



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
 République algérienne démocratique et populaire  
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
 Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
 جامعة العربي التبسي – تبسة  
 Université Larbi Tebessi – Tébessa  
 معهد المناجم  
 Institut des mines  
 قسم المناجم والجيوتكنولوجيا  
 Département des mines et de la géotechnologie



## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de **Master** académique

**Filière : Génie minier**

**Option : Exploitation des mines**

# Choix des méthodes de creusement des galeries minières. Cas de la mine souterraine de BOUKHADRA

**Présenté et soutenu par**

HAMEL Mohammed Chihab Eddine

KABAILY Mohamed Zakaria

**Devant le jury:**

		<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>
<b>Président :</b>	DEBOUZ Mokhtar	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
<b>Encadreur :</b>	GADRI Larbi	Pr	Université Larbi Tebessi - Tébessa
<b>Examineurs :</b>	NOUIOUA Ismail	MCA	Université Larbi Tebessi - Tébessa

Année universitaire : 2020 - 2021

Tébessa le :

## Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

- 1- HAMEL Mohammed Chihab Eddine
- 2- KABAILY Mohamed Zakaria

Niveau : 2<sup>ème</sup> année Master      Option : Exploitation des mines

Thème : **Choix des méthodes de creusement des galeries minières. Cas de la mine souterraine de BOUKHADRA**

Nom et prénom de l'encadreur : GADRI LARBI

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Les excavations souterraines et les méthodes de creusements	
Etude géologique détaillée sur le site d'étude	
L'état actuel de la mine de Boukhadra	
Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra	
Choix de technique de creusement des formations rocheuses hétérogènes	



Tébessa le :

## Fiche d'encadrement

Etudiant			
Nom	Prénom	Spécialité	Niveau
HAMEL	Mohammed Chihab Eddine	Exploitation des mines	2 <sup>ème</sup> Année Master
KABAILY	Mohamed Zakaria		

Thème	
Encadreur : P <sub>r</sub> . GADRI LARBI	Lieu du stage
Choix des méthodes de creusement des galeries minières. Cas de la mine souterraine de BOUKHADRA	BOUKHADRA (TEBESSA)
Année universitaire : 2019 - 2020	

Encadreur

Le chef du département

*Au nom du dieu se clément se  
miséricordieux*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes chers parents qui ont sacrifié toute leur vie pour faire de moi ce que je suis.*

*Je tiens le dédier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, mon encadreur, mes chers*

### *Enseignants*

*A Mes Sœurs, Dalilla, Khadidja, Chahrazad et*

*A toute ma Famille.*

*A tous mes Amis Spécialement ALLAGUI Brahim,*

*MERKHI Mohamed, Ammar Houcine, YAKOUBI Abdechafi et*

*Mon collègue AOULMI Mehenia qui me donnent l'énergie*

*et le courage, et à tous mes amis de la résidence,*

*sans exception*

*A toute la promotion de génie minier.*

## Remerciement

Tout d'abord, je remercie **DIEU** de m'avoir donné le courage et la volonté d'achever mes études. Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, ne puis-je citer que quelques-uns parmi ceux qui m'ont aidé pendant ces années d'étude tout en m'excusant auprès des autres. Je désire adresser un remerciement tout particulièrement à mon encadreur P<sub>r</sub>. **GADRI Larbi** enseignant à l'institut des mines de l'université Larbi Tebessi de Tébessa, pour ses encouragements, ses conseils précieux et sa disponibilité. C'est plus qu'un professeur. C'est une fierté d'être l'un de ses étudiants, ce qui signifie beaucoup pour moi. C'est surtout un homme très humain et un fonctionnaire dont le but est d'enseigner et de tout donner aux étudiants. C'est le père affectueux, le merveilleux professeur, Le Grand Docteur. C'est un très grand chercheur.

Je voudrais citer et remercier les professeurs et les ingénieurs, Messieurs **Nouh REBOUH**, ingénieur en géologie et M<sub>r</sub>. **Bennour Hani** ingénieur en géotechnique à la mine de Boukhadra pour les conseils qu'ils m'ont donnés durant l'élaboration de ma mémoire. Je suis fier d'être un ami du D<sub>r</sub>. **Ali MESSAI** qui est la première personne m'ayant conseillé et c'était le premier parmi le personnel que j'ai rencontré à Tébessa. Je voudrais remercier également l'ingénieur qui n'est autre que mon ami **DIOUANI Taieb El Amine** qui m'a beaucoup aidé et illuminé le chemin. C'est un ingénieur en géologie à la cimenterie de Zahana dans la wilaya de Mascara, qui s'est montré toujours disponible en me donnant de précieux conseils. Je remercie beaucoup les cadres et tous les employés qui m'ont bien reçu au sein de la mine de Boukhadra. Je n'oublierai pas tous les étudiants et certains enseignants faisant partie de l'institut des mines qui m'ont soutenu et aidé. Mademoiselle **Mahnia** et mon frère **YAKOUBI Abdechafi** m'ont offert une aide considérable. Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui m'ont quotidiennement apporté leur aide, collègues amis et membre de ma famille. Je ne peux pas manquer l'occasion de remercier mon père et ma mère qui m'ont donné l'énergie nécessaire pour terminer mes études et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à vous tous

**KABAILY Mohamed Zakaria**

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*À ceux qui sont toujours présents dans mon  
cœur*

*À ma très chère mère, À mon très cher père*

*À mes frères et ma sœur*

*À mon encadreur*

*À mes professeurs*

*À mes amis*

## **REMERCIEMENT**

*Je remercie avant tout ALLAH qui m'a donné la force, la volonté et le courage et la patience pour terminer ce travail de fin d'étude*

*Ainsi je remercie du fond de mon cœur mes parents et toute ma famille pour leurs sacrifices, leurs encouragements, leur soutien jusqu'à termine ce travail.*

*Je remercie mon encadreur Pr. GADRI Larbi, Il m'a donné la possibilité de faire un mémoire sur un sujet très intéressant, merci à vous, pour votre aide et pour votre conseil avisé.*

*Je remercie fortement mes encadreur de mon stage de la mine de Boukhadra spécialement (N. REBOUH, C. CHEGROUCH, H. BNOUR, F. ZENATI)*

*Mes remerciements vont aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner, d'évaluer et d'enrichir ce travail.*

*Enfin, mes sincères reconnaissances et gratitude à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

**CHIHAB**

### الملخص:

حفر المنشآت المنجمية في التكتلات الصخرية في باطن الارض يحدث حتما تغيرات في توزيع حالات الاجهاد والتي تتسبب في تشوهات على مستوى هياكل التعدين في باطن الارض. والذي قد يكون سببا في حالة من عدم الاستقرار المحتمل على مستوى المنشآت تكون معرفة من عبر الانهيارات الارضية التي تكون كارثية في بعض الأحيان.

للتعامل مع هذه المشكلة، من الضروري إجراء دراسة ميدانية من أجل اختيار أفضل طريقة للحفر ودعم الهياكل التعدينية.

في مذكرتنا هذه سوف نقوم باختيار الطريقة المثلى لحفر الكتلة الصخرية حتى تتمكن من الوصول لحفر رواق ممر دخول لباطن الارض في منجم بوخضرة على مستوى 1045 متر.

### الكلمات المفتاحية:

طريقة الحفر، المنشآت المنجمية، تصنيف الكتل الصخرية، المنجم الارضي.

## Résumé

Le creusement des ouvrages souterrains miniers (galerie, travers banc, ...) dans un massif rocheux nécessite inévitablement des modifications dans la répartition de l'état de contrainte qui provoque des déformations au niveau des ouvrages miniers souterrains, ce qui peut causer des instabilités potentielles au niveau de l'ouvrage définis par des effondrements et des éboulements qui sont parfois catastrophique. Pour parer à cette problématique il indispensable de réaliser une étude de terrain afin de choisir la meilleure façon de creusement et de soutènement des ouvrages miniers.

Dans notre mémoire on va choisir une méthode optimale de creusement pour le massif rocheux de Boukhadra afin de pouvoir creuser une galerie du niveau 1045m,

### Les mots clés :

Méthode de creusement, plan de tir, Classification de massif rocheux, mine souterraine.

## Liste des figures

---

### Liste des figures :

<i>N°</i>	<i>Nome De Figure de chapitre I</i>	<i>Page</i>
<i>Figure 1</i>	Illustration du cycle classique de creusement à l'explosif.	06
<i>Figure 2</i>	Schémas présente un plan de tir d'ouvrage souterrain	07
<i>Figure 3</i>	Phase du prédécoupage	09
<i>Figure 4</i>	Référence des distances pour les bouchons	10
<i>Figure 5</i>	Position des différentes mines	12
<i>Figure 6</i>	Bouchon à gros trous centraux	13
<i>Figure 7</i>	Exemple de bouchon en V	13
<i>Figure 8</i>	Exemple de bouchon cylindrique	14
<i>Figure 9</i>	Choix de la méthode en fonction de la stabilité et de la résistance à la compression simple	15
<i>Figure 10</i>	Choix de la méthode de creusement en fonction de la résistance à la compression simple par logiciel « AUTOCAD »	16
<i>Figure 11</i>	Domaines économiques d'utilisation des techniques d'abattage	17
<i>N°</i>	<i>Nome De Figure de chapitre II</i>	<i>Page</i>
<i>Figure 1</i>	Situation géographique de la Mine de fer de Boukhadra.	22
<i>Figure 2</i>	Les mines Algériennes en 1968 (Tomas, F, 1970).	23
<i>Figure 3</i>	Colonne stratigraphique des monts du Mellègue.	24
<i>Figure 4</i>	Carte géologique simplifiée de la zone de Djebel Boukhadra	28
<i>Figure 5</i>	Coupe transversale dans l'anticlinal de Boukhadra	29
<i>Figure 6</i>	Calcaire Albo-Aptiens de la branche NE-SW de la limite de bordière SE	30
<i>Figure 7</i>	Calcaire Albo-Aptiens de la branche NE SW de la limite de bordière NW	30
<i>Figure 8</i>	Localisation géographique 3D de la mine de Boukhadra	31
<i>Figure 9</i>	Morphologie du gisement de Boukhadra (en rouge) par logiciel AutoCAD	33

## Liste des figures

---

<i>Figure 10</i>	Présentations de trois axes	34
<i>N°</i>	<i>Nome De Figure de chapitre III</i>	<i>Page</i>
<i>Figure 1</i>	Situation géographique représente les modes d'exploitation de la mine de Boukhadra	38
<i>Figure 2</i>	Schéma de Paramètres de la méthode d'exploitation à ciel ouvert	42
<i>Figure 3</i>	La sondeuse BBURG HD 1500D utilisé pour les travaux de forage au niveau de la mine de Boukhadra	42
<i>Figure 4</i>	Chargement et transport par Chargeuse Caterpillar 990K et Camion Caterpillar 75G	42
<i>Figure 5</i>	Traitement mécanique réalisé par le concasseur giratoire.	43
<i>Figure 6</i>	La bande transporteuse de Boukhadra	43
<i>Figure 7</i>	Coupe schématique du mode d'ouverture en souterrain	46
<i>Figure 8</i>	Organigramme représentatif des phases d'exploitation souterraine	47
<i>Figure 9</i>	Marteau perforateur utilisé dans la mine de Boukhadra	48
<i>Figure 10</i>	Trous forés dans les travaux d'ouverture de la phase 4 <sup>ème</sup>	48
<i>Figure 11</i>	Chariot de foration de la mine de Boukhadra.	49
<i>Figure 12</i>	Machine de chargement des trous	49
<i>Figure 13</i>	Chargeuse chargé le godet	51
<i>Figure 14</i>	Procédure de chargement dans la mine souterraine de Boukhadra	52
<i>Figure 15</i>	Déchargement de camion	52
<i>Figure 16</i>	Le soutènement de la galerie de la 4 <sup>ème</sup> phase.	54
<i>Figure 17</i>	Plan topographique des travaux d'ouverture souterraine 4 <sup>ème</sup> phase (février 2021) par logiciel AutoCAD.	55
<i>Figure 18</i>	Zone d'éboulement instable soutenu par un cintre métallique.	56

## Liste des figures

---

<i>N°</i>	<i>Nome De Figure de chapitre IV</i>	<i>Page</i>
<i>Figure 1</i>	Représentant le tracer de la galerie 1045m	60
<i>Figure 2</i>	Coupe géologique visuelle de la galerie principale du niveau 1045m par logiciel AutoCAD	61
<i>Figure 3</i>	Zone d'échantillonnage contact (Minerai / Marne) au dernier point de la galerie	65
<i>Figure 4</i>	Échantillons prélevés dans la galerie de niveau 1045m.	65
<i>Figure 5</i>	Photo de l'essai de la résistance à la compression.	67
<i>Figure 6</i>	Projection stéréographique des plans et des pôles	77
<i>Figure 7</i>	Orientation des familles de discontinuités (Rosset diagramme).	77
<i>Figure 8</i>	Limitations dans le diagramme de support rocheux Q système	83
<i>Figure 9</i>	Longueur libre ou portée critique : diamètre ou longueur de la galerie qui peut être maintenu stable sans revêtement	84
<i>Figure 10</i>	Type de soutènement en fonction du R. Q.D. et de la portée du tunnel	85
<i>Figure 11</i>	Temps de tenue en heures	85
<i>N°</i>	<i>Nome De Figure de chapitre V</i>	<i>Page</i>
<i>Figure 1</i>	Galerie au jour de niveau 1045 axe Nord.	88
<i>Figure 2</i>	Division de l'ouvrage de la 4 <sup>ème</sup> phase	89
<i>Figure 3</i>	Plan de tir actuel de Boukhadra	90
<i>Figure 4</i>	Chargement des trous de Boukhadra	90
<i>Figure 5</i>	Plan de forage de calcaire	101
<i>Figure 6</i>	Disposition des charges dans les trous de calcaire	102
<i>Figure 7</i>	Placement de retard dans les trous de calcaire	102
<i>Figure 8</i>	Plan de forage de fer	103
<i>Figure 9</i>	Disposition des charges dans les trous de fer	104
<i>Figure 10</i>	Placement de retard dans les trous de fer	104

## Liste des figures

---

<i>Figure 11</i>	Plan de forage de grès	105
<i>Figure 12</i>	Disposition des charges dans les trous de grès	106
<i>Figure 13</i>	Placement de retard dans les trous de grès	106
<i>Figure 14</i>	Plan de forage de marne jaune	107
<i>Figure 15</i>	Disposition des charges dans les trous de marne jaune	108
<i>Figure 16</i>	Placement de retard dans les trous de marne jaune	108
<i>Figure 17</i>	Plan de forage de conglomerat	109
<i>Figure 18</i>	Disposition des charges dans les trous de conglomerat	110
<i>Figure 19</i>	Placement de retard dans les trous de conglomerat	110
<i>Figure 20</i>	Plan de forage de marne mineralisé	111
<i>Figure 21</i>	Disposition des charges dans les trous de marne mineralisée	112
<i>Figure 22</i>	Placement de retard dans les trous de marne mineralisé	112

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux :

<i>N°</i>	<i>Nome De tableau de chapitre I</i>	<i>Page</i>
<i>Tableau 1</i>	Spécifications des principales machines d'abattage.	17
<i>N°</i>	<i>Nome De tableau de chapitre II</i>	<i>Page</i>
<i>Tableau 1</i>	Profondeurs moyennes et angles de pendages du gîte exploité en souterrain.	32
<i>N°</i>	<i>Nome De tableau de chapitre III</i>	<i>Page</i>
<i>Tableau 1</i>	Les réserves géologiques et exploitables de la mine de Boukhadra.	38
<i>Tableau 2</i>	Organisation de travail.	39
<i>Tableau 3</i>	Pour les travaux d'extraction - chargement et de transport.	39
<i>Tableau 4</i>	Pour les travaux de forage et de tir.	39
<i>Tableau 5</i>	Production annuelle planifiée.	40
<i>Tableau 6</i>	Les Paramètres de la méthode d'exploitation à ciel ouvert.	41
<i>Tableau 7</i>	Les caractéristiques de concasseur.	43
<i>Tableau 8</i>	les caractéristiques de marteau perforateur.	48
<i>Tableau 9</i>	Les paramètres des trous et des charges dans un front Boukhadra.	49
<i>Tableau 10</i>	Le développement souterrain 2019.	55
<i>N°</i>	<i>Nome De tableau de chapitre IV</i>	<i>Page</i>
<i>Tableau 1</i>	Relevés des failles et fissures existantes dans le tronçon étudié de la galerie principale du niveau 1045 m.	62
<i>Tableau 2</i>	Les résultats de l'essai de compression simple.	68
<i>Tableau 3</i>	Tableau de R.Q.D.	69
<i>Tableau 4</i>	RQD des différentes couches (Qualité de la masse rocheuse).	69
<i>Tableau 5</i>	L'espacement des joints.	70
<i>Tableau 6</i>	La nature des joints.	70
<i>Tableau 7</i>	Les venues d'eau.	70

## Liste des tableaux

---

<i>Tableau 8</i>	Les paramètres de RMR.	71
<i>Tableau 9</i>	Classification RMR de la couche du conglomérat.	72
<i>Tableau 10</i>	Classification RMR de la couche de grès.	72
<i>Tableau 11</i>	Classification RMR de la couche de la marne jaune.	73
<i>Tableau 12</i>	Classification RMR de la couche de la marne minéralisé.	73
<i>Tableau 13</i>	Classification RMR de la couche de minerai de fer.	74
<i>Tableau 14</i>	Classification RMR de la couche du calcaire.	74
<i>Tableau 15</i>	Classification géomécanique Beniaowski, (1989).	75
<i>Tableau 16</i>	Classification RMR du massif rocheux du Djebel de Boukhadra (Description du massif rocheux).	75
<i>Tableau 17</i>	Classification du massif rocheux par rapport à l'indice Q.	76
<i>Tableau 18</i>	Paramètre de classification en fonction du nombre de familles jointes.	78
<i>Tableau 19</i>	Paramètre de classification en fonction du facteur de rugosité.	78
<i>Tableau 20</i>	Paramètre de classification en fonction du facteur d'altération.	79
<i>Tableau 21</i>	Paramètres de classification en fonction du facteur de réduction de la présence d'eau.	80
<i>Tableau 22</i>	Paramètre de classification en fonction du facteur de réduction des contraintes, SRF.	80
<i>Tableau 23</i>	Paramètre de classification en fonction du facteur de réduction des contraintes, SRF.	81
<i>Tableau 24</i>	Classification Q système du massif rocheux du Djebel de Boukhadra.	81
<i>Tableau 25</i>	Paramètre de classification selon l'indice ESR.	82
<i>N°</i>	<i>Nome De tableau de chapitre V</i>	<i>Page</i>
<i>Tableau 1</i>	Les paramètres dimensionnels d'ouvrage souterrain.	89
<i>Tableau 2</i>	Les orientations d'ouvrage.	89
<i>Tableau 3</i>	Les paramètres du plan de foration Boukhadra.	91
<i>Tableau 4</i>	Les paramètres des trous et des charges.	92

## Liste des tableaux

---

<i>Tableau 5</i>	L'abattage des trous de mine.	92
<i>Tableau 6</i>	Coefficient de dureté en fonction des caractéristiques de la roche.	95
<i>Tableau 7</i>	Paramètre d'ouvrage.	99
<i>Tableau 8</i>	Paramètres des travaux de forage et de tir horizontaux.	99
<i>Tableau 9</i>	Les distances entre les trous.	100
<i>Tableau 10</i>	Représente les résultats de notre correction proposée.	113
<i>Tableau 11</i>	Représente le Tableau récapitulatif	113

# *Sommaire*

## Sommaire :

Introduction Générale .....	01
<i>Chapitre I</i> <i>Les méthodes de creusements des exçavations souterraines</i>	
Introduction .....	03
1. Les différentes méthodes de creusement des galeries .....	04
1.1. Les méthodes de creusement .....	05
a) Méthode d'excavation traditionnelle .....	05
b) Méthode traditionnelle à l'explosif .....	05
c) Creusement mécanisé .....	15
2. Choix des méthodes de creusements .....	15
Synthèse .....	18
<i>Chapitre II</i> <i>Etude géologique détaillée sur le site d'étude</i>	
1. Cadre géologique de la mine de Boukhadra .....	21
Introduction .....	21
1.1. Situation géographique .....	21
1.2. Historique des travaux de recherche et d'exploitation .....	22
1.3. Géologie régionale .....	24
2. Géologie du site .....	25
2.1. Stratigraphie .....	25
2.2. Description succincte de la structure du massif de Boukhadra .....	28
3. Tectonique de la région .....	30
3.1. Les principaux accidents tectoniques .....	30
4. Description du gisement de Boukhadra .....	31
4.1. Géomorphologie .....	31

## Sommaire

---

4.2. Aperçu sur les résultats des travaux de prospection .....	32
4.3. Morphologie du gisement et Nature du minerai exploité .....	32
5. Hydrogéologie .....	34
6. Climatologie.....	35
Synthèse .....	36

### *Chapitre III*

### *L'état actuel de la mine de Boukhadra*

1. L'état actuel de la mine de Boukhadra .....	37
Introduction .....	37
1.1. L'exploitation de Boukhadra .....	37
1.2. Régime de travail de la mine.....	39
1.2.1. Organisation de travail .....	39
1.3.2. Production annuelle planifiée .....	40
2. Exploitation à ciel ouvert.....	41
2.1. Paramètres de la méthode d'exploitation à ciel ouvert.....	41
3. Exploitation souterraine .....	44
3.1. Ouverture du gisement .....	44
3.2. Choix du mode d'ouverture .....	45
3.3. La division du champ minier .....	46
4. Le Cycle d'abattage avec l'explosif .....	48
4.1. Le traçage .....	48
4.2. Le chargement des trous .....	49
4.3. L'abattage .....	50
4.4. L'aérage .....	50
4.5. La purge et le boulonnage .....	50

## Sommaire

---

4.6. Le marinage .....	51
4.7. Le transport .....	52
4.8. Concassage .....	53
4.9. L'expédition .....	53
4.10. Le soutènement .....	53
5. Etat actuel des ouvrages de la 4 <sup>ème</sup> phase .....	54
5.1. Les travaux d'ouvertures .....	54
5.2. Les problèmes rencontrés au niveau 1045m .....	55
Synthèse .....	57

### *Chapitre IV*      *Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra*

Introduction .....	59
1. Description du massif rocheux de Boukhadra .....	59
1.1. Discontinuités du massif de Boukhadra.....	61
2. Classification géomécaniques du massif rocheux de Boukhadra .....	64
2.1. Classification géomécanique de Beniaowski (RMR) .....	64
2.2. Classification géomécanique de Barton le Q système .....	76
1.1. Méthode de H. LAUFFER .....	84
3. Soutènement des galeries minières .....	85
Synthèse .....	87

### *Chapitre V*      *Choix de technique de creusement des formations rocheuses hétérogènes*

Introduction .....	88
1. Dimensions de la galerie de base 1045m .....	89
2. Le profil en long de la galerie de base .....	89
3. Méthode de creusement actuelle dans les conditions de la mine de Boukhadra .....	90

## Sommaire

---

3.1.	Le plan de tir actuel de Boukhadra .....	90
4.	Proposition de nouveaux plans de tir pour chaque faciès .....	93
4.1.	Paramètre de creusement .....	93
4.1.1.	Largeur nette de l'excavation $B_n$ .....	93
4.1.2.	L'arc axial de la voûte $R$ .....	93
4.1.3.	Les arcs latéraux $r$ .....	93
4.1.4.	La hauteur de l'excavation $H_{ex}$ .....	93
4.1.5.	La section de l'excavation $S_n$ .....	93
4.1.6.	La section de creusement $S_{cr}$ .....	94
4.1.7.	Périmètre de l'excavation $P$ .....	94
4.2.	Travaux de forage et de tir horizontaux .....	94
4.2.1.	Volume à abattre par une volée $V_{ab}$ .....	94
4.2.2.	La longueur d'avancement $L_{av}$ .....	94
4.2.3.	Consommation spécifique d'explosif $q$ .....	94
4.2.4.	Nombre des trous de mine $N_{tr}$ .....	95
4.2.5.	Longueur totale des trous de mine .....	96
4.2.6.	Charge totale d'explosif .....	96
4.2.7.	Consommation moyenne d'explosif par un trou $q_m$ .....	96
4.2.8.	Nombre de cartouche dans chaque type de trous .....	97
4.2.9.	La consommation totale réelle des explosifs $q_r$ .....	97
4.2.10.	Distance entre les trous .....	98
4.2.11.	Longueur forée pour un seul poste $L_{pf}$ .....	98
4.2.12.	Nombre de poste pour la réalisation de l'ouvrage $N_p$ .....	98
4.2.13.	Temps de chargement des trous $T_{ch}$ .....	98

## Sommaire

---

4.3.	Les calculs des paramètres .....	99
4.3.1.	Paramètre d'ouvrage .....	99
4.3.2.	Paramètre des travaux de forage et de tir horizontaux .....	99
4.3.3.	Les distances entre les trous .....	100
4.4.	Les plans des forages et de tir, disposition des charges, placement de retard de chaque facies .....	101
a)	Plan de forage et tir de calcaire .....	101
b)	Plan de forage et tir de fer .....	103
c)	Plan de forage et tir de grès .....	105
d)	Plan de forage et tir de marne jaune .....	107
e)	Plan de forage et tir de conglomérat .....	109
f)	Plan de forage et tir de marne minéralisé .....	111
5.	Comparaison .....	113
	Synthèse .....	114
	Conclusion générale .....	115

# *Introduction*

## Introduction générale

La sécurité dans les conditions minière, présente un problème difficile c'est le souci majeur pour l'exploitant, soit pour les personnels ou soit pour les ouvrages miniers et aussi les équipements.

Le creusement des ouvrages souterrains miniers (galerie, travers banc, ...) dans un massif rocheux nécessite inévitablement des modifications dans la répartition de l'état de contrainte qui provoque des déformations au niveau des ouvrages miniers souterrains, ce qui peut causer des instabilités potentielles au niveau de l'ouvrage définis par des effondrements et des éboulements qui sont parfois catastrophique. Pour parer à cette problématique il est indispensable de réaliser une étude de terrain afin de choisir la meilleure façon de creusement et de soutènement des ouvrages miniers.

Dans la mine de Boukhadra, le problème d'éboulement des toits de galeries présente le souci majeur des exploitants car il provoque dans la majorité des cas l'arrêt total de l'exploitation.

Les instabilités des ouvrages miniers creusés dans les massifs rocheux hétérogènes sont étroitement liées aux caractéristiques géomécaniques des terrains traversés par l'ouvrage, ainsi que le mode de creusement et de soutènement utilisé ; dans notre travail nous allons essayer de mettre le point sur les causes principales des instabilités des ouvrages souterrains surtout sur le meilleur choix du mode de creusement et de soutènement des ouvrages souterrains miniers creusés dans les conditions difficiles du terrain

Les méthodes de creusement des ouvrages souterrains ont été beaucoup développées au cours de ces dernières années à cause de leur utilisation dans divers domaines : exploitations minières, transports...etc.

Le but de ce travail, est choisir une méthode optimale de creusement de massif rocheux de Boukhadra afin de pouvoir creuser une galerie du niveau 1045m.

Cette étude propose à l'entreprise une conception dans laquelle seront précisées les dimensions de la galerie d'accès principale, le schéma de forage et de plan de tir, les volumes de matériaux abattus, les caractéristiques géotechniques et géologiques de la roche dans laquelle elle sera réalisée l'excavation, les caractéristiques du soutènement nécessaire, avec ces informations l'entreprise disposera d'un guide technique pour planifier les travaux à réaliser dans la mine.

## Introduction Générale

---

Ce mémoire est composé de cinq chapitres qui traitent le creusement des ouvrages miniers horizontaux dans les terrains rocheux hétérogènes, le cas pratique de notre étude est le creusement de la galerie de base du niveau 1045 m dans un massif rocheux de Boukhadra.

Dans le premier chapitre, une bibliographie sur Les méthodes de creusements des excavations souterraines et comment choisir la meilleure méthode de creusement.

Le deuxième chapitre est consacré à une étude géologique détaillée sur le site d'étude, pour obtenir une image aussi complète que possible des caractéristiques du site d'étude ;

Le troisième chapitre est consacré à l'état actuel de la mine de Boukhadra ainsi que les différents problèmes rencontrés au cours du creusement de la galerie de base du niveau 1045m.

Le quatrième chapitre présente les classifications géomécaniques du massif rocheux de Boukhadra, ces méthodes empiriques font l'objet d'étude des différents faciès géologiques là ou en va creuser la galerie de base du niveau 1045m.

Le dernier chapitre fera l'objet d'une étude critique de l'état actuelle de creusement de la galerie de base et la proposition d'une nouvelle vision de réalisation de tel ouvrage dans les conditions de la mine souterraine de Boukhadra.

*Les méthodes de  
creusements des  
excavations  
souterraines*

## Introduction

L'exploitation d'une mine souterraine consiste à exploiter le minerai depuis une excavation qui relie le gisement au jour, sans avoir à enlever l'intégralité des matériaux stériles qui le surmontent. Pour une exploitation souterraine, une quantité minimale de morts terrains est donc enlevée pour accéder au gisement, elle correspond aux travaux d'ossature (ex. rampes, descenderies, galeries, puits). Ces derniers permettent d'accéder au minerai et de mettre en place toutes les infrastructures afin d'assurer l'aération, l'exhaure, l'accès du personnel et l'évacuation du minerai. Bien que chaque mine soit un cas particulier, toutes ont en commun la recherche de la rentabilité et de la sécurité à travers un ensemble de techniques pour procéder à l'abattage du minerai dans le respect de l'environnement. Comme précédemment, le choix entre les différentes techniques d'exploitation souterraine est conditionné principalement par la géologie au sens large et notamment par : [16]

- Géométrie du corps minéralisé (couche, amas, filon, subhorizontal, sub-vertical, épais, mince, profondeur) ;
- Compétence du minerai (faible résistance (friable), résistance moyenne et dure) ;
- Nature de l'encaissant et sa délimitation avec le minerai (épontes franches avec coupe argileuse, éponte diffuses).

Elles peuvent être exécutées dans le minerai ou dans les roches encaissantes. On distingue les excavations minières selon : [16]

- 1- Leurs positions dans l'espace (horizontales, verticales et inclinées).
- 2- Leurs communications avec le jour (existence ou non d'une entrée à ciel ouvert et passage dans le minerai ou passage dans les roches stériles).
- 3- Leurs utilités pour les travaux d'exploitations.

Alors Les travaux miniers ont pour conséquence de faire apparaître dans l'épaisseur des corps de minerai ou dans les roches encaissantes (stériles), des réseaux d'ouvrages miniers (des espaces vides qui apparaissent au fond de la terre, en résultat de l'extraction des minerais ou des roches), qui portent le nom : Excavations minières. Ces dernières peuvent être de formes très diverses et variables en dimensions, position dans le sous-sol (espace) et destination (rôle). [16]

Suivant le but à atteindre, les excavations sont dites de prospection, si elles tendent à la recherche et à la découverte de gisements de minerai ; et d'exploitation si elles permettent

l'extraction...etc. Les travaux d'exploitation (et les excavations correspondantes) se divisent en trois (3) groupes : [13]

- ✓ Les excavations au rocher construites dans le but de ménager un accès au gisement à partir de la surface terrestre ;
- ✓ Les excavations de traçage creusées pour la préparation du gîte à l'abattage ;
- ✓ Les excavations d'abattage dans le but direct d'extraction du minerai.

Les excavations minières peuvent avoir une communication avec le jour (une entrée à ciel ouvert) ou ne pas en posséder. [14]

### 1. Les différentes méthodes de creusement des galeries

Le creusement des galeries est une opération assez compliquée car elle est reliée à plusieurs paramètres qui peuvent affecter le sol et les structures en surface.

La bonne connaissance des différentes techniques du creusement constitue une base importante pour pouvoir comprendre la réponse du terrain lors de son creusement. Car il existe plusieurs méthodes pour creuser une galerie chacune diffère de l'autre. [28]

Suivant les différents modes de creusement, l'excavation des terrains peut se faire en fonction du : type du terrain rencontré, la géométrie de l'ouvrage réalisé et sa profondeur, les caractéristiques du terrain à creuser, les spécificités du site et de son environnement et les contraintes géologiques et hydrologiques (la présence d'une nappe phréatique) du terrain, les propriétés physico-mécaniques, surtout sa résistance (dureté) et son degré de fissuration, tout ça sans oublier la puissance du gîte. [26],[28]

Plusieurs méthodes de creusement des galeries peuvent être utilisées, le choix de la technique à employer résulte d'un compromis entre les exigences liées à : [29]

La méthode de creusement choisie doit essentiellement assurer la stabilité et la pérennité des excavations souterraines (l'ouvrage), pendant et après son exécution, à court et à long termes. Aussi elle doit satisfaire de rigoureux critères relatifs l'économie financière du projet (des dépenses minimales), la durée d'exécution (la rapidité), et la technique de réalisation, la plus grande évacuation des roches dans une courte période de temps, une fragmentation primaire suffisante et une parfaite sécurité des chantiers d'exploitation.

Donc le choix de la méthode de creusement est sans doute le point crucial du projet d'un point de vue financier et planning. [29]

### 1.1. Les méthodes de creusement

Habituellement, pour le creusement d'une galerie dans les rochers, on utilise la méthode traditionnelle à l'explosif, ou la méthode par attaque ponctuelle. Et pour un terrain difficile on utilise la méthode de pré-découpage mécanique ou le creusement au tunnelier.

On distingue les méthodes de creusement suivantes : [26]

#### 1- Galerie dans le rocher :

- Creusement traditionnel à l'explosif ;
- Creusement à attaque ponctuelle (Le creuseur en tête, Le marteau piqueur) ;
- Creusement par éboulement non provoqué.
- Creusement Electro physique (Laser).

#### 2- Galerie en terrain difficile :

- Creusement au tunnelier (TBM), (sans bouclier) ;
- Méthode par pré-découpage mécanique.

Les développements dans les dernières années dans les techniques de creusement permettent maintenant de réaliser des ouvrages dans tous les types de terrain quelle que soit la difficulté. Depuis une trentaine d'années, de nouvelles méthodes de construction ont été introduites. Elles permettent de réaliser les travaux dans des conditions géologiques difficiles sans provoquer de dégâts majeurs en surface. [29]

#### a) Méthode d'excavation traditionnelle :

Cette méthode fait appel à l'utilisation des procédés d'excavations traditionnelles, avec : excavateurs, pelle, pioche, pic, marteau perforateur ou une simple machine d'attaque ponctuelle. Le domaine d'application de cette méthode s'élargit en suivant un processus de creusement séquentiel consiste à excaver la section de la galerie en deux ou plusieurs étapes avec, si besoin, l'installation de pré soutènement et l'amélioration du terrain. [26]

#### b) Méthode traditionnelle à l'explosif :

L'abattage avec emploi d'explosifs a été pendant de nombreuses années la méthode la plus utilisée pour l'excavation des galeries dans les roches de dureté moyenne à élevée, à tel point qu'elle est également connue comme la méthode conventionnelle d'excavation. Parce que c'est très ancien mais reste encore, dans de nombreuses situations, la plus économique. Cette méthode est adaptée à une roche saine et homogène aux caractéristiques géotechniques élevées. [26]

Cette méthode est généralement utilisée pour l'exécution des galeries situés dans les roches pour lesquelles un abattage manuel (marteaux piqueurs, pelle hydraulique) où un terrassement mécanique machine foreuse pleine section ou à attaque ponctuelle, brise roche) n'est plus envisageable, du point de vue technique ou économique, Par suite de la dureté des minerais. Où l'usage des explosifs serait nécessaire si le terrain rencontré est dur et compact. [25],[28],[29]

### - Les phases de creusement à l'explosif :

L'abattage à l'explosif s'effectue pour chaque volée d'avancement de manière cyclique selon les opérations élémentaires suivantes : [25],[28]

- Traçage et perforation du plan de tir :

L'abattage à l'explosif nécessite la perforation préalable de trous de mine (constituant la volée) à l'aide de marteaux perforateurs à l'air comprimé, la longueur de trous de mines est généralement comprise entre 2 et 5m, ou des trous profonds et rarement le creusement des fourneaux de mines ; [28]

- Chargement des trous de mines et tir de la volée : chargement manuel ou mécanique des trous par l'explosif ;
- Connexion du réseau et tir ;
- Ventilation et purge de l'excavation ;
- Evacuation des déblais du front de taille (marinage).

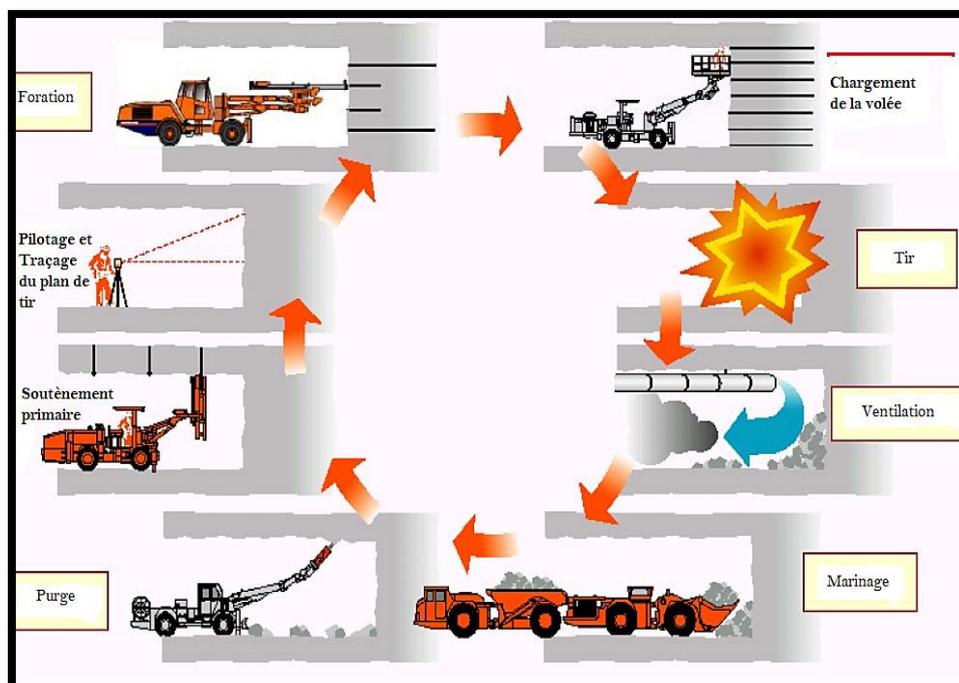


Figure 1 : Illustration du cycle classique de creusement à l'explosif. [26]

L'abattage se fait par passes ou volées dont la longueur varie suivant le type de roches (1 à 5m). Il peut être pleine section (on excave toute la section de la galerie) ou par sections divisées. On peut aussi bien travailler à section pleine qu'à section partielle (pour les sections importantes, les terrains médiocres, ou lorsque l'orientation des bancs est défavorable au tir par perforation horizontale). [28],[29]

- Le plan de tir est le plan d'implantation des forages où sont introduits les explosifs, figurent également les différents retards des détonateurs. Il faut répartir les charges explosives et leurs retards de façon optimale pour obtenir le résultat escompté. [28]
- La séquence de tir prévoit normalement de faire sauter d'abord les charges situées au centre du front de taille, afin de dégager un bouchon, puis de faire sauter les charges de plus en plus périphériques avec un retard de quelques micro-secondes. [27],[29]

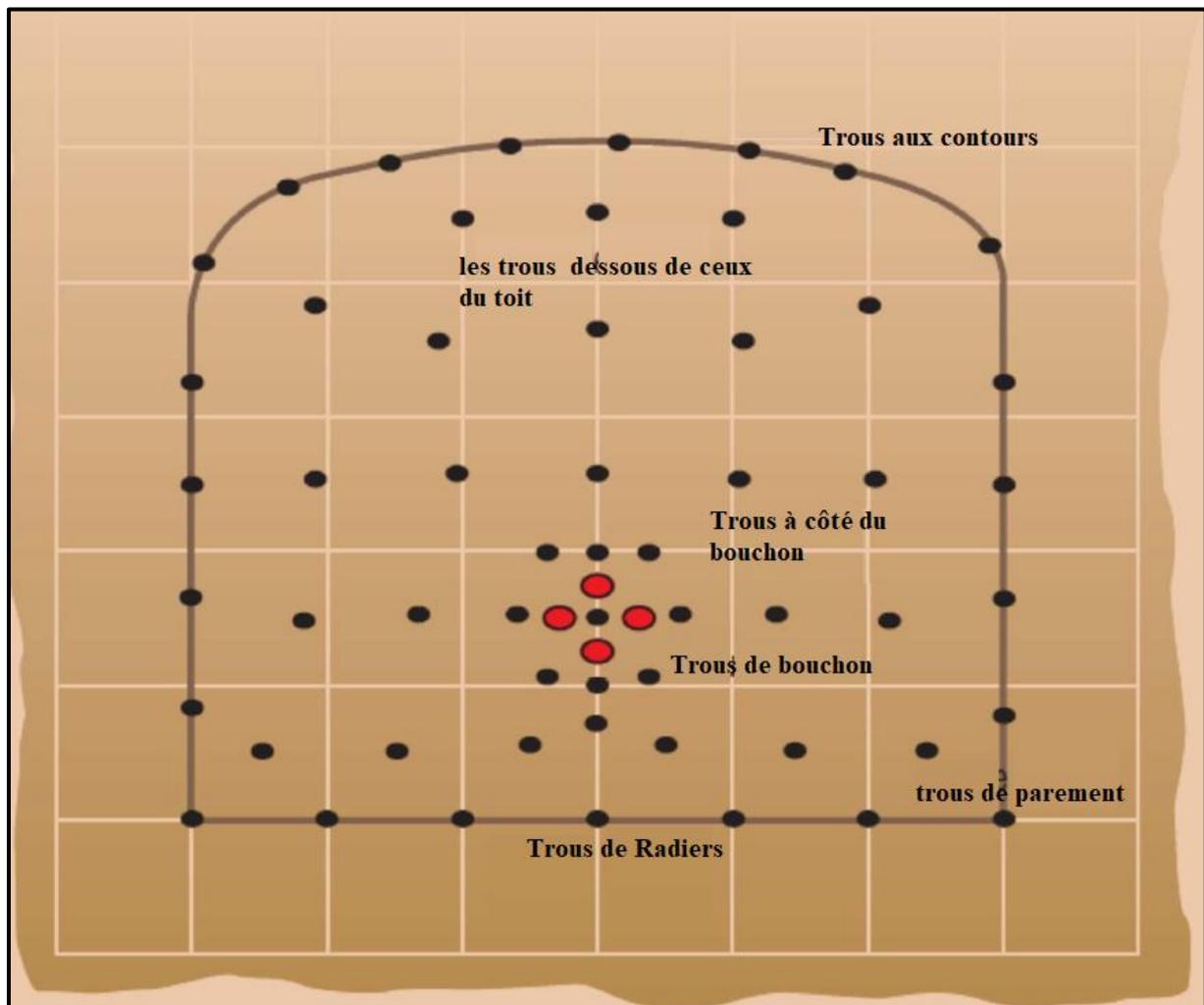


Figure 2 : Schémas présente un plan de tir d'ouvrage souterrain

### - Les différents trous

La surface du tir est constituée par le front de taille. Les forages horizontaux sont donc perpendiculaires à cette surface qui ne constitue pas une réelle surface libre

Inversement, en carrière, les forages sont parallèles au front, ce qui permet à l'explosif de fonctionner correctement, le front constituant la principale surface libre.

Cette configuration nécessite l'utilisation d'une énergie spécifique plus importante dans les travaux souterrains pour évacuer les matériaux. [40]

#### 1. Les trous du bouchon

Pour que l'explosion soit efficace, il faut créer, dans un premier temps, une surface libre. La première opération du minage consiste donc en la création de cette surface libre, ce sont les forages du bouchon.

Les trous de bouchon sont très proches les uns des autres. Aussi existe-t-il des risques de départ par sympathie des explosifs. Ce phénomène se passe quand un explosif très sensible à l'amorçage se trouve à proximité d'une onde de choc induite par une autre trou. L'explosif réagit alors immédiatement, indépendamment de son retard d'initiation. La charge ne bénéficie pas alors de la surface libre prévue par la séquence de tir.

Il est donc impératif de soigner l'implantation et la séquence d'amorçage de ces trous du bouchon.

Ces forages sont les premiers initiés dans la séquence de tir, ils permettent d'élargir la cavité du trou de dégagement, créant ainsi la surface libre nécessaire aux autres trous. [40]

#### 2. Les trous de dégraissage et d'abattage

Les trous suivants permettent d'élargir la cavité du bouchon, ce sont les trous de dégraissage.

Puis, les trous d'abattage permettent de fragmenter la roche dans l'espace créé par le bouchon et les trous de dégraissage. On distingue plusieurs groupes de trous d'abattage :

- **Les trous de relevage** : placées en dessous du bouchon, ont un sens de dégagement dirigé vers le haut ;
- **Les trous de coussins** : jouxtant la zone de découpage, correspondent à une ligne de tir amortie ;
- **Les trous de production** : placées au-dessus du bouchon, ont un sens de dégagement dirigé vers le bas ;
- **Les trous de parement** : placées à droite et à gauche du bouchon, ont un sens de dégagement horizontal. [40]

### 3. Les trous de contour

Les trous de contour sont parfois associés à des trous de tirs amortis. Ces trous doivent être abattues avec précaution afin de ne créer ni hors profil, ni sous profil. Pour cela, la charge de ces mines sera réduite ainsi que la distance entre les trous de contour (de 30 à 70 cm). L'explosif utilisé dans ces trous de contour est généralement du cordeau détonant. Des charges étagées (vide entre les cartouches associés à du cordeau détonant) peuvent aussi être utilisées.

On peut distinguer :

- Les trous de couronne : elles découpent la voûte supérieure ;
- Les trous de parement : elles découpent latéralement le profil du tunnel ;
- Les trous de radier : elles sont à la base de la section ;
- Les trous de coin. [40]

Ce sont les trous aux extrémités basses du front. Elles doivent être assez chargées en explosif pour permettre d'obtenir la côte finale du radier. En principe, ces deux trous sont chargées à l'identique des trous du bouchon. Si le chargement est trop faible, une reprise sera nécessaire soit avec des forages supplémentaires. S'ils sont trop chargés ou trop inclinés, le hors profil sera trop important et la consommation de béton sera plus forte, donc plus coûteuse. [40]

- **Le découpage**

On utilise une technique de post découpage ou de prédécoupage pour la réalisation des trous de contour. [40]

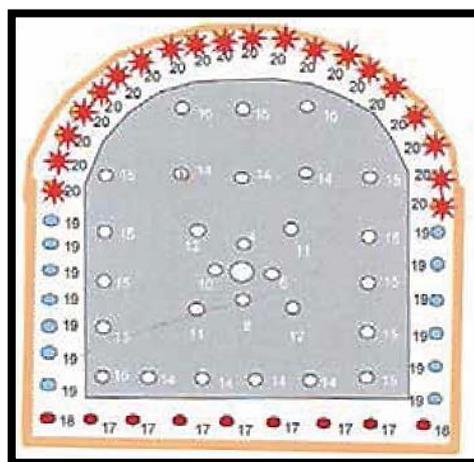


Figure 3 : Phase du prédécoupage. [40]

La technique consiste à forer des trous parallèles les unes aux autres, rapprochées, qui suivent la forme du projet. On réalise un espacement de 30 à 60cm pour du

prédécoupage et de 40 à 70cm pour du post-découpage (en fonction de la dureté de la roche). [40]

- **Les différents bouchons utilisés**

Les premiers trous de la séquence ont pour but de créer la surface libre nécessaire à l'expansion du massif lors du départ des trous suivants. Cette ouverture ou « bouchon » est la clé du succès du tir car il ouvre le tir sur une profondeur qui dépend de la configuration du bouchon.

Ce bouchon peut être foré en trous parallèles ou inclinés, canadien, en cône, en cylindre ou en V, en éventail, norvégien, en pyramide, en triangle... En principe, on réalise toujours au moins un trou non chargé de manière à créer une première surface libre, propre à faciliter la fissuration du massif. [40]

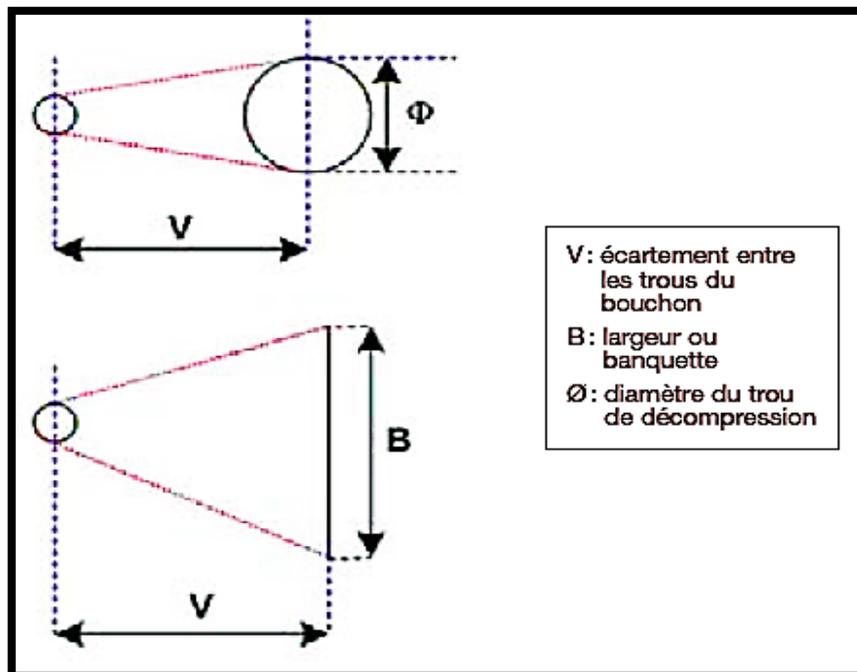


Figure 4 : Référence des distances pour les bouchons. [40]

En outre, le tir du bouchon constitue une phase qui agit sur le rendement de l'explosif, c'est-à-dire sa capacité à utiliser l'énergie pour briser la roche, et sur la présence ou non de hors profil sur les contours en favorisant le travail optimal des explosifs.

La précision des forages pour le bouchon, comme pour les autres forages, est essentielle pour la qualité du tir. Elle est, en général, assez proche de 2 à 3 % de la longueur forée, soit 2 à 3 cm/m. Les écarts de foration sont dus à des défauts d'alignement qui sont maintenant mieux maîtrisés par les moyens modernes de forage tels que les jumbos.

La quantité d'explosif dans les trous du bouchon doit être suffisante pour pouvoir à la fois fracturer la roche en l'absence de surface libre conséquente et expulser la roche en dehors du massif. Cependant, une charge trop conséquente peut conduire à fracturer la roche de manière trop importante et à bloquer l'expulsion des matériaux. Par ailleurs, si l'écartement  $V$  entre les trous du bouchon est trop grand par rapport à la « largeur » ou « banquette »  $B$ , c'est-à-dire si :  $BV$  ou  $\emptyset V \leq 0.5$

Où :

$\emptyset$  ; est le diamètre du trou de décompression, alors les possibilités d'éjection des matériaux sont réduites.

En tout état de cause, cela ne sert à rien d'optimiser la quantité utilisée dans le bouchon : il faut qu'elle soit garante de l'éjection du bouchon. La consommation des explosifs en tunnel est 4 à 5 fois supérieure à celle réalisée en terrassement.

La charge spécifique des trous de forage placés sous le bouchon (mine de relevage) doit soulever les matériaux vers le vide laissé par le bouchon et doit donc être élevée, tandis que les trous de forage situés au-dessus (mine de dégraissage) demandent une charge spécifique plus faible.

La charge spécifique du bouchon est nécessairement beaucoup plus élevée car une partie importante est utilisée pour obtenir la fragmentation et l'éjection des matériaux du bouchon, mais également, elle sert à fracturer en partie la zone proche du bouchon.

Cette charge spécifique est généralement voisine de 10 à 15 kg/m<sup>3</sup> contre 800 g à 1,5 kg/m<sup>3</sup> pour les mines de dégraissage. À titre indicatif, la charge spécifique pour les travaux de terrassement est de l'ordre de 250 à 500 g/m<sup>3</sup>.

Ci-dessous, quelques-uns des principaux bouchons rencontrés. [40]

### - Le bouchon canadien ou « Burncut » : bouchon à trous parallèles

C'est un bouchon à trous parallèles pour lequel certains trous sont vides. Les parois des trous vides constituent les premières surfaces libres sur lesquelles les ondes de compression produites par les trous de mines chargés peuvent se réfléchir. Les trous vides peuvent être soit un trou ou deux de gros diamètre, soit plusieurs trous de diamètre identique à celui des trous chargés.

La séquence de tir consiste à élargir petit à petit les trous vides de manière à ce que la cavité devienne suffisamment large pour servir de surface libre aux mines suivantes. En général, on utilise pour ces bouchons des courts retards en tir électrique

Il existe, dans la littérature, divers arrangements des trous chargés et non chargés dans un bouchon canadien en fonction de la qualité et de la nature des roches. [40]

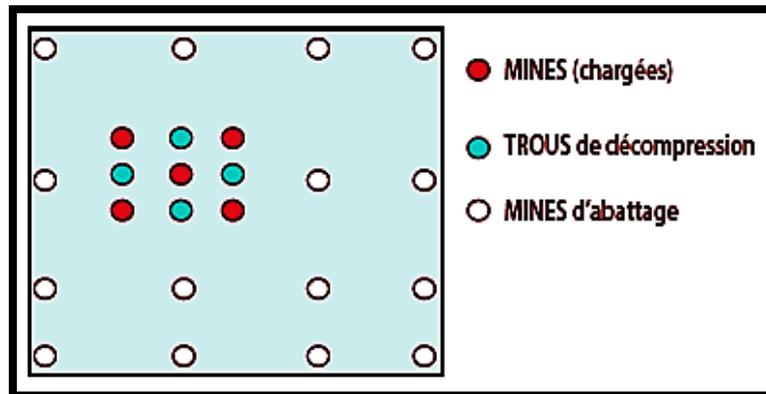


Figure 5 : Position des différentes mines. [40]

Il existe de nombreux types de bouchons canadiens : l'un des plus connus est le « bouchon Michigan » à trou central unique, de dimension égale au double des trous de forage.

### - Les bouchons à gros trous centraux

Ils sont constitués de trous de dégagement de gros diamètre avec des forages de plus petit diamètre, parallèles aux trous de dégagement.

Les trous parallèles aux trous de dégagement servent à agrandir la cavité du premier et à créer ainsi une surface libre importante pour les mines de dégraissage et d'abattage.

La disposition et le nombre des trous de bouchons dépendent des caractéristiques de la roche. La séquence de tir pour les trous du bouchon utilise des détonateurs à microretard. Plus la profondeur des trous est importante, plus la distance entre forages doit être réduite. Si on veut augmenter la profondeur d'avancement sans modifier le nombre de forages du bouchon, il faut alors augmenter le diamètre du gros trou. [40]

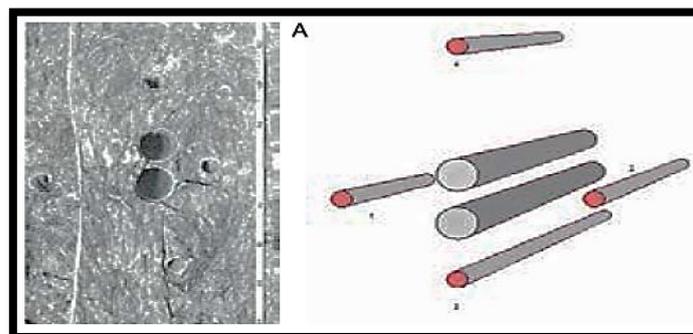


Figure 6 : Bouchon à gros trous centraux. [40]

### - Les bouchons en V ou prismatiques

Une autre façon d'obtenir des surfaces libres est d'incliner au maximum les trous de forage de telle sorte qu'ils soient le plus « parallèles » possible à la surface libre que constitue le front. Il existe ainsi une force développée par l'explosif, perpendiculaire au front.

Ce bouchon tient son nom du fait que les mines forment un V inversé par rapport au front. Chaque série de forages en « V » constitue un plan horizontal placé les uns au-dessus des autres. L'angle entre les forages est voisin de  $60^\circ$ .

Bien que les trous soient convergents, ils fonctionnent de manière isolée dans un ordre déterminé par les élargissements successifs. Par contre, la proximité des charges peut induire un effet d'autoallumage des trous contigus lors du tir. Il faut donc respecter une distance d'au moins 20 cm entre chaque charge. [40]

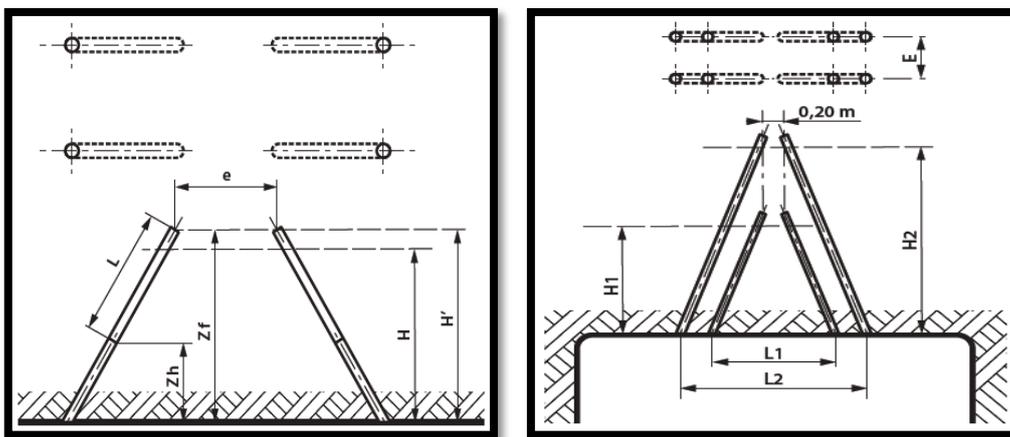


Figure 7 : Exemple de bouchon en V. [40]

Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'avoir des trous sans charge. La décharge de gaz se fait, cette fois ci, en direction du front et non vers des trous de décharge.

La largeur du tunnel détermine l'avance pour chaque tir ; en effet, l'angle maximal donné au forage représente environ 50% de la largeur du tunnel. Ces bouchons deviennent intéressants quand la largeur de section dépasse 5 à 6m.

Il est à noter que les sections en V sont horizontales quand la fissuration majeure de la roche est plutôt verticale et, à l'inverse, les sections en V sont verticales quand la fissuration est horizontale. [40]

On utilise, en théorie, des microretards pour ce type de bouchons. L'intervalle entre chaque départ de charge doit être à minimal tel que la roche puisse se dilater et être expulsée. La littérature préconise un délai minimal de 100 ms entre chaque charge.

Comme tous les bouchons, la précision de forage est un gage essentiel de bon fonctionnement du tir et particulièrement du départ du bouchon.

### - Les bouchons cylindriques ou bouchons en éventail

Ce sont des bouchons réalisés à partir de mines non parallèles. La technique consiste à passer progressivement d'une foration peu inclinée à une foration la plus parallèle possible au front. [40]

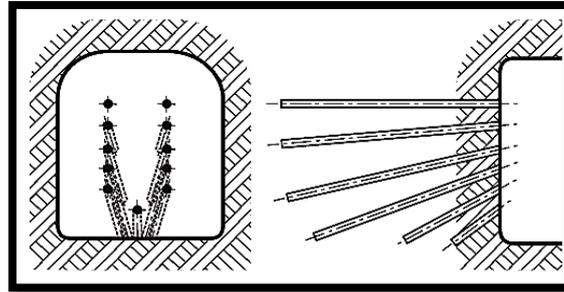


Figure 8 : Exemple de bouchon cylindrique. [40]

On utilise ce type de bouchon dans des sections asymétriques souvent très hautes et peu larges. La difficulté réside dans les techniques de foration (foration descendante difficile à réaliser).

- Le marinage (l'évacuation des déblais) s'effectue après purge du toit et du front et éventuellement ancrage ou soutènement des blocs instables. [28]

Les vibrations créées lors de l'utilisation de l'explosif pendant l'excavation de la galerie sont susceptibles d'endommager cette dernière ou, plus souvent, la structure rocheuse dans le voisinage de celui-ci.

En effet, une partie de l'énergie explosive utilisée pour fragmenter et abattre la matrice rocheuse se disperse et se dissipe dans l'environnement de la galerie sous forme d'ondes vibratoire qui s'amortissent avec la distance. [28],[29]

Des précautions doivent être prises pour localiser les effets des ébranlements sur les structures avoisinantes existantes en particulier si la galerie est à proximité d'un environnement urbain. [29]

### c) Creusement mécanisé :

La technique de creusement mécanisé (en opposition aux techniques conventionnelles), sont toutes les techniques de creusement d'une galerie dans lesquelles l'excavation est effectuée de façon mécanique, à l'aide de dents, de piques ou de disques. [29]

## 2. Choix des méthodes de creusements

Plusieurs méthodes de creusement des galeries existent, le choix de la meilleure méthode dépendant notamment de la résistance à la compression simple RCS principalement, et de la stabilité et de la fracturation. [17]

Les figures suivantes sont d'application quant au choix de la méthode de creusement.

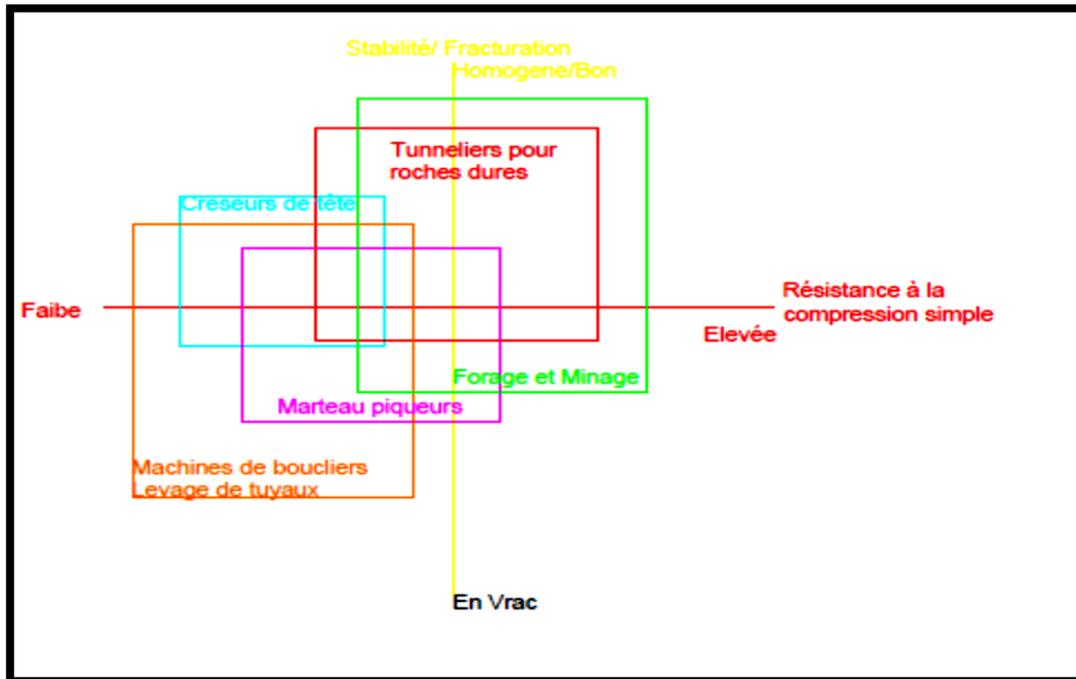


Figure 9 : Choix de la méthode en fonction de la stabilité et de la résistance à la compression simple. [17]

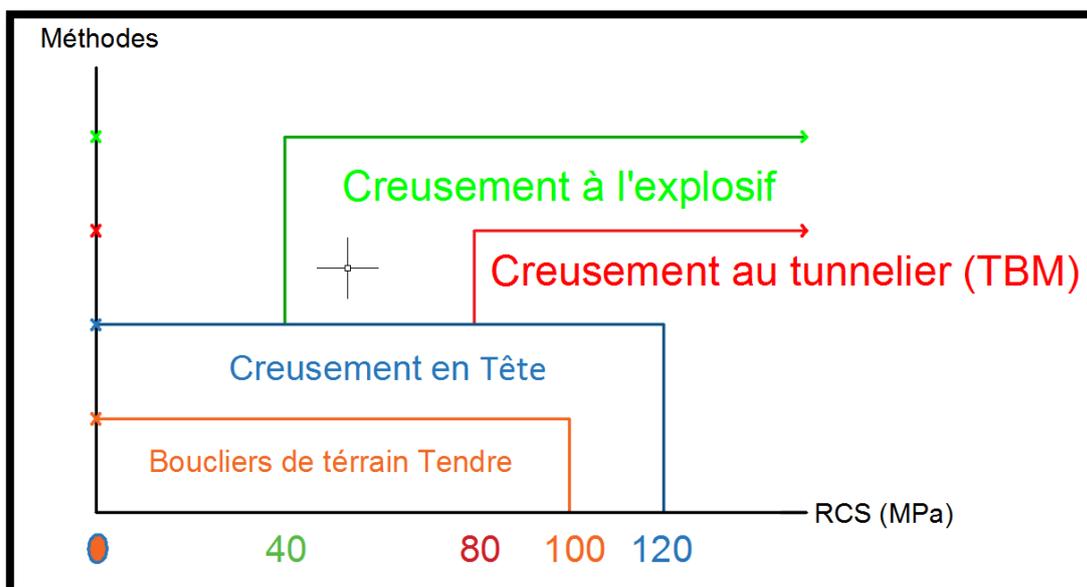


Figure 10 : Choix de la méthode de creusement en fonction de la résistance à la compression simple par logiciel « AUTOCAD ». [17]

### Limite d'emploi de l'abattage mécanique

L'abrasivité des roches joue un rôle très important dans le choix de la méthode de creusement des galeries.

Chaque fois que les dimensions de l'ouvrage à réaliser sont suffisantes pour amortir le surcoût d'investissement causé par l'emploi d'une machine d'abattage, que la résistance de la roche permet une vitesse d'avancement convocabile et que son abrasivité ne rend pas prohibitive la consommation d'outils de coupe, l'abattage mécanique est presque systématiquement préféré à l'abattage à l'explosif et cela pour gagner en productivité, sécurité et qualité des chantiers. « la compétition que se livrent abattage mécanique et abattage à l'explosif, depuis maintenant un demi-siècle, ne cesse de repousser continuellement la limite entre ces deux techniques vers des roches toujours plus « agressives » ou l'explosif reste encore le plus utilisé, la Figure 26 donne une classification assez réaliste des trois technique(explosif, machine à pic , machines à molettes) en terme de limite économique d'utilisation en fonction de la résistance à la compression simple de la roche à abattre et de son abrasivité, mesurées sur roche intacte. [31]

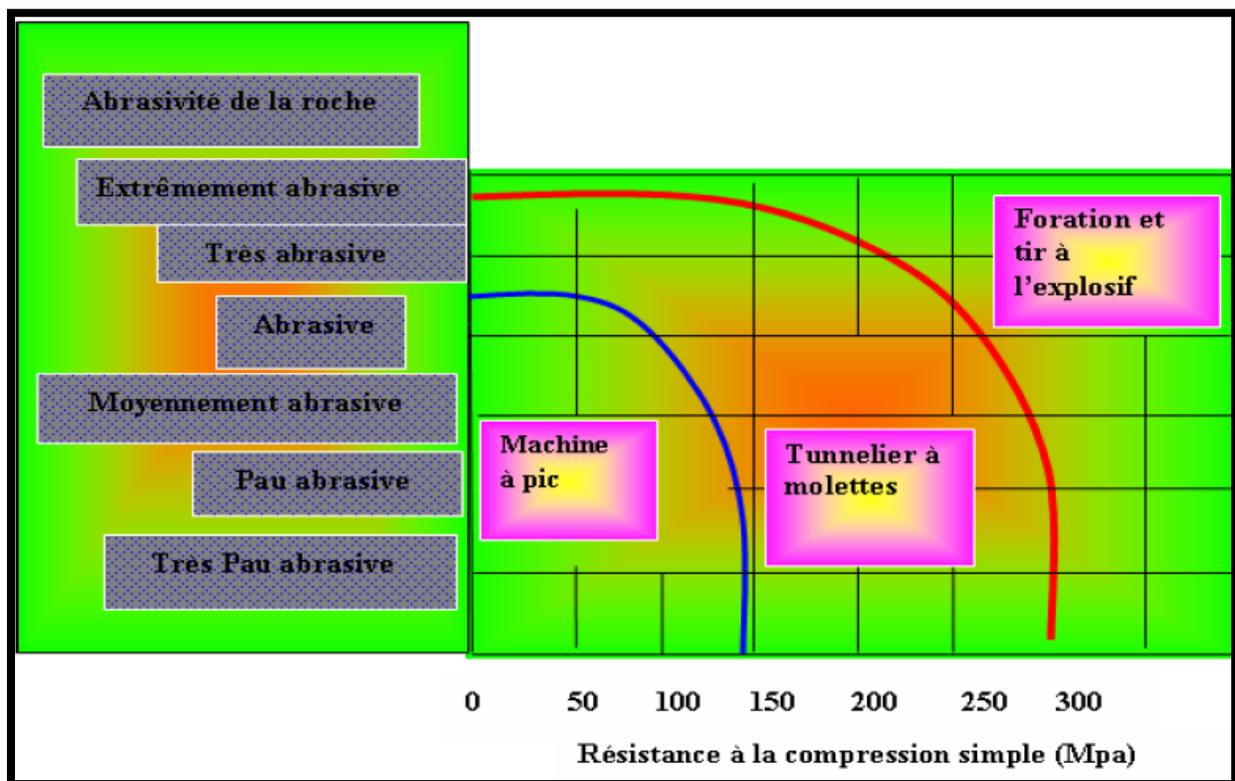


Figure 11 : Domaines économiques d'utilisation des techniques d'abattage. [31]

Les caractéristiques des machines spéciales jouent également un rôle important pour choisir le meilleur parmi eux, le tableau suivant rassemble quelques spécifications de ces machines (à l'exception des rouilleuses) avec, à titre de comparaison. [31]

Tableau. 1 : Spécifications des principales machines d'abattage. [31]

Machine	Masse (t)	Puissance (kW)	Traction ou Halage (kN)	Vitesse de rotation (tr /min)	Vitesse d'avance	Débit instantané	Domaine d'utilisation (Mpa)
<b>Haveuse</b>	20-50	150-500 (par tambour)	200-1000	25-75	0-5 m/min	0-20 t/min	0-30
<b>Mineur continu</b>	30-70	150-400	150-350	45-80	0-25 m/j	0-10 t/min	0-40
<b>Machine à attaque ponctuelle</b>	30-100	100-500	150-500	20-60	0-30 m/j	0-10 t/min	0-100
<b>Rabot</b>	-	100-250	100-250	-	1-2 m/s	0-20 t/min	0-15
<b>Hydro-fraise</b>	25	200	200-250	20-25	0-20 m/h	0-3 m <sup>3</sup> /h	0-50
<b>Tunnelier</b>	150-400	600-1000	3000-3000	2-15	0-15 m/j	-	50-200

Les valeurs données dans le tableau.1, relatives à la limite de résistance de roche acceptable pour la machine, ne sont qu'indicatives ; certains mineurs continus effectuent un "coupage d'éponte" dans une roche de résistance en compression mono-axiale de l'ordre de 100 MPa, ce qui est rendu possible grâce à son abrasivité remarquablement peu élevée et à l'épaisseur faible de roche dure à couper ; par ailleurs le développement récent de la technologie des jets d'eau assistant les pics a permis de reculer la résistance limite de la roche à abattre. L'augmentation de la poussée et de la puissance installées ne suffit donc plus à améliorer les performances d'abattage des machines et doit être accompagnée d'une amélioration des capacités et de la durée de vie des outils. [31]

### Synthèse

Les excavations souterraines sont divisées en trois catégories :

- Excavation verticaux : Cheminée, Puits Aveugle, Puits de fouilles, Puits de prospection, Puits d'exploitation (principal ou auxiliaires) ;
- Excavations Inclinées : Une descenderie, Un montage, Passage, Plan incliné, Puits incliné ;
- Excavations Horizontales : Galerie au jour, Travers – banc, Recoupe, Galerie (Galerie principale, Galerie de roulage, Galerie d'aérage, Galerie intermédiaires, Galerie d'exploitation.

La conception d'une galerie part de son utilité, nous avons des galeries pour : transport de minerai, d'accès ou de raccourci, d'exhaure, de ventilation...etc.

A partir de l'utilité de la galerie, nous choisissons la forme et les dimensions de notre galerie ou du tunnel.

- Carrée, rectangulaires ou trapézoïdales (dans le cas des roches stables) ;
- Circulaire, en arc, en voute (dans le cas des roches instables).

La forme de la galerie dépend de l'utilité de l'excavation, de la durée d'usage, de l'expérience des exécutants en génie minier et génie civil, de la compétence des roches, etc.

Les dimensions des sections des excavations horizontales sont conditionnées par l'encombrement des matériels d'abattage, de chargement.

La forme de la section transversale des excavations minières horizontales est en fonction :

- Des propriétés des roches traversées ;
- Destination ;
- Durée de vie de l'excavation ;
- Les matériaux de soutènement.

Pour le creusement d'une galerie dans les rochers, suivant les différents modes de creusement, on utilise la méthode traditionnelle à l'explosif, ou la méthode par attaque ponctuelle. Et pour un terrain difficile on utilise la méthode de pré-découpage mécanique ou le creusement au tunnelier.

Les développements dans les dernières années dans les techniques de creusement permettent maintenant de réaliser des ouvrages dans tous les types de terrain quelle que soit la difficulté.

Le creusement des galeries est une opération assez compliquée car elle est reliée à plusieurs paramètres qui peuvent affecter le sol et les structures en surface.

Plusieurs méthodes de creusement des galeries peuvent être utilisées, le choix de la technique à employer résulte d'un compromis entre les exigences liées.

Les différents procédés d'excavation peuvent se faire suivant différent mode d'attaque, en fonction de la qualité du terrain rencontré, on peut distinguer :

- Le creusement en pleine section ;
- Le creusement en demi-section ;
- Le creusement en section divisée.

Afin d'enlever une partie d'une masse rocheuse, il est nécessaire d'induire une fracturation et une fragmentation supplémentaires de la roche. Aspects critiques de l'excavation :

- La résistance maximale de la roche doit être dépassée.
- La distribution de la taille des blocs in situ doit être remplacée par la distribution de la taille des fragments requise.

Donc le choix de la méthode de creusement est sans doute le point crucial du projet d'un point de vue financier et planning.

*Etude géologique détaillée  
sur le site d'étude*

### 1. Cadre géologique de la mine de Boukhadra

#### Introduction

Les conditions géologiques et hydrogéologiques sont plus que tout autre, des facteurs déterminants du degré de difficulté et du coût de réalisation d'un ouvrage souterrain. Elles ont une grande influence sur le choix des méthodes de creusement d'une galerie ou n'importe quelle excavation.

L'étude de ces conditions ont non seulement une grande influence sur le choix des méthodes d'excavation mais de plus, se trouve face à un problème imprévu et elle nous informe des problèmes potentiels comme par exemple la traversée d'un accident géologique avec venues d'eau sous forte pression ; cette imprévision peut bloquer les travaux pendant plusieurs mois et mettre en cause la sécurité du chantier, voire même la faisabilité de l'ouvrage. [8]

La région de Tébessa fait partie de la structure autochtone nord-aurésienne (Aures Nememcha) de l'atlas saharien. Elle est constituée essentiellement des formations suivantes :

- Une formation triasique diapirique disloquant des formations subjacentes.
- Des formations carbonatées représentées par d'importantes couches calcaire-marneuses et de marnes d'âge Crétacé à Tertiaire. [9]

La connaissance de la nature du terrain et la diversité de sa structure jouent un rôle très important pour le choix des méthodes de creusement d'une excavation souterraine. Il faut connaître la structure du massif rocheux qui forme la montagne pour choisir entre le creusement à l'explosive ou le creusement mécanique dans notre cas d'étude.

#### 1.1. Situation géographique

Le djebel de Boukhadra est localisé sur la chaîne de montagnes de l'Atlas Saharien, La ville de Boukhadra fait partie de la wilaya de Tébessa située à l'est de l'Algérie à 45km au NE du chef-lieu de la wilaya de Tébessa, à 47km de la mine de l'Ouenza, à 24km des frontières Algéro – Tunisiennes ; elle est reliée à Annaba par une voie ferrée qui assure le transport du minerai de fer au complexe sidérurgique d'El Hadjar qui est à 200km au nord de la mine. [1]

Le djebel de Boukhadra est caractérisé par une structure géologique anticlinale très simple de direction NE-SW avec une terminaison périclinale NE. [2]

Le djebel de Boukhadra constitue un massif isolé qui s'élève au-dessus de la vallée de Morsott qui est de 700 à 800m d'altitude. Avec un point culminant de 1463m.

## Étude géologique détaillée sur le site d'étude

Le gisement est localisé entre les méridiens 8°-01' et 8°-04' Est et les parallèles 35°- 40' Nord entre 35°-50'. [1]

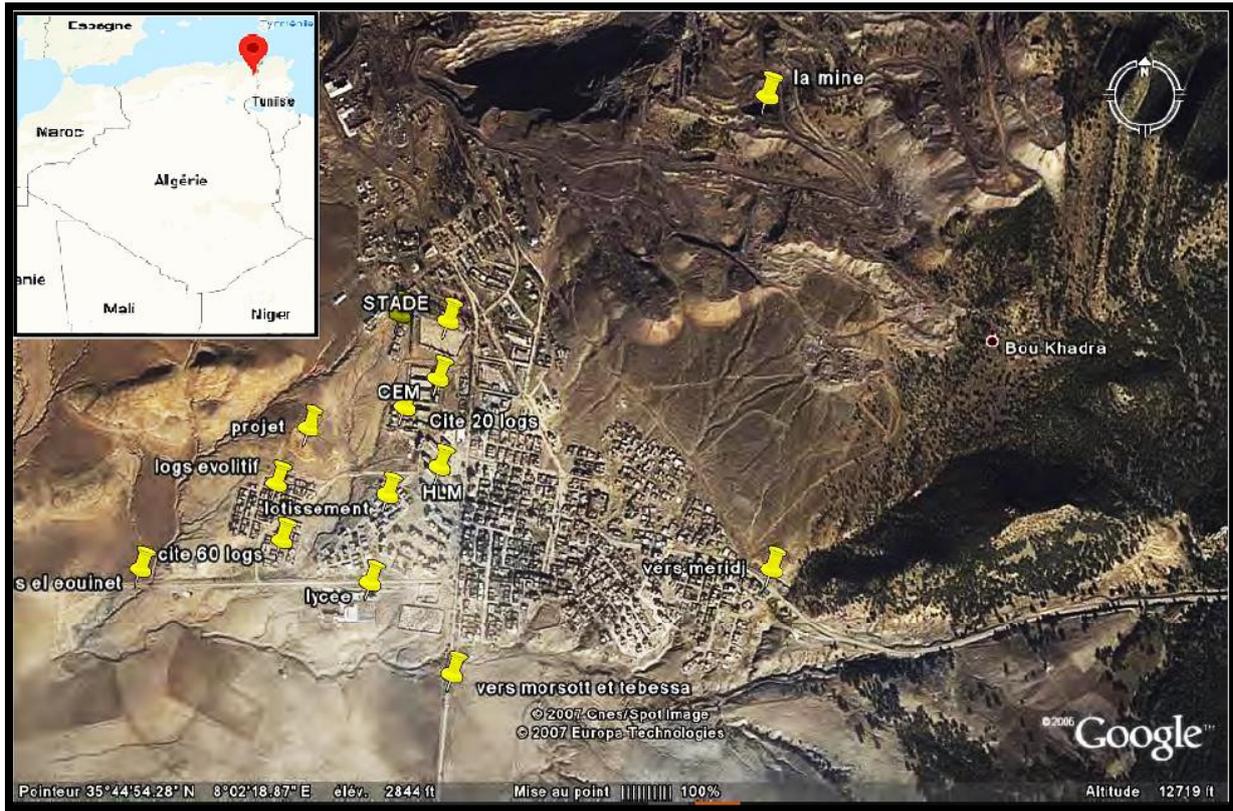


Figure 1 : Situation géographique de la Mine de fer de Boukhadra. [Google Earth]

### 1.2. Historique des travaux de recherche et d'exploitation

Les travaux d'exploitation de la mine de Boukhadra ont été entamés durant l'époque romaine pour l'extraction du cuivre dans la zone du pic, par la suite l'exploitation a porté sur le zinc et autres poly-métaux par la concession de Boukhadra. (Mr TADRO).

De 1903 à 1926, la concession de MOKTA EL HADID avait entrepris des travaux de recherches systématiques par des galeries entre les niveaux 845-1225m.

À partir de 1926 à 1966, (1966 c'est la date de la nationalisation des mines), c'était la société d'Ouenza qui exploitait le gîte de Boukhadra. Cette dernière avait effectué de 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. [3]

De 1983-1984 et après la restructuration des entreprises, c'était FERPHOS qui gérait, exploitait et développait des recherches sur l'ensemble des gîtes ferrifères existants sur le territoire national.

## Etude géologique détaillée sur le site d'étude

Depuis la date du 18/10/2001, et dans le cadre de partenariat avec l'étranger, le HOLDING L.N.M.N.V a signé l'accord de partenariat avec Hadid Ouenza - Boukhadra filiale FERPHOS avec 70% pour ISPAT Tébessa ; le 01/01/2005, la nomination a été changée par Mittal Steel Tébessa ; le 18/08/2007, la nomination a été changée par Arcelor Mittal Tébessa. [3] ; aujourd'hui, c'est la société des Mines de Fer de l'Est (MFE).

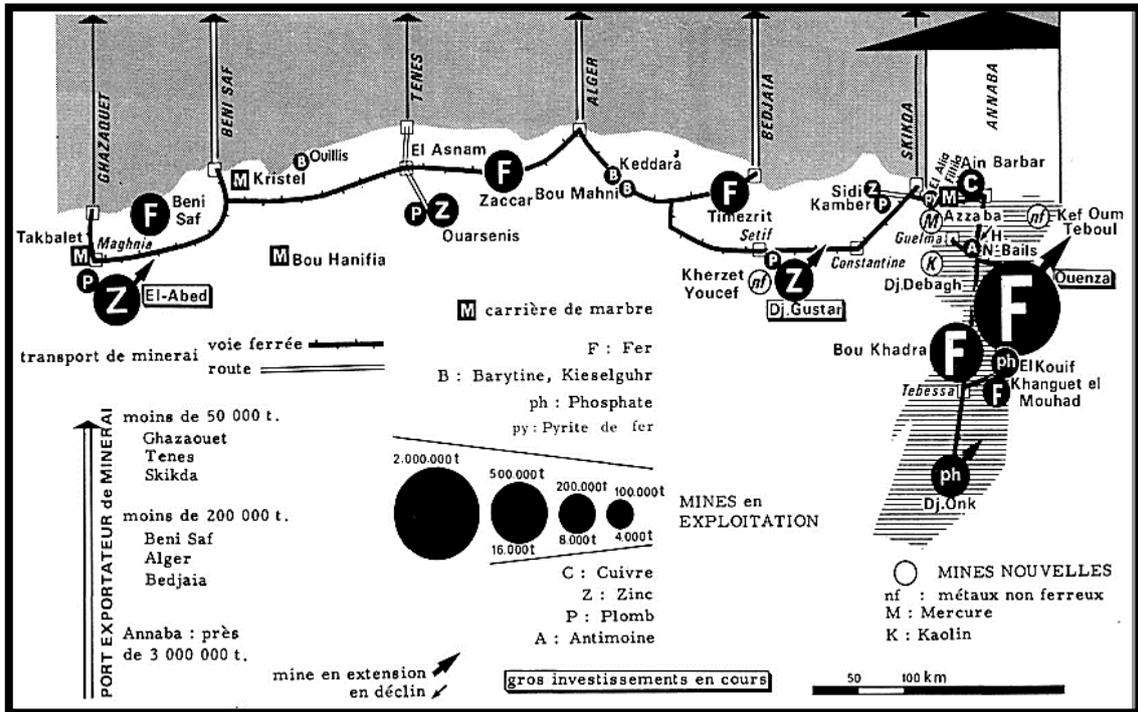


Figure 2 : Les mines Algériennes en 1968 (Tomas, F, 1970). [3]

### 1.3. Géologie régionale

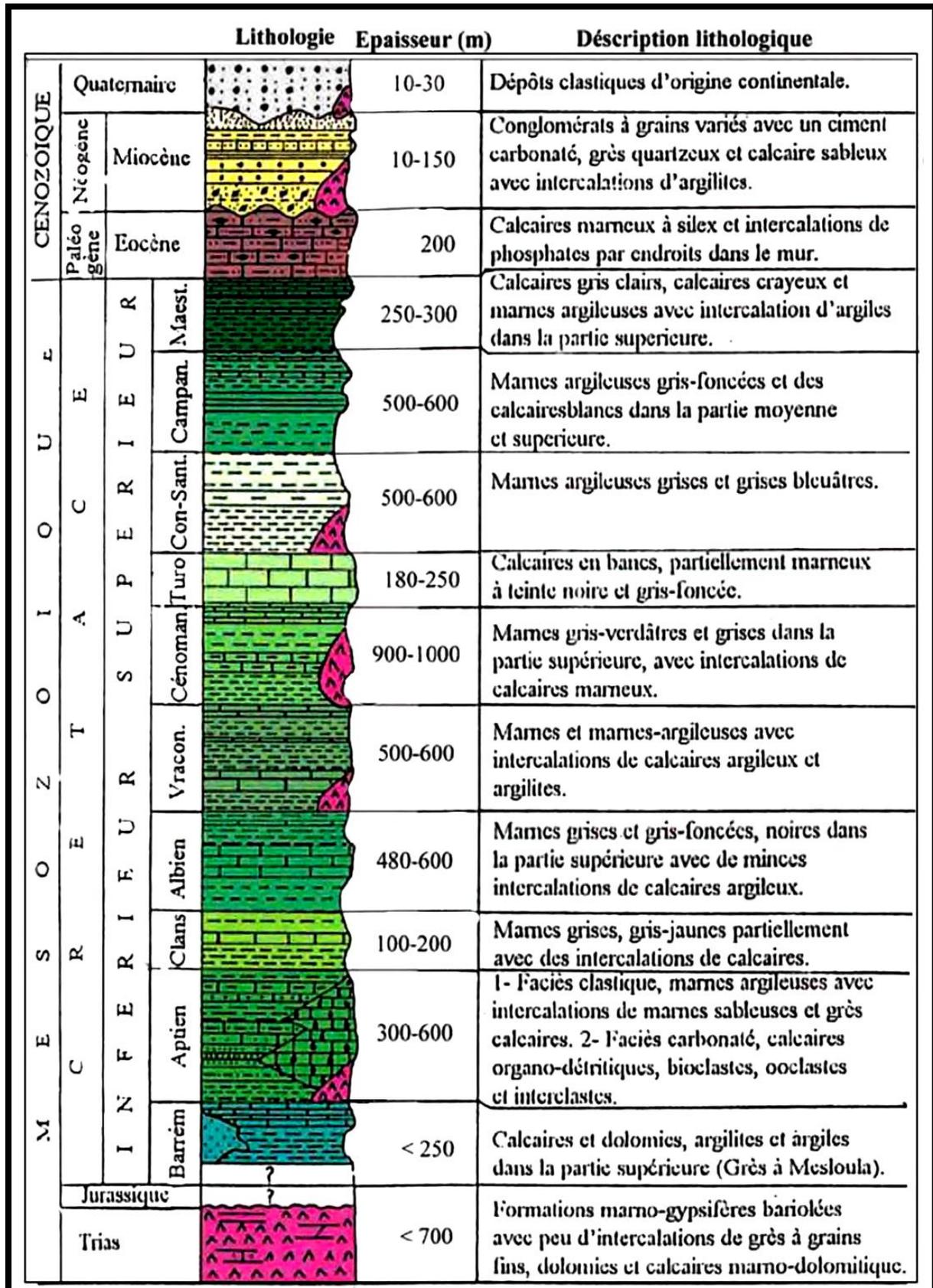


Figure 3 : Colonne stratigraphique des monts du Mellègue. [3]

## 2. Géologie du site

### 2.1. Stratigraphie

Le massif de Boukhadra présente une structure anticlinale orientée NE-SW, recoupée par le fossé de Tébessa-Morsott d'orientation NW-SE, du point de vue litho-stratigraphique, la région de Boukhadra est constituée par des sédiments du Mésozoïque et une partie du Tertiaire en compagnie d'une couverture mince du Quaternaire pour le Mésozoïque. [4],[6]

Les différentes études établies sur les monts du Mellègue montrent que les principales formations géologiques qui affleurent dans le massif de Boukhadra sont représentées par : [6]

- Les évaporites du Trias ;
- Les séries sédimentaires du Crétacé moyen et supérieur ;
- Les formations du Miocène.

Le cœur de la structure est représenté par des sédiments de l'Aptien. Les terrains les plus anciens reconnus à l'affleurement sont représentés par les évaporites du Trias ; ils sont le plus souvent en contact tectonique avec les formations du Crétacé inférieur au miocène.

L'ossature de l'anticlinal est constituée par les terrains