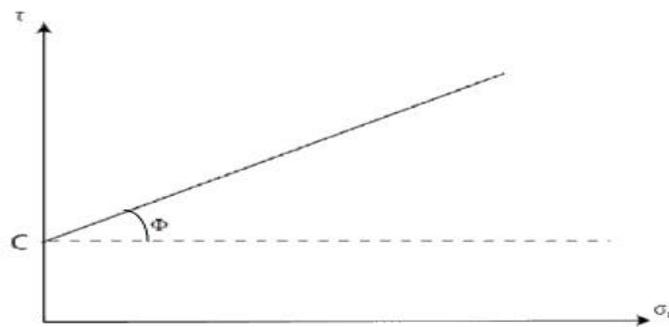
L'angle de frottement interne  $\phi$  correspond à l'angle formé naturellement par un matériau mis en tas, par rapport à l'horizontale. Il dépend du type de sol et plus particulièrement de l'éroulé de ses grains : plus ces derniers sont anguleux, plus l'angle de frottement interne sera élevé. Ces deux paramètres sont déterminés, pour un sol donné, par des essais en laboratoire. Leur représentation par une droite, la droite de Mohr-Coulomb, (figure II-5) permet d'obtenir une représentation de la résistance au cisaillement de ce sol selon les

contraintes exercées sur lui, et ainsi, de connaître la limite à la rupture de ce sol. C'est la raison pour laquelle on appelle également cette droite l'enveloppe des cercles à la rupture. [20]

Un troisième terme apparaît dans la loi de Coulomb, il s'agit de  $\sigma'$ , la contrainte effective, qui est normale à la pente. C'est la contrainte correspondante aux efforts transmis par les grains du squelette minéral du sol, au niveau de leurs points de contact. La contrainte effective est, d'après la loi de Terzaghi, la contrainte totale ( $\sigma$ ) à laquelle on soustrait la contrainte neutre ( $u$ ), soit la pression de l'eau remplissant les interstices du sol. [21]

Loi de Terzaghi :  $\sigma' = \sigma - u$ .

La courbe représentative de ( $\tau$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) est donnée sur la figure II-5. A partir de cette courbe on peut déterminer graphiquement la cohésion et l'angle de frottement interne de l'échantillon ( $C$  et  $\phi$ ).



**Figure II.7-** Courbe représentative de  $\tau$  en fonction de  $\sigma_n$ . [21]

### II.3.5- La résistance à la compression :

Elle est déterminée lors des essais de compression simple. Dans cet essai, l'échantillon est pris sous la forme d'une carotte (éprouvette cylindrique), d'élancement  $L/D$  ( $L$  : hauteur,  $D$  : diamètre) compris entre 2 à 2,5 avec deux faces planes, lisses et parallèles obtenues par une rectification soignée. [21]

L'échantillon est ensuite placé entre les plateaux d'une presse et la force axiale est augmentée jusqu'à la rupture de l'éprouvette. 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.

La valeur maximale  $F$  de la force permet de calculer la résistance en compression uniaxiale  $R_c$  de la roche :

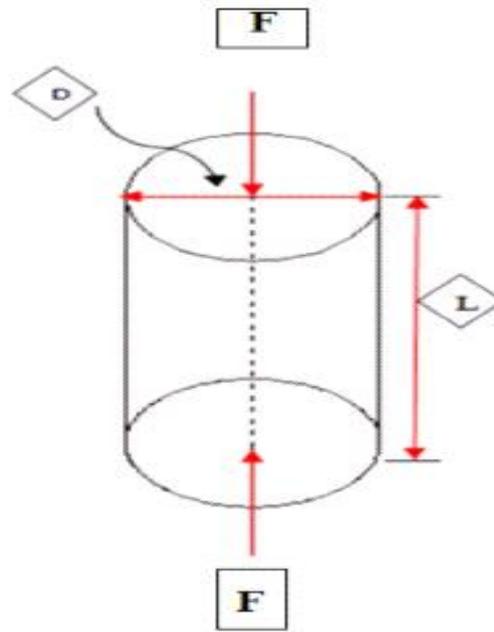
$$R_c = \frac{F}{S} \text{ (Mpa)}$$

F : effort (charge) maximale atteinte (juste avant la rupture) en KN.

S : est la surface de la section de l'éprouvette sur laquelle on applique l'effort F en cm<sup>2</sup>.



**Figure II.8** - Dispositif expérimental.[21]



**Figure II.9** - Schéma de la Compression uniaxiale. [21]

Le tableau II-6 donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la compression proposée par la société internationale de mécanique des roches.

**Tableau II.6** : Classification des roches en fonction de la résistance à la compression. [21]

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

### II.3.6- La résistance à la traction :

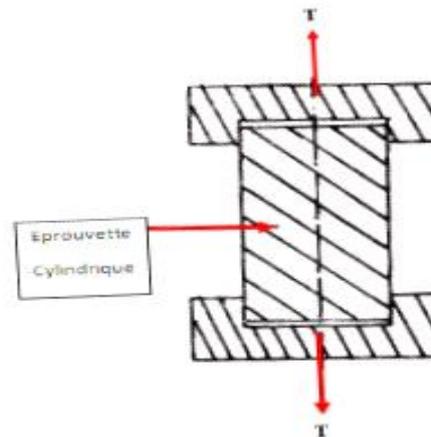
#### II.3.6.1-Traction directe :

En soumettant une éprouvette cylindrique à une traction uniaxiale, la résistance à la traction simple est égale à la contrainte limite de traction qui produit la décohésion des échantillons des roches massives. [21]

$$Rt = \frac{P_{max}}{A_0} \quad (\text{Kgf/cm}^2)$$

$P_{max}$  : valeur finale atteinte par l'effort appliqué.

$A_0$  : surface transversale.



**Figure II.10** - Essai de traction directe. [21]

### II.3.6.2- Traction indirecte :

L'essai de résistance à la traction indirecte, dit aussi essai brésilien, est réalisé en comprimant entre les plateaux de la presse une éprouvette cylindrique le long de deux génératrices opposées (figure II.11).

La rupture est obtenue par traction au centre de l'éprouvette. On évite ainsi les difficultés de collage des têtes nécessaires dans les essais de traction directe. Si  $F$  est l'effort fourni par la presse au moment de la rupture,  $D$  le diamètre de l'éprouvette et  $L$  sa hauteur, la résistance à la traction indirecte est donnée par la formule suivante : [21]

$$Rt = \frac{2F_{max}}{\pi DL} \quad (\text{Mpa})$$

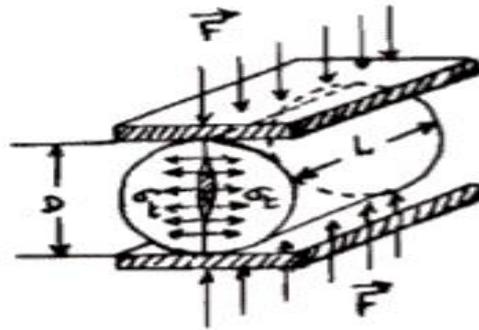
Avec :

$F_{max}$  : la charge maximale appliquée.

$D$  et  $L$  : dimensions de l'éprouvette cylindrique.



**Figure II.11-**Dispositif expérimental (Essai Brésilien). [21]



**Figure II.12-** Schéma de la Traction indirecte.[21]

Le tableau II.7 donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la traction proposée par la société internationale de mécanique des roches.

**Tableau II.7 :** Classification des roches en fonction de la résistance à la traction.[21]

Roches	Faiblement résistantes	Moyennes	Résistantes	Très résistantes
Rt (MPa)	0.40	1.50	4.00	>20

### II.3.7- La résistance au cisaillement :

La résistance au cisaillement d'un sol est la résistance interne par unité de surface qu'un sol peut offrir pour résister à une rupture ou à un cisaillement le long d'un plan. Elle représente la contrainte tangentielle limite avant la rupture dans un essai de cisaillement. [22]

On distingue :

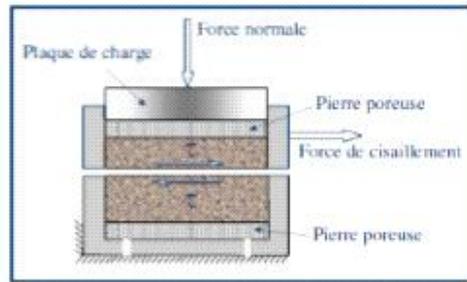
- ✓ Cisaillement direct.
- ✓ Cisaillement simple.
- ✓ Cisaillement triaxial.

#### II.3.7.1- Cisaillement direct :

En mécanique des sols, les premiers types d'essai sont historiquement les essais de cisaillement direct (Coulomb en 1776). L'appareillage nécessaire pour effectuer cet essai est la boîte de Casagrande.

Le principe consiste à cisailer une éprouvette suivant un plan déterminé à l'avance en exerçant un effort normal constant et un effort tangentiel croissant. Les contraintes appliquées sont totales au départ. Ensuite, l'éprouvette est progressivement cisailée. La boîte de

Casagrande comprend deux boîtes qui viennent coiffer l'éprouvette à tester, en laissant libre une zone centrale de faible épaisseur. (figure II.13). [22]



**Figure II.13** -Cisaillement direct à la boîte de Casagrande. [22]

Au cours de l'essai, l'effort de cisaillement augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale, qui correspond à la rupture de l'éprouvette en cisaillement (effort de cisaillement de pic), puis il décroît rapidement pour atteindre un palier avec un effort constant correspondant au cisaillement de la fissure obtenue (effort de cisaillement résiduel). . L'avantage de cet essai consiste en sa rapidité et sa simplicité ainsi qu'il est peu coûteux. [22] Par contre ses inconvénients sont les suivants :

- Contrôle du drainage (difficile pour les sols fins).
- L'essai n'est utile que dans des cas complètement drainés.
- On force la rupture sur un plan qui n'est pas nécessairement le plus critique.
- On crée une concentration de contraintes sur les bords.

Dans la boîte de cisaillement, la contrainte normale  $\sigma_n$  et la contrainte tangentielle  $\tau$  ne sont connues que sur un seul plan. Il n'est donc pas possible en général de tracer un cercle de Mohr (on ne connaît pas  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  à cause de la rotation des contraintes). Toutefois, à la rupture, il est possible de tracer le cercle de Mohr. La perpendiculaire à l'enveloppe passant par  $\sigma_n$  donne le centre du cercle :  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ . [22]

### II.3.7.2- Cisaillement simple :

Comparable à l'essai de cisaillement direct. Le cisaillement est appliqué en haut et en bas de l'échantillon. Cet essai permet d'éviter le problème de concentration des contraintes rencontré dans l'essai de cisaillement direct. Il permet aussi d'effectuer des essais drainés et non drainés; ainsi que des chargements dynamiques ou Statiques. Dans cet essai, il y a rotation des contraintes comme dans le cisaillement direct. (figure II.14). [22]

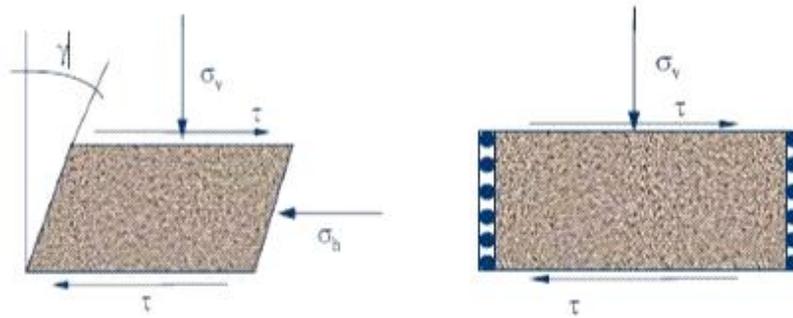


Figure II.14 -Principe du cisaillement simple. [22]

### II.3.7.3- Cisaillement triaxial :

L'essai triaxial est un test standard de laboratoire en mécanique des sols. L'appareil triaxial classique permettant d'effectuer cet essai a été conçu initialement par Bishop & Henkel. (figure II.16). Cet essai triaxial permet de contrôler les contraintes principales. [23]

Cet essai se réalise en soumettant un échantillon cylindrique à une pression hydrostatique de confinement  $c$  (contrainte dans la cellule). Une contrainte déviatorique est appliquée verticalement par un piston. (figure II.15). Puisque aucune contrainte extérieure de cisaillement n'est appliquée, les contraintes horizontale et verticale sont des contraintes principales. [23]

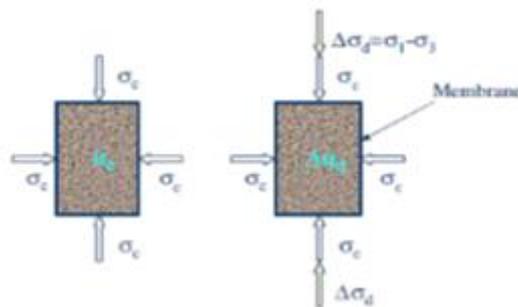


Figure II.15- Principe de l'essai Triaxial. [23]

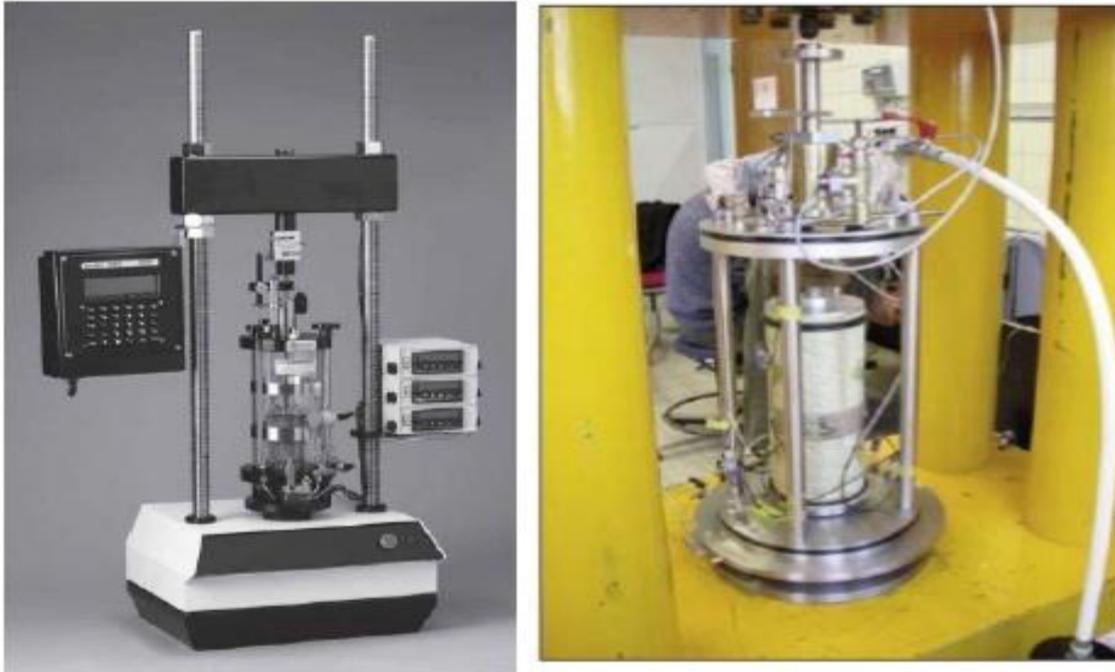


Figure II.16- appareil triaxial.

### II.3.8- La résistance à la fragmentation :

La détermination de ce paramètre au laboratoire se fait à l'aide de l'essai Los Angeles qui évalue la résistance à la fragmentation par chocs. (figure II.18). Un échantillon de fraction 10/14mm et de masse sèche égale à 5000 g ( $M_0$ ) est placé dans un tambour contenant 11 boulets d'acier (figure II-17).

Au cours de l'essai, le tambour effectue 500 tours à une vitesse de rotation comprise entre 31 et 33 tours par minute.

La friction des granulats entre eux et des granulats contre les boulets et les parois du tambour provoque leur dégradation plus ou moins accrue. [11]

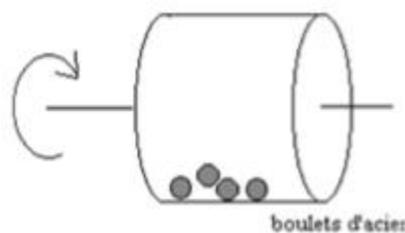


Figure II.17- Principe de l'essai Los Angeles. [11]

Le coefficient Los Angeles (LA) est un pourcentage en masse du rapport des éléments passant au tamis de 1.6 mm séchés après lavage ( $M_1$ ) et la masse sèche initiale des granulats intacts.

$$LA=100*(M_0-M_1)/(M_0)$$

Avec:

$M_1$  (g) masse du passant au tamis de 1,6 mm.

$M_0$  (g) masse initiale de granulats.



**Figure II.18-** Machine Los Angeles (le diamètre du tambour est d'environ 71 cm). [11]

### II.3.9- La résistance à l'usure :

La détermination de cette résistance d'usure en laboratoire s'effectue grâce à l'essai Micro Deval (MDE) qui est destiné à appréhender cette dernière par attrition d'un granulat. (Figure II.19 et II.20).

Quatre échantillons identiques de fraction 10/14 mm, sont soumis à un cycle d'usure, en présence d'eau, par contact avec des billes d'acier à l'intérieur d'un cylindre en rotation. Le degré d'usure est apprécié par détermination de proportion d'éléments fins, inférieurs à 1.6 mm générés au cours de l'essai. [11]



**Figure II.19** - Appareil Micro Deval. [11]



**Figure II.20** - Tambour avec billes en acier[11]

Mode opératoire :

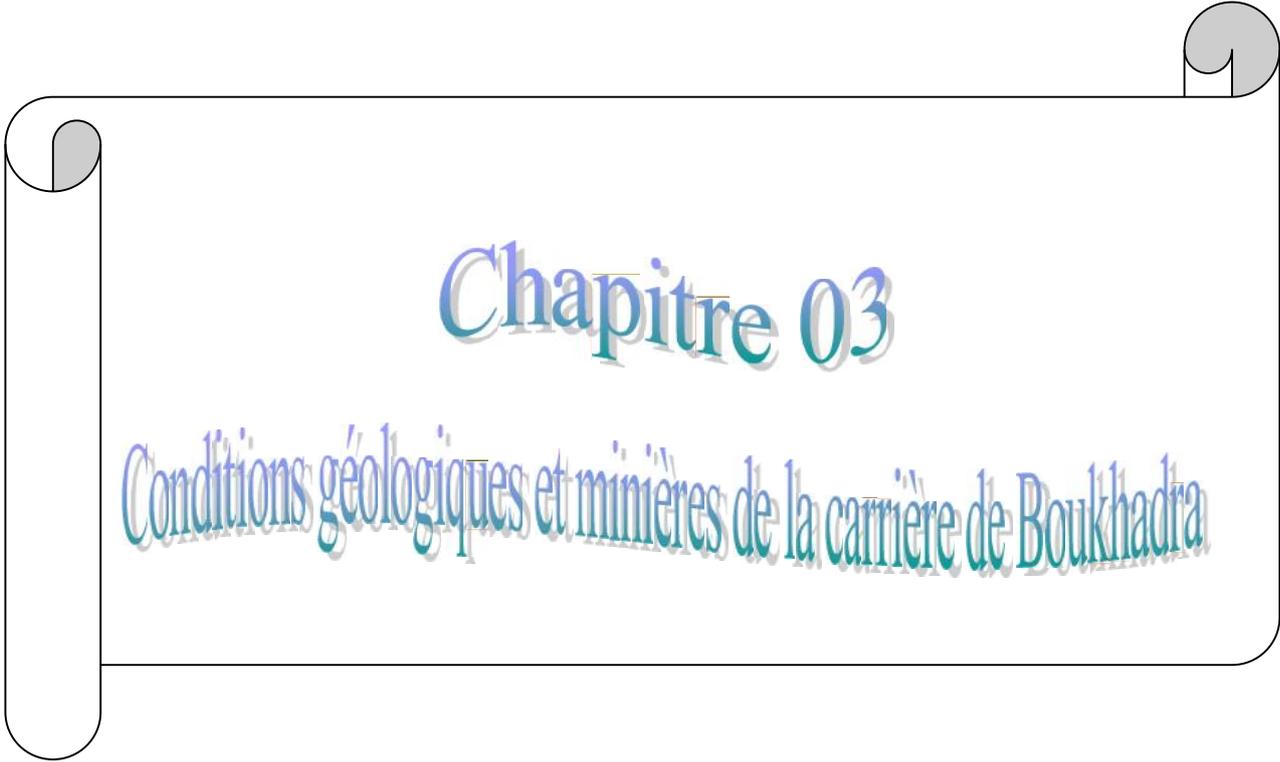
- Prise d'essai de 500 g lavée et séchée.
- Mise en place d'un tambour avec 5 kg de billes métalliques calibrées et 2.5 litres d'eau.
- Appliquer une rotation de 12000 tours au tambour à la vitesse de 100 tours/minute.
- Retirer alors la prise d'essai pour lavage au dessus d'un tamis de 1.6 mm.
- Peser le refus à ce tamis après séchage (M, exprimé en g).

$$\text{MDE} = (500 - M) / 500$$

Le coefficient MDE est la moyenne de deux déterminations sachant qu'une détermination est équivalente à un essai sur 2 échantillons 10/14mm de même nature.

#### **II.4- Conclusion :**

Dans ce chapitre, il a été souligné l'importance des propriétés physiques et mécaniques des massifs qui demeurent indispensables pour la reconnaissance géotechnique du site étudié. A l'aide des résultats des essais d'identification, nous pourrons établir une base de données sur laquelle s'appuiera toute étude de stabilité de talus ultérieure. Toute étude de stabilité doit donc s'attacher non seulement à bien connaître le comportement du massif proprement dit, mais aussi à identifier les caractéristiques et les « défauts » de ce dernier pouvant engendrer sa rupture.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and grey shading on the rolled-up ends, containing the chapter title and subtitle.

# Chapitre 03

Conditions géologiques et minières de la carrière de Boukhadra

## Chapitre III: Conditions géologiques et minières de la mine de Boukhadra

### III.1. Introduction :

Une connaissance rapprochée de la géologie du Djebel Boukhadra, de la technique d'exploitation du gisement, ainsi que sa préparation à la transformation est indispensable pour effectuer une étude géo-mécanique de ce massif rocheux qui demeure jusqu'à présent non identifiée.

### III.2. Historique de la mine :

L'exploitation de la mine de Boukhadra fut entamée durant l'époque Romaine. Pour l'extraction du cuivre dans la zone du pic; par la suite l'exploitation apportée sur le zinc et autres poly-métaux par la concession de Boukhadra. [24]

De 1903 à 1926, la concession de Mokta El Hadid avait entrepris des travaux de recherches systématiques par des galeries entre les niveaux 845-1225.

De 1926 à 1966, date de nationalisation des mines, c'était la société d'Ouenza qui exploitait le gîte de Boukhadra. Cette dernière avait effectuée la recherche systématique par des travaux miniers et par des sondages sur le gisement de Boukhadra.

Durant la période de 1967 à 1984, la Sonarem était chargée de l'exploitation et des recherches sur les gîtes ferrifères D'Ouenza et Boukhadra. Après la restructuration des entreprises (1983 - 1984), c'était FERPHOS qui gérait exploitait et développait ces recherches sur l'ensemble des gîtes ferrifères existants sur le territoire national.

Depuis la date du 18/10/2001, et dans le cadre de partenariat avec l'étranger, le holding a signé l'accord de partenariat avec Hadidouenza - Boukhadra filiale FERPHOS avec 70% pour la première.

### III.3. Conditions géologiques :

#### III.3.1. Situation géographique du gisement de Boukhadra :

Le Djebel de Boukhadra se situe sur l'Atlas saharien, à l'Est Algérien. L'unité de Boukhadra se trouve à une altitude de 850 m, le point culminant du Djebel est de 1463 mètres. La ville de Boukhadra fait partie de la wilaya de Tébessa. L'unité se situe à 45Km au Nord – Est de celle-ci, à 200Km au sud de la ville côtière de Annaba, et à 18Km de la frontière Tunisienne.

Elle est reliée à Annaba par une voie ferrée qui assure le transport du minerai de fer au complexe El-Hadjar. [24]

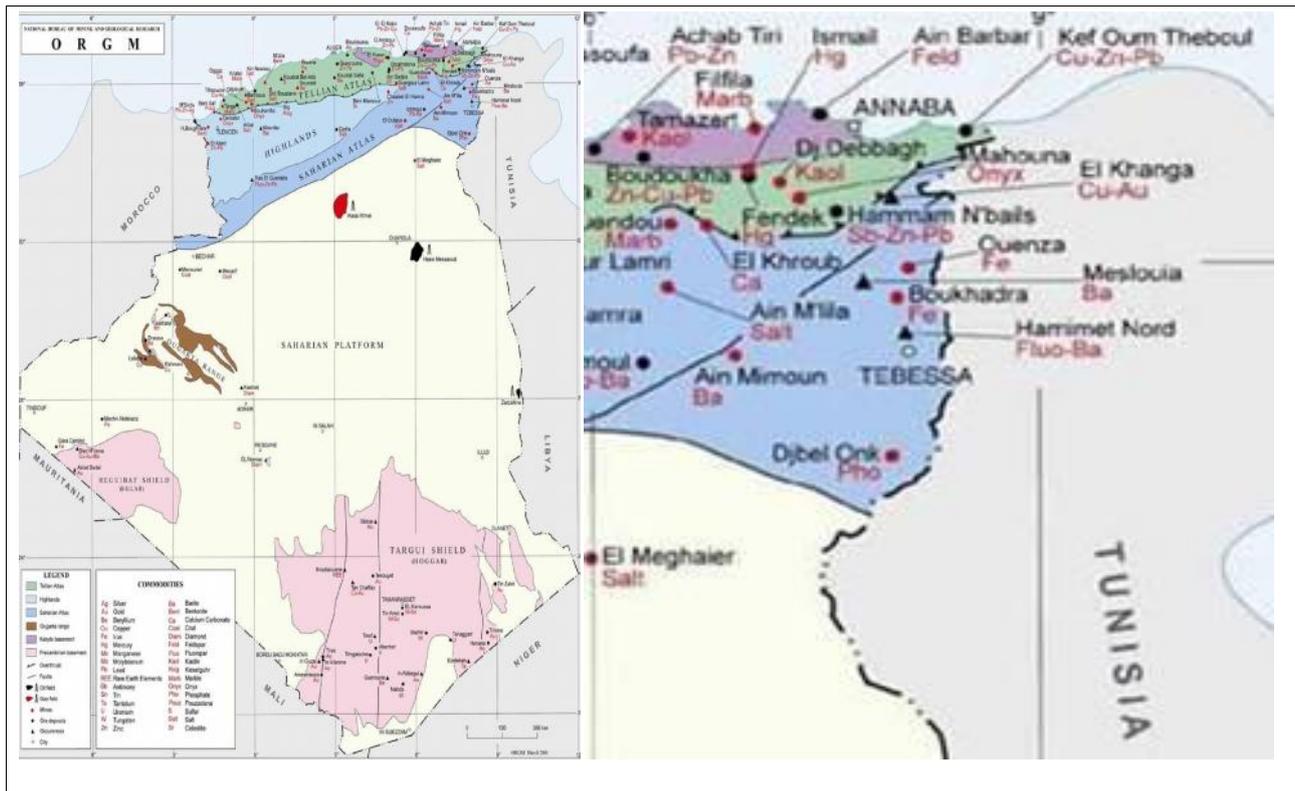


Figure III.1 - Situation géographique de la mine de Boukhadra. [25]

**III.3.2. Géologie régionale :**

**III.3.2.1. Stratigraphie et lithologie :**

Les travaux géologiques sur le minerai de fer ont montré une structure stratigraphique constituée par des sédiments du Mésozoïque et une partie du Tertiaire et du Quaternaire (voir figure III.2). [25]

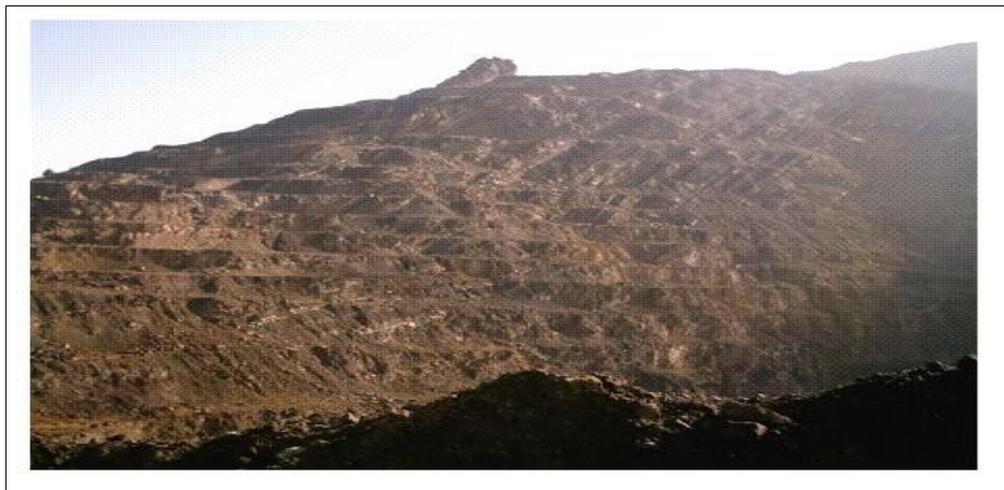


Figure. III.2 - Structure stratigraphique du Djebel de Boukhadra. [25]

**a) Le Trias :**

Les formations triasiques sont représentées dans les Sud-ouest sous forme d'affleurement à grande extension, recouverte seulement par endroit par les sédiments plus récents.

Les dépôts triasiques rencontrés dans la région de Boukhadra sont représentés par les Marnes bariolées à gypse, Dolomies (cargneules) débris de calcaires et grès. [25]

**b).Le Crétacé :**

Dans le profil du crétacé à séquence sédimentaire continue, nous retrouvons les dépôts, de l'Aptien, du Vraconien, du Cénomaniens, du Turonien et du Coniacien. [25]

**c). Tertiaire :**

Les dépôts classés comme tertiaires (Cénozoïque) sont observées uniquement dans la partie occidentale du domaine étudié. Ce sont en générale des conglomérats à éléments variés avec un ciment carbonaté et des intercalations des grès. La puissance maximale est décimétrique. [25]

**d). Quaternaire :**

Il s'agit principalement de limons et d'éboulis de pente, par endroit. Les alluvions et les limons ont en principe, une puissance ne dépasse pas les (20m), mais dans une zone de soubassement (au Sud Ouest du pic Boukhadra).

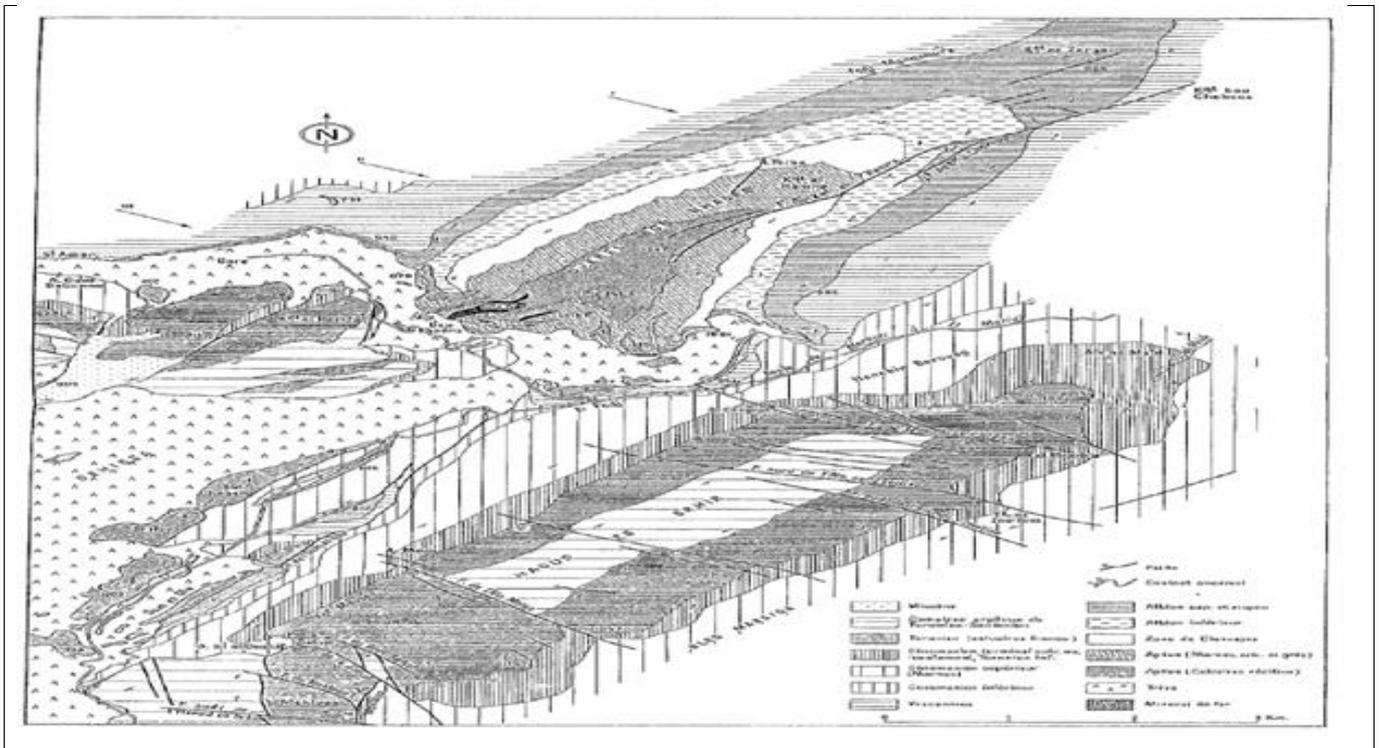
Ils atteignent probablement (100m). Ce sont des marnes avec débris et blocs de calcaires, grès par endroits de minerai hématique cimentés par des carbonates (conglomérats). [25]

**III.3.3.Tectonique du gisement :**

Le massif de Boukhadra se trouve dans le même anticlinal que l'Ouenza de direction N-E et coupant le biais du Sud Constantinois et le Nord Tunisien ; dans cette zone se trouvent des anticlinaux et synclinaux d'axe N-E ; S-W. Boukhadra est située sur l'un des axes anticlinaux passant également par le milieu des collines ; ces formes anticlinales synclinales sont des plis de couvertures dues aux plissements alpins. Ils sont coupés par des fosses d'effondrement pliocène dues à une tectonique profonde du socle s'abaissant par endroit.

Dans le cas de Boukhadra; son axe anticlinal est coupé au N-E et S-W par un effondrement coupant net les terrains du DJ Boukhadra. Cet effondrement est une partie de l'effondrement formant la vallée de Tebessa-Morssot; le gisement est coupé par une faille N-E de 55° à 65° de pendage aux environs des niveaux 1045 et 1000 ; on voit nettement des surfaces de glissement.

Du coté des calcaires cette zone est formée par des débris détritiques (débris et blocs de calcaires marnes ; argile). Plus bas ; elle est recouverte en partie par l'éboulement et plonge dans les accumulations triasiques. [26]



**Figure III.3** - Interprétation géologique du DJ. Boukhadra. [26]

**III.3.4.Morphologie du gisement :**

Le gisement renfermant le minerai de Fer est de forme ventriculaire de type hydrothermal sédimentaire d'une longueur de 900 à 2200m et d'une puissance variante de 10 à 50 m ; la minéralisation est de type fer hématite de formule chimique (F<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ; sa teneur moyenne est supérieure à 50% ; globalement le gisement de Boukhadra est composé de trois (03) corps minéralisés principaux et les petites veines de moindre importance: Corps principal; Corps Nord ; Corps Sud. [25]

**Tableau III.1** : Corps minéralisés de Boukhadra. [25]

	Profondeur (m)	Angle de pendage (°)
Axe Nord	391	60
Axe Sud – Est	320	54
Axe principale	215	54

### **III.3.5. Caractéristiques hydrogéologiques du gisement :**

Les études hydrogéologiques ont montré que la zone de Boukhadra souffre d'un grand manque d'eau, et ne répond donc pas ni aux besoins de la population, ni à ceux des installations minières.

Selon le relief la géomorphologie, deux sources apparaissent en surface.

Dans le niveau 977m, une source à débit faible (Ain Zazia) qui aide à combler le manque d'eau rencontré auprès de la population.

Dans le niveau amont 926m, un mince filet d'eau apparaît entre les marnes. Cette eau est récupérée par une citerne pour l'arrosage de la piste ainsi dans les forages. [25]

### **III.4. Conditions minières :**

#### **III.4.1. Les réserves géologiques :**

##### **III.4.1.1. à ciel ouvert :**

Dans la mine de Boukhadra l'exploitation à ciel ouvert se compose de trois sites :

##### a). site carrière principale (Amont) :

C'est le premier site d'exploitation à ciel ouvert, il se situe entre les niveaux 830 et 1225, ses réserves géologiques sont de 24.817.641 T, avec une teneur de 75,15%, en fer, et les réserves exploitables sont évaluées à 10.600.000T. Avec une teneur en fer de 54,52%. Le volume de stérile est de 13.752.000 m<sup>3</sup>. [25]

##### b). Site carrière BK :

C'est le prolongement du corps sud, son exploitation a débuté en (1997) avec des réserves globales géologiques de 3.098.208 T, avec une teneur en fer de 56,95% et exploitables de 3.033.652 T, à 54,95% en fer et un volume de stérile de 346.200 m<sup>3</sup>.

Pour l'axe Sud - Est l'exploitation s'effectue par mode combine (ciel ouvert et souterrain).

Elle présente des réserves exploitables de 1.321.861 T, à une teneur de 53,19 % de fer. [25]

##### c). Site Pic (en épuisement) :

Carrière à ciel ouvert, étant conçue pour l'exploitation de la suite du corps nord de la carrière principale. L'exploitation du minerai a débuté en 1993 avec des réserves géologiques totales de 1.393.283T, à 52,76% de fer et de réserve exploitable de 1.360.088 T, à 51,17% de fer. Le volume de stérile est de 325.746 m<sup>3</sup>. [25]

**III.4.2. Régime de travail :**

La capacité de production du minerai est de 300000 tonnes par an. [25]

Les performances relatives à l'exploitation sont consignées dans le tableau suivant :

**Tableau III.2:** La répartition en temps de production du minerai de fer. [25]

Désignations	P r o d u c t i o n			
	Annuelle	Mensuelle	SEMAINE	Journalière
Minerai	300000 T	25000 T	6250 T	1250 T

Le régime de travail conforme à la demande des travaux, est donné dans le tableau III.3.

**Tableau III.3:** Régime de travail de la mine de Boukhadra. [25]

Régime de travail	Foration et Tir	Transport Chargement
Nombre de jours ouvrables par an	248	248
Nombre de jours ouvrables par semaine	5	6
Nombre de postes ouvrables par semaine	10	12
Nombre d'heures de travail par poste	8	8

**III.4.3. Méthode d'exploitation :**

La méthode d'exploitation est la manière par laquelle se font les travaux d'exploitation.

A l'exception du site BK (corps sud-est) où l'exploitation est menée en mode combinée, pour le reste des sites l'exploitation se fait à ciel ouvert; Celle-ci est représentée par une succession de gradins qui sont abattus à l'explosif.

**III.4.3.1. Eléments du système d'exploitation :** [25]**a) La hauteur du gradin :**

La hauteur des gradins de la carrière de Boukhadra est 7.5 m.

**b) Angle du talus du gradin :**

L'angle des talus est généralement pris égal à 85°.

**c) Plate-forme de travail :**

Elle est déterminée en fonction de la taille des engins. La plate forme de la carrière a des dimensions variables, elle est en moyenne de 40 m.

**d) Longueur du bloc :**

Le gradin est divisé en blocs qui sont par la suite exploités par des moyens d'abattage et de chargement. Le volume du bloc est en fonction de la production, il est en général égal à la capacité d'une volée de tir.

La longueur du bloc est donnée par la relation :  $L_B = V_B/S_l$  (cf. figure I.4), ou bien elle peut être déterminée par :

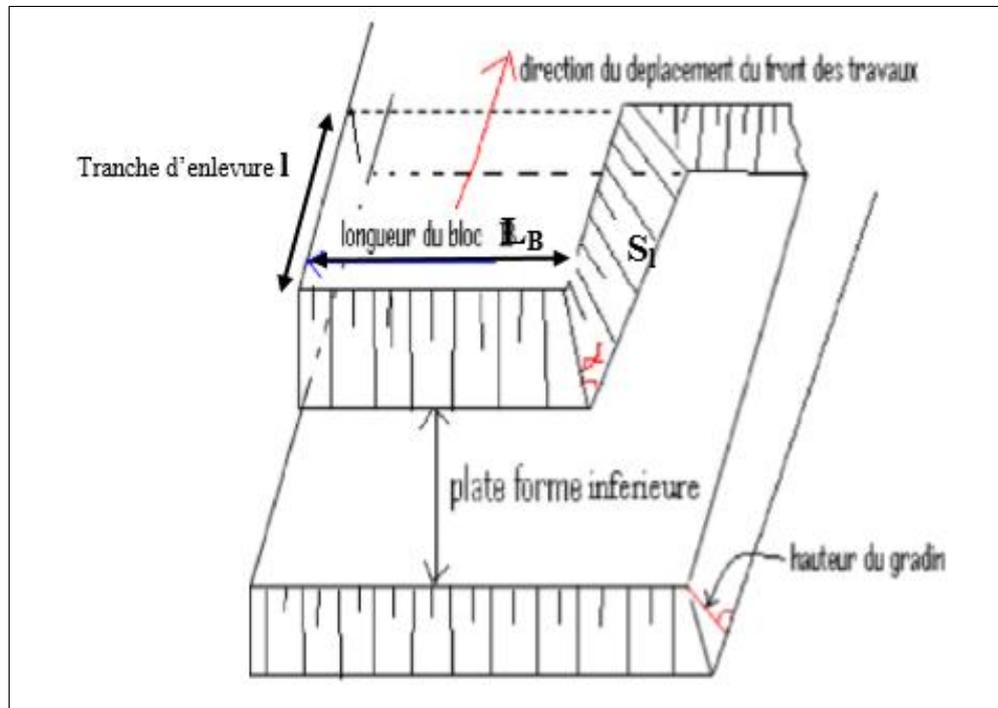
$$L_B = (N_t - 1) * E$$

$V_B$  : volume des roches à abattre.

$S_l$  : surface latérale du tir = tranche d'enlèvement \* (hauteur du gradin/sin ).

$N_t$  : nombre de trous.

E: distance (Espacement) entre deux trous.



**Figure III.4-** Eléments du système d'exploitation.

**e) Abattage des roches :**

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

**f) Foration :**

Au niveau de la mine de Boukhadra, la foration des trous de mine, est réalisée par un chariot de foration de type : MERCURY (1FP). [25]

Ces caractéristiques techniques sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau III.4** : Caractéristiques techniques de chariot de forage MERCUR( FP1). [25]

Marque	MERCURY (1FP)
Moteur	Diesel (cat 3196 ATAAC)
Type de compresseur	XRV9
Pression de travail maximal	25 bars
Diamètre du trou	65 mm
Direction de forage	Incliné
Vitesse de rotation	30÷80 tr / min
Vitesse de déplacement	3,4 km/h
Angle de forage	60°÷90°
Poussée maximal	40 kn
Force de traction	14729 kgf
Type de mécanisme de translation	Sur pneu
Profondeur maximal de forage	12 m
Longueur de la tige	1,2 m
Nombre des tiges	10
Largeur	2290 mm
Longueur	8250 mm
Hauteur	2995 mm
Poids	19900 kg

**g). Le Tir :**

Après avoir foré des trous on introduit à l'intérieur de chaque trou une cartouche d'amorçage de MARMANIT au-dessus duquel on place l'ANFOMIL et au-dessus de ce dernier on place le bourrage.

Le bourrage permet d'avoir une bonne explosion et permet surtout d'arrêter le soufflage de l'explosif en l'air durant la détonation.

Les explosifs sont reliés entre eux par un cordon détonateur ce qui permet l'explosion en une rafale.

- **Diamètre du trou :**

Le diamètre des trous est 171 mm.

- **Inclinaison des trous :**

Les trous sont forés dans les gradins avec une inclinaison de  $85^\circ$ . (Même inclinaison que le gradin).

- **Sous foration,  $L_s$  :**

Pour avoir un bon pied de gradin il est conseillé de sous forer, à Boukhadra la sous foration est égale à 4 m, donc  $L_s = 4$  m.

- **La Profondeur du trou,  $L_{tr}$  :**

La longueur des trous est donnée par la relation suivante :

$$L_{tr} = L_s + (hg/\sin 85^\circ).$$

Hg : hauteur de gradin.

$L_s$  : longueur de sous forage.

Pour un gradin de 7.5 m  $L_{tr} = 4 + 7.5/\sin 85^\circ$   $L_{tr} = 11.5$  m.

- **Bourrage,  $L_b$  :**

La longueur de bourrage appliqué à Boukhadra est  $L_b = 2,5$  m, La matière de bourrage est par les papiers et les Sachées (les débris de forage).

- **Longueur de charge,  $L_{ch}$  :**

Elle est égale à la différence entre la profondeur du trou et la longueur de bourrage

$$L_{ch} = L_{tr} - L_b.$$

Pour un gradin de 7.5 m, il a été trouvé  $L_{tr} = 11.5$ m, donc  $L_{ch} = 11.5 - 2.5 = 9$ m.

- **Type d'explosif :**

Les explosifs utilisés sont la MARMANIT (II) et l'ANFOMIL.

### III.4.4. Chargement et transport :

#### III.4.4.1. Chargement au niveau de la mine de Boukhadra :

Le chargement des roches abattues constitue l'un des principaux procédés technologiques. Actuellement ; le type de chargement existant au niveau de la mine de Boukhadra, est une chargeuse transporteuse de type ATLAS COPCO (ST1020) dont les caractéristiques techniques sont présentées dans le tableau III.5. [25]

**Tableau III.5** : Caractéristiques techniques de chargeuse ATLAS COPCO (ST1020). [25]

Caractéristiques	Valeurs	Unités
Atlas copco (ST1020)	/	/
Puissance du moteur	250	Cv
Capacité du godet	5,0	m <sup>3</sup>
Longueur	9745	Mm
Hauteur	2355	Mm
Hauteur max	5060	Mm
Largeur	2260	Mm
Garde au sol	30	Mm
Poids total	26300	Kg

**III.4.4.2. Equipement de transport utilisé dans la mine de Boukhadra :**

Au niveau de la mine de fer de Boukhadra, l'équipement de transport utilisé est le camion de type ATLAS COPCO (MT 2000) ;( deux camions) dont les caractéristiques techniques sont présentées dans le tableau III.6. [25]

**Tableau III.6** : Caractéristiques techniques du camion ATLAS COPCO MT 2000. [25]

Caractéristiques techniques	Valeur	Unité
Puissance de volant moteur : Nette (SAE)	300	CV
Capacité de la benne	10	m <sup>3</sup>
Charge utile nominal	20	T
Longueur	9146	Mm
Largeur	2311	Mm
Hauteur hors tout	2268	Mm
Hauteur de chargement	4506	Mm

**III.5. Conclusion :**

L'étude géologique révèle clairement que le gisement de Boukhadra est certainement un gisement de grande valeur qualitative et quantitative et nécessite donc une attention assez délicate par la reconnaissance des paramètres géo-mécanique de son massif rocheux.

# Chapitre 04

Détermination des propriétés physico-mécanique du massif de Boukhadir

## Chapitre IV: Détermination des propriétés physico-mécanique du massif de Boukhadra

### IV.1.Introduction :

La résolution des problèmes de stabilité encouru depuis le temps dans la mine de Boukhadra réside en premier lieu dans l'analyse des caractéristiques naturelles du massif en soit en vue d'en déterminer les propriétés physico-mécaniques, la réalisation de cela grâce à notre étude est un pas gigantesque pour tous les acteurs industriels techniques et scientifiques en Algérie à commencer par l'entreprise Arcelormittal, car c'est une première depuis sa création.

### IV.2.Détermination des propriétés physiques :

Les essais de détermination des propriétés physiques du gisement de Boukhadra ont été effectués au laboratoire de C.E.T.I.M de Boumerdes.

#### IV.2.1. Masse volumique réelle (MVR) :

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon au volume de la matière solide de celui-ci, y compris les pores.

$$M_{vr} = M_s / (M_{sat} - M_a) \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$M_{sat}$  : la masse saturé en eau

$M_s$  : la masse sèche de l'échantillon

Tel que :  $M_s = 579.8\text{g}$  ;

$$M_{sat} = 612.7\text{g} ;$$

$$M_a = 381.2\text{g} ;$$

$$M_{vr} = 2.505 \text{ (g/cm}^3\text{)}.$$

#### IV.2.2. Masse volumique imbibée (MVI) :

Masse volumique des solides imbibés d'eau

$$M_{vi} = M_{sat} / (M_{sat} - M_a) \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$M_{vi} = 2.647 \text{ (g/cm}^3\text{)}.$$

#### IV.2.3. Le poids volumique sec $\gamma_s$ :

Le poids volumique à l'état sec est déterminé par la formule suivante :

$$d = \frac{P_s}{V_s} \text{ (KN/m}^3\text{)}$$

Où

$P_s$ : Poids de l'échantillon à l'état sec.

$V_s$  : Volume de l'échantillon à l'état sec

Pour cela, chaque échantillon a été mis dans une éprouvette cylindrique dont sa hauteur est (h) et son diamètre est (d). Cet échantillon a été placé dans une étuve à une température de 110° durant 24 heures. Après, l'échantillon a été pesée à l'état sec pour avoir la masse sèche ( $M_s$ ).

A partir de ces données, le poids sec a été tiré par la formule suivante :

$$P_s = M_s \cdot g ; \quad \{ M_s : \text{masse sèche de l'échantillon en kg.} \\ \{ g : \text{accélération de la pesanteur} = 9.81 \text{ m/s}^2. \\ V_s = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4} ; \quad \{ d : \text{diamètre de l'éprouvette en m.} \\ \{ h : \text{hauteur de l'éprouvette en m.}$$

$$M_s = 579.8 \text{ g.}$$

Le poids volumique sec  $d = 27.34 \text{ KN/m}^3$ .

#### IV .2.4. Le poids volumique humide $h$ :

Un échantillon de masse totale  $M_T = 586.3 \text{ g}$ , a été placé dans une tare pour le sécher dans une étuve à une température de l'ordre de 110° durant 24 heures. Une mesure de la masse sèche de l'échantillon est trouvée égale à  $M_s = 579.8 \text{ g}$ .

La masse en eau  $M_w$  peut être déduite par :  $M_w = M_T - M_s \quad M_w = 6.8 \text{ g}$ .

La teneur en eau est le rapport entre la masse en eau d'un échantillon et la masse des grains solide de ce dernier. Donc  $W = (M_w / M_s) \times 100 \quad W = 1.12\%$ .

Connaissant le poids volumique sec  $d = 27.34 \text{ KN/m}^3$ , il est possible de déterminer le poids volumique naturel ou humide grâce à la formule suivante :

$$h = (1+W) \cdot d \quad (\text{KN/m}^3)$$

Finalement, il a été trouvé  $h = 27.64 \text{ KN/m}^3$ .

Le poids volumique naturel du massif rocheux se situe dans l'intervalle donné pour les roches carbonatées et est cohérent avec ce qui a été présenté par Hoek et Bray en 1981 comme le montre le tableau IV.1 ci-dessous :

**Tableau IV.1** : Valeur typiques de poids volumiques et des caractéristiques mécaniques de certains types de roches (d'après Hoek and Bray 1981). [18]

Type de roche	Poids Volumique (kN/m <sup>3</sup> )
Roches ignées (granite, basalte).	25-30
Roches métamorphiques (quartzite, gneiss)	25-28
<b>Roches sédimentaires dures (Calcaire, Dolomie, Grès).</b>	<b>23-28</b>
Roches sédimentaires friables (Charbon, Craie, schiste argileux).	17-23

#### IV .2.5. L'indice d'altération (i) :

Après avoir eu la masse sèche de l'échantillon  $M_s$ , ce même échantillon a été immergé dans l'eau distillée pendant 24 heures pour qu'il soit pesé juste après afin d'avoir la masse saturée,  $M_{sat}$ .

A partir de ces deux données, l'indice d'altération a été calculé avec la formule suivante :

$$i = \left( \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \right) \times 100$$

Où

$M_s$  : Masse sèche de l'échantillon.

$M_{sat}$  : Masse saturée de l'échantillon.

$M_s = 579.8\text{g}$  et  $M_{sat} = 612.7\text{g}$  ;

L'indice d'altération de l'échantillon est  **$i = 5.6\%$** .

#### IV. 2.6. La porosité n :

C'est le rapport du volume des vides  $V_v$  de l'échantillon au volume total de cet échantillon  $V_t$  :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100\%$$

$V_v = M_{sat} - M_s = 612.7 - 579.8 = 32.9 \text{ cm}^3$  et  $V_t = M_a - M_a = 612.7 - 381.2 = 231.5$ .

La porosité est **14.212 %**.

La porosité du l'échantillon se situe dans l'intervalle donné pour les roches grés et calcaire

**Tableau IV.2** : Intervalles de porosité de plusieurs roches communes (d'après Farmer. E, 1968 ; In Winkler E.M, 1994). [8]

Roche (pierre)	Porosité (%)
Granite	00.5-1.50
Gabbro	00.1-0.20
Rhyolite	4.00-4.60
Andésite	10.0-15.0
Basalte	0.10-1.00
Grés	<b>5.00-25.0</b>
Schiste	10.0-30.0
Calcaire	<b>5.00-20.0</b>
Dolomite	1.00-5.00
Gneiss	0.50-1.50
Marbre	0.50-2.00
Quartzite	0.10-0.50
Ardoise	0.10-0.50

#### IV .2.7. Le degré de saturation :

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \times 100$$

$$V_w = 6.8 \text{ cm}^3 \quad , \quad V_v = M_{\text{sat}} - M_s = 612.7 - 579.8 = 32.9 \text{ cm}^3;$$

$$S_r = 21\%.$$

#### IV.2.8. Fissuration des roches :

La fissuration du massif rocheux influe sur les propriétés mécaniques du massif et sur la stabilité des talus. C'est le facteur le plus important qui caractérise les roches et les sols. Elle permet de choisir la méthode d'exploitation, de résoudre le problème de la stabilité des bords de la carrière, du talus ...

La fissurité est égale à la distance moyenne entre les fissures. Il est donné par la formule suivante :

$$ID = \frac{L}{n}$$

L : longueur de la partie étudiée du massif (en m).

n : nombre de fissures sur la partie mesurée.

Nous avons effectué des mesures de la fissuration sur la carotte. . Le nombre moyen de fissure sur la longueur de 1 m est de 5 environ ce qui donne une valeur de  $ID = 0,2$  m (20 cm). D'après le tableau II.2. On peut dire que la densité de la fissuration dans la carrière de Boukhadra est moyenne.

#### IV .2.9. Module de Young :

La loi d'élasticité est la loi de Hooke.

$$= .E$$

La valeur de module de Young est ;

$$E = 4090.9 \text{ Mpa.}$$

**Tableau. IV.3 :** Classification selon Le module de Young. [10]

Module $E_t$ en (MPa)	Description
> 30 000	Très faible déformation
30 000 à 10 000	Faible déformation
<b>10 000 à 3000</b>	<b>Moyenne déformation</b>
3000 à 1000	Forte déformation
< 1000	Très forte déformation

#### IV .3. Détermination des propriétés mécaniques des échantillons:

Pour connaître les propriétés de résistance, il a suffi d'utiliser des essais destructifs avec des presses d'une capacité très élevée. Les essais mécaniques effectués sur des échantillons et ont porté sur la détermination de la résistance à la compression simple et résistance à la traction indirecte (brésilien).

### IV .3.1. Résistance à la compression :

L'essai a été réalisé avec une presse hydraulique. L'éprouvette cylindrique utilisée pour cet essai est de diamètre  $D = 50$  mm et d'une longueur  $L = 100$  mm. L'essai doit être réalisé avec une éprouvette cylindrique dont l'élanement entre la longueur  $L$  et le diamètre  $D$  de cette dernière doit être compris dans l'intervalle  $[2, 2.5]$ ,

La formule utilisée pour la détermination de  $R_C$  est la suivante :

$$R_C = F/S \text{ (MPa)}$$

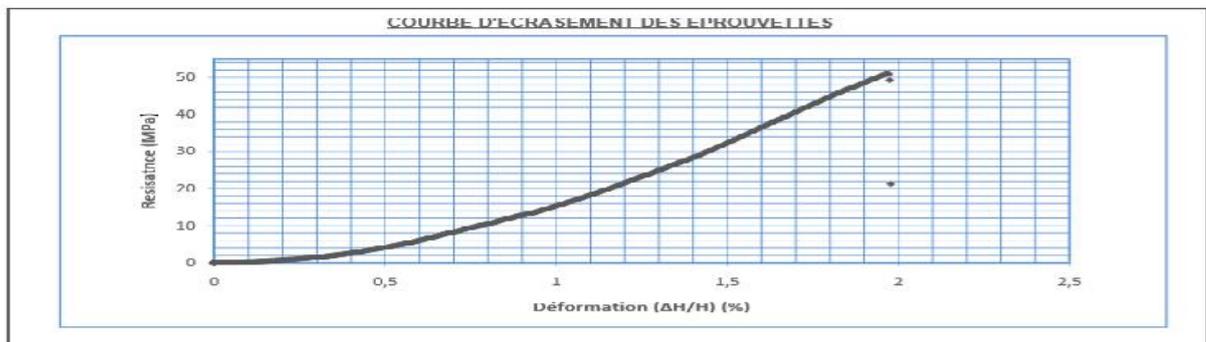
Où

$F$  : effort (charge) maximale atteinte (juste avant la rupture) en KN.

$S$  : section ou surface sur laquelle on applique l'effort  $F$  en  $m^2$ .

**Tableau IV.4** : La valeur de la Résistance à la compression.

Echantillon	Surface $S$ ( $m^2$ )	Charge max. $F_{max}$ (KN)	Résistance $R_C$ (Mpa)
1	0.0019	100.09	51.01



**Figure IV.1-** Courbe d'écrasement d'éprouvette par la compression.

### IV.3.2. Résistance à la traction indirecte (essai brésilien) :

L'essai a été réalisé avec une presse hydraulique. L'éprouvette cylindrique utilisée pour cet essai est de diamètre  $D = 50$  mm et d'une longueur  $L = 100$  mm

La mise en place et centrage de l'éprouvette est effectué par placer l'éprouvette et les bondes de chargement entre les plateaux de la presse à l'aides du gabarit de centrage (le gabarit doit permettre un centrage à 0.5 mm près ) et après appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs ,la vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai .

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

$$R_t = \frac{20F}{h d \pi} = 6.37 \frac{F}{h d}$$

F : la charge maximale en (KN)

d : le diamètre de l'éprouvette en (cm).

h : la hauteur de l'éprouvette en (cm).

**Tableau IV.5 :** La valeur de la Résistance à la traction (essai brésilien).

Echantillon	Surface S (cm <sup>2</sup> )	Charge max. F <sub>max</sub> (KN).	Résistance à la traction R <sub>t</sub> (Map).
1	19.62	45.51	5.79

### IV.3.3. Cohésion et angle de frottement interne :

Pour déterminer la cohésion et l'angle de frottement interne des échantillons, nous avons utilisé les deux relations suivantes :

$$C = \frac{R_c * R_t}{2 * \sqrt{R_c * R_t - 3 * R_t^2}}$$

$$\varphi = \arcsin \frac{R_c - (4 * R_t)}{R_c - (2 * R_t)}$$

Les valeurs obtenues de (C<sub>ech</sub>) et (φ<sub>ech</sub>) sont indiquées dans le tableau IV.6.

**Tableau. IV.6 :** les Valeurs obtenues de (C<sub>ech</sub>) et (φ<sub>ech</sub>).

Echantillon	Cohésion	Angle de frottement interne
1	C <sub>ech</sub> = 10.58 Mpa	φ <sub>ech</sub> = 44.91°

### IV.4. Détermination des caractéristiques mécaniques du massif rocheux :

Soit C<sub>m</sub> et φ<sub>m</sub> la cohésion et l'angle de frottement interne des roches se trouvant dans le massif rocheux. Pour déterminer les propriétés mécaniques C<sub>m</sub> et φ<sub>m</sub> du massif rocheux, il est nécessaire de tenir compte de plusieurs paramètres correctifs qui sont principalement :

- ✓ Le coefficient d'affaiblissement structural du massif rocheux .
- ✓ Le coefficient de diminution de la valeur de l'angle de frottement interne .

Les valeurs de  $C_m$  et  $\phi_m$  sont déterminées par les formules suivantes :

$$C_m = \alpha \cdot C_{ech} ;$$

$$\phi_m = \beta \cdot \phi_{ech} ;$$

$C_m$  et  $\phi_m$  : cohésion en Kpa et angle de frottement interne en degré du massif ;

$C_{ech}$  et  $\phi_{ech}$  : cohésion en Kpa et angle de frottement interne en degré de l'échantillon ;

$\alpha$  et  $\beta$  : coefficients correctifs (sans unités).

#### IV.4.1. Coefficient d'affaiblissement structural du massif rocheux :

Le coefficient d'affaiblissement structural du massif rocheux ( $\lambda$ ) est calculé en utilisant la formule :

$$\lambda = \frac{1}{1 + a \cdot \ln \frac{H_g}{h}}$$

$a$  : coefficient dépendant de la résistance des roches et du caractère de fissuration.

$H_g$  : la hauteur moyenne du gradin (m).

$h$  : la distance moyenne entre les fissures (m).

Les valeurs du coefficient « a » en fonction de la cohésion sont données dans le tableau IV.7

**Tableau IV.7 :** Coefficient « a » en fonction de la cohésion C.

A	0	0.5	2	3	4	7	10
$C_{ech}$ (kpa)	0-1.5	1.5-9	10-30	50-80	100-200	200-300	>300

- $a = 10$  ( $C_{ech} = 10580 > 300$  kpa) ;
- $H_g = 7.5$  m (hauteur des gradins) ;
- $h = 0,2$  m (voir paragraphe IV.2.8) ;

La valeur du coefficient d'affaiblissement structural du massif est :  $\lambda = 0.026$ .

#### IV.4.2. Le coefficient de diminution de la valeur de l'angle de frottement interne :

Généralement, la valeur du coefficient de diminution de la valeur de l'angle de frottement interne est prise égale à 0,8. ( $\beta = 0,8$ ).

#### IV.4.3. Détermination de la cohésion du massif rocheux :

La cohésion de la formation rocheuse dans le massif est donnée par la relation suivante :

$$C_m = \lambda \cdot C_{ech}$$

$C_{ech}$  : cohésion de l'échantillon en kpa.

$\lambda$  : coefficient d'affaiblissement structural.

#### IV.4.4. Détermination de l'angle de frottement interne du massif rocheux :

L'angle de frottement interne du massif rocheux est donné par la relation :

$$\alpha_m = \lambda \cdot \alpha_{ech}$$

$\alpha_{ech}$  : angle de frottement interne de l'échantillon en degré.

$\lambda$  : coefficient de diminution de la valeur de l'angle de frottement interne (0,8).

Les valeurs de l'angle de frottement interne et la cohésion du massif rocheux calculées sont données dans le tableau IV.8 :

**Tableau IV.8 :** Cohésion ( $C_m$ ) et angle de frottement interne ( $\alpha_m$ ) de massif rocheux.

Massifs rocheux	Valeurs
$C_m$ (Mpa)	0.275
$\alpha_m$ (°)	35.92

#### IV.5. Les paramètres physiques des différentes formations dans Boukhadra :

Le tableau suivant montre les propriétés physiques de différentes roches existant dans le djébel de Boukhadra.

**Tableau IV.9 :** Les paramètres physiques de différentes formations dans Boukhadra

Zone	w %	s (gr/cm <sup>3</sup> )	d (gr/cm <sup>3</sup> )	$S_r$ %	$\rho_i$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{sat}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	n%
Marne jaune	1.316	2.11	1.98	34.08	2,2	2.6	6.5
Marne minéralisé	2.159	2.04	1.82	37.57	2.4	2.5	12
Grès	1.568	2.17	1.82	37.53	2.3	2.7	15
Conglomérat	2.433	2.35	1.33	7.19	2.2	2.4	79
Calcaire	3.801	2.55	1.68	21.19	2.6	2.65	51

**IV.6. Les Paramètres mécaniques pour chaque couche :**

Le tableau suivant montre la résistance à (compression, traction) de chaque couche existant dans le djébel de Boukhadra.

**Tableau IV.10 :** Les valeurs de la résistance à la (compression, traction) de calcaire, marne et minerais de Fer de dans le djébel de Boukhadra.

Caractéristiques	Rc (Mpa)	Rt (Mpa)
Roches		
Calcaire	118.62	11.86
Marne	13.92	2.39
Minerais de Fer	78.4	7.84

**IV.6.1. la cohésion et l'angle de frottement interne dans la couche calcaire :**

Vue l'absence de l'essai de cisaillement pour les roches concernées, la détermination de la cohésion et de l'angle du frottement interne du calcaire est faite en passant par le critère de Hoek et Brown qui a été présenté auparavant (chapitre II : propriétés physico- mécaniques des roches), en utilisant la formule suivante :

$$\tau = A * Rc \left( \frac{\sigma_n}{Rc} - T \right)^B$$

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

Rc : est la résistance à la compression uniaxiale de la roche.

$\tau$  : est la résistance au cisaillement.

$\sigma_n$ : est la contrainte normale.

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

$$T = \frac{1}{2} \left( \frac{m - \sqrt{m^2 - 4s}}{m} \right)$$

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

Hoek et Brown ont proposé, en fonction de la nature lithologique dominante et du degré de fracturation et de l'altération moyenne du massif, des lois de comportement empiriques pour les masses rocheuses considérées (voir paragraphe II.3.3 chap 02).

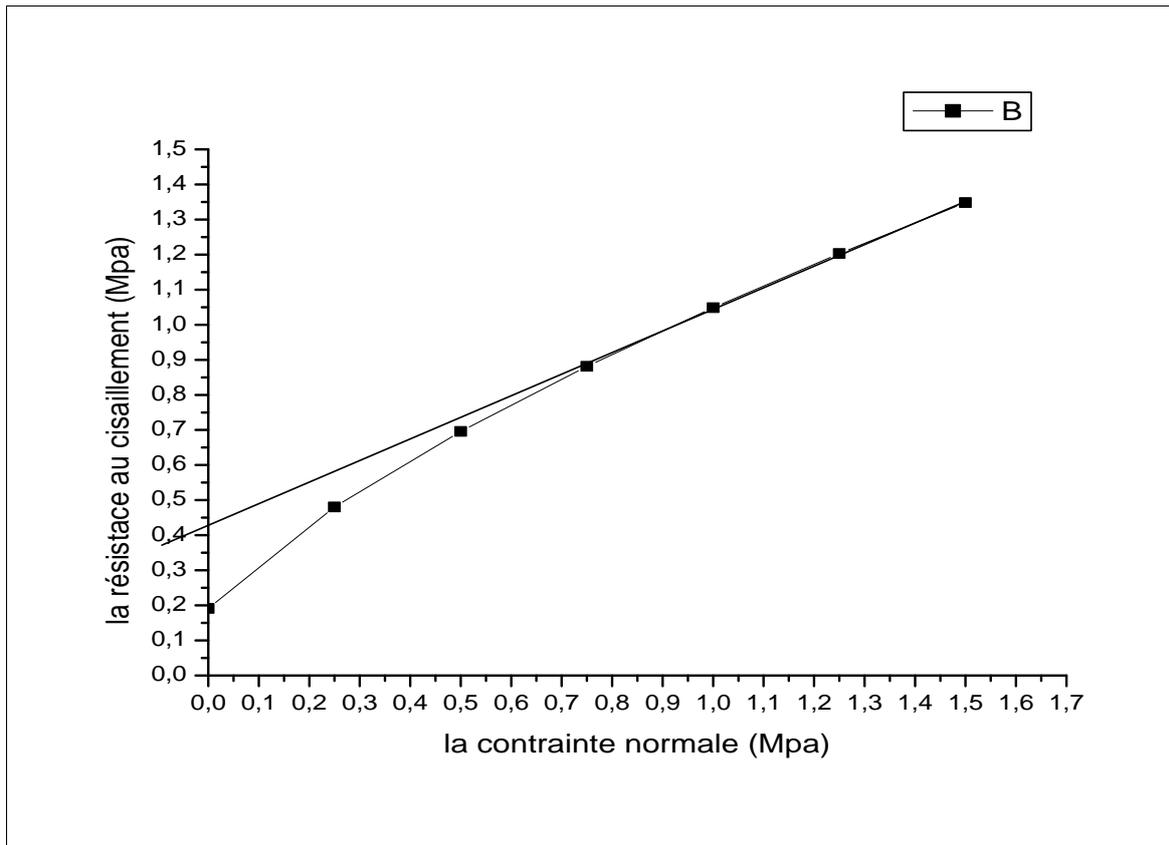
Masse rocheuse de qualité moyenne d'une roche moyennement altérée avec des fissures espacées de 0.2 à 1 m.	$m = 0.14$ $s = 0.0001$ $A = 0.198$ $B = 0.662$ $T = - 0.0007$
--	--

Après avoir utilisé ce critère, l'enveloppe de rupture par cisaillement selon le critère de Hoek et Brown permettra de déterminer les valeurs de la cohésion  $C$  en lisant la valeur au point d'intersection de la droite tangente de la courbe non linéaire avec l'axe des contraintes tangentielles ; par contre l'angle de frottement interne est déterminé en calculant le coefficient de la droite tangente (figure IV.2).

**Tableau IV11** : les valeurs de ( ) en fonction de ( n )

La contrainte normale $\sigma_n$ (Mpa)	La résistance au cisaillement $\tau$ (Mpa)
0	0.1915
0.25	0.4804
0.5	0.6959
0.75	0.8814
1	1.0486
1.25	1.2032
1.5	1.3482

Le graphe suivant représente la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte normale; ce dernier est réalisé par le logiciel (ORIGINE)



**Figure IV.2** - Enveloppe de rupture par cisaillement selon le critère de Hoek et Brown.

Donc :

La cohésion du calcaire est **425 Kpa**

L'angle de frottement interne est **37.58°**.

Les valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement de calcaire et les autres composantes sont données dans le tableau suivant :

**Tableau IV.12** : Cohésion et angle du frottement interne de chaque roche.

Couche	Cohésion (Kpa)	angle de frottement
Marne coloré	103.6	24.3°
Calcaire	425	37.58°
Minerai de fer	385	36°

#### IV.7. Désignation de la qualité de la roche (RQD) :

Les résultats de RQD sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.13** : les valeurs de RQD de massif rocheux de Boukhadra

Nombre d'échantillon	Longueur de l'échantillon(cm)	Somme des >10cm	RQD (%)	Moyenne (%)
1	94	14, 27, 28	73	77.6
2	85	14,13, 11,25	75	
3	95	12,32 ,25	72	
4	98	15,22 ,52	90	
5	98	11,28, 12,26	78	

#### IV.9. Interprétation des résultats :

- D'après les essais de laboratoire pour les caractéristiques physiques, on constate que notre roche est de porosité élevée, de moyenne absorption d'eau, moyennement dense et moyennement dure.
- On peut dire que le massif rocheux de Boukhadra est moyennement saturé en eau.
- Les essais mécaniques au laboratoire montrent que notre roche a une bonnes résistances à la compression et à la traction.
- Les paramètres de cisaillement du massif (C et  $\phi$ ) d'après les calculs basés sur les critères de Hoek et Brown et Mohr-Coulomb, montrent que notre massif a de bonne résistance au cisaillement.
- Selon l'intervalle Entre les discontinuités évalué à 0.2 m, on déduit que la densité de la discontinuité dans le massif rocheux de Boukhadra est moyenne.
- Selon la classification du module de Young, on peut dire que le massif rocheux est de moyenne déformation ( $10000 > E = 4090.9 \text{ Mpa} > 3000$ ).
- La valeur du RQD ( $75\% > \text{RQD} = 77.6\% > 90\%$ ) révèle que le massif rocheux est de bonne qualité.

**IV.10. Conclusion :**

Les essais effectués, malgré leurs complexités ont permis l'évaluation simple et tranchante de la qualité du massif rocheux. En se servant des données disponibles; Notre étude prouve de façon définitive que le massif rocheux du Djebel Boukhadra est de bonne qualité et n'est donc pas à la source des problèmes de stabilité encourus; ce qui nous pousse donc à nous poser des questions sur les travaux de tir et la technique d'exploitation adoptée en souterrain (SNA) puisque la mine adopte les méthodes d'exploitation combinées. De loin nos soupçons se dirigent vers l'accumulation de l'effet du tir en souterrain et en ciel ouvert et l'influence de l'un sur l'autre; quelque soit, la cause réelle ne peut être définie de manière déterminante que par une étude minutieuse de tous ces facteurs.

## **Conclusion générale :**

La caractérisation des massifs des mines souterraines et de surface, avec la connaissance de contexte géologique et hydrogéologique de ces massifs, permet de comprendre leur comportement mécanique et de prévenir de graves accidents soit sur le personnel du projet ou sur l'environnement en général, suite à l'apparition de plusieurs phénomènes comme : les affaissements, les effondrements et les glissements de terrains.

La mine de fer de Boukhadra représente l'une des richesses de l'Algérie ; dans le but de sa préservation et dans le cadre de développement durable, une prévention de déstabilisation des masses rocheuses est une approche importante pour garantir le bon fonctionnement de la mine. Pour cela, la caractérisation du massif de la mine qui constitue la détermination des propriétés physiques et mécaniques au laboratoire et in-situ, est une phase importante avant d'estimer la stabilité des différents ouvrages miniers, cette caractérisation représente une pré-analyse des problèmes liés à la stabilité.

D'après les essais physiques et mécaniques aux laboratoires, on constate que le massif de la mine de Boukhadra a de bonnes résistances à la compression, à la traction et au cisaillement, cela permet de dire que les problèmes de stabilité sont liés à d'autres facteurs essentiellement techniques soit les techniques d'extraction du minerai à ciel ouvert et en souterrain, soit aux travaux de forge et de tir.

Pour plus de précision, des études géophysiques et des études de stabilité approfondies tenant compte l'effet des surcharges ponctuelles et des vibrations dues au tir sont indispensables pour estimer la stabilité des ouvrages miniers.

## Bibliographie

[1] **A. Guilloux** :« Note sur les sols indurés et les roches tendres (SIRT) » ; groupe de travail commun CFGI-CFMR-CFMS.

[2] **univ-sciences.orgfree.com** : Géologie / **Geotechnique.docx**

[3] **François MARTIN ; Adrien SAÏTTA** :« Mécanique des Roches et Travaux Souterrains » ; Centre d'Études des Tunnels : Novembre 2005.

[4] **Michel Chalhoub** :« MASSIFS ROCHEUX », Transvalor - Presses des MINES 2010, ISBN : 978-2-911256-26-4, Dépôt légal : 2009 ; Achevé d'imprimer en 2010(Paris).

[5] **BOUHADAD, Y** ; « Les glissements de terrains et éboulements rocheux d'origine sismique : évaluation de l'aléa et exemples en Algérie », Communication au séminaire sur les risques naturels liés aux glissements de terrains et d'éboulement rocheux, université de Guelma, 15-16 novembre, **2005**.

[6] **Kamel M'ZOUGHEM ; Walid CHENAF A** :

« Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain El Kebira (Sétif) » ; Mémoire de fin d'études, diplôme d'Ingénieur d'Etat en Géologie ; Option : Géologie de l'ingénieur; - université de Sétif 2006.

[7] **Mlle Siham. AMRANI** :

« Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la Carrière de Meftah(Blida) » ; Mémoire de Fin d'Etudes Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Minier ; ecole nationale polytechnique en 2011.

[8] **R.M. Faure** :

« Méthodes de calcul en stabilité des pentes » ; ENTPE cours Mécanique des sols 2.

[9] **Publication de la campagne militaire géotechnique de Canada** « propriétés des roches » ; B-GL-361-011/FP-002 ; **1998**.

- [10] **Jacques Lérau** :Maître de Conférences « GÉOTECHNIQUE1Cours Chapitre 01 » ; INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE ; année universitaire 2005-2006.
- [11] **DELAGE, P; CUI, Y.J** ; « Comportement mécaniques des sols non saturés » C302 ; Technique de l'ingénieur, traité construction ; 19 pages ; 1999.
- [12] **DEGOUTTE, G ; ROYET, P** ; « Aide mémoire de mécanique des sols » ; Réédition ; 99 pages ; 2005.
- [13] **SOUKATCHOFF, V.M** ; « Cours de géotechnique » de l'école nationale supérieure des mines de Nancy ; 100pages ; 2007
- [14] **François MARTIN ; Adrien SAÏTTA** :« Mécanique des Roches et Travaux Souterrains » ; Centre d'Études des Tunnels : Novembre 2005.
- [15] **DEVOS. M** : « La stabilité des Talus », FABI, Cycle Eurocodes 2010-2011.
- [16] **DUNCAN. C. W; MAH. W.Ch**:« Rock Slop Engineering »; Civil and Mining, 4Th Edition published in the Taylor & Francis e-Library; 456 pages; 2005.
- [17] **MAIOLINO, S** ; «Fonction de charge générale en géomécanique : application aux travaux souterrains », thèse de doctorat de l'école des mines de paris ; 245 pages ; 2006.
- [18] **GIANI, G.P**; « Rock Slope Stability Analysis »; Turin, 178 pages; July 1991.
- [19] **LEVASSEUR, S** ; « Identification des paramètres mécaniques des sols par analyse inverse sur des essais et ouvrages géotechniques » de l'université joseph fourrier de Grenoble, XXVème Rencontres Universitaires de Génie Civil ; 2007.
- [20] **KHEMISSA,M ; RAHMOUNI, Z** ; « Analyse de la stabilité et stabilisation par pieux du versant instable de Sidi-Ahmed (Bejaia, Algérie) », Actes du 13ème Congrès Régional Africain de la géotechnique, Marrakech, Maroc, Ed.Sahli et al ; **2003**.

[21] **LAVASSEUR, M** ; « Contribution des systèmes d'information géographique à l'analyse quantitative de l'aléa "glissement de terrain" Exemple d'application au secteur de Ville de La Baie, Québec », Mémoire de maîtrise de l'université du Québec INRS.E.T ; 213 pages ; **2003**.

[22] **TERZAGHI, K; PECK, B.R; MESRI, G**; «Soil Mechanics in Engineering Practice»; 3th JOHN WILEY & SONS, INC; 665pages; **1996**.

[23] « Cours structures géologiques »Licence science de la terre et environnement, université Joseph Fourier, Grenoble, 2009.

[24] **IKHLEF, B** : le gisement de Boukhadra (Algérie orientale) contribution à l'étude de chapeau de fer et des occurrences 'polymétalliques' associés : Mémoire d'ingénieur d'état en géologie minière, institue des sciences de la terre Univ Constantine 108p; (**1997**)

[25] « Rapport interne de l'entreprise Arcelormétal tébessa».

[26] **DUBOURDIEU, G**: carte géologique de l'Algérie à 1/50000, feuille n 151 Boukhadra(**1951**)



Annexe 1.1 : engin de transport de tout-venant.



Annexe 1.2 : engin de chargement de tout-venant.



Annexe 1.3 : engin de foration de trous de mine.



Annexe 1.4 La carrière de la mine de Boukhadra



Annexe 1.5 : station de traitement mécanique.



Annexe 2.1 : essai Brésilien à CTTP-Alger



Annexe 2.2 : essai de compression à C.E.T.E.M-Boumerdes.

**Résumé :**

Depuis la création de l'entreprise actuellement Arcelormittal (filial Boukhadra) les caractéristiques géo-mécanique du massif rocheux n'ont jamais été identifiées.

L'exploitation se faisait machinalement suivant les besoins économiques c'est seulement après l'apparition de sinistre ayant coûté la vie à un mineur en 2002 suite à un glissement dû à l'instabilité des niveaux en activité. Le personnel responsable à l'entreprise, c'est trouvé contraint d'enfin mettre le point sur les propriétés physique et mécanique du massif rocheux afin d'appréhender les problèmes rencontrés à l'actuel et l'éventualité d'une aggravation de ses problèmes sur le futur. De ce fait l'importance du travail exposé par notre mémoire et qui vise justement une caractérisation de toutes les propriétés physiques et mécaniques du massif rocheux de BK. Cette étude menée à bien de notre part est certainement la seule issue capable de résoudre les problèmes d'instabilité des talus de Boukhadra.

**Mots Clefs :** caractérisation, propriété physique et mécanique, massif rocheux, essais mécaniques, Boukhadra.

**ABSTRACT :**

Since the establishment of the company is currently Arcelormittal (filial Boukhadra) geo-mechanical characteristics of the rock mass were never identified.

The operation was done mechanically according to the economic needs only after the occurrence of a disaster that claimed the lives of a minor in 2002 following a slip that caused instability in business levels. Personnel responsible for the company, was compelled to finally put the item on the physical and mechanical properties of the rock in order to understand the problems encountered with the current and a possible worsening of their problems on the future. Hence the importance of the work exhibited by our memory that aims precisely a characterization of all the physical and mechanical properties of the rock BK. The study carried out by us is definitely the only way that can cure the problems of instability of the slope Boukhadra.

**Key words:** characterization, physical property and mechanical rock mass, mechanical tests, Boukhadra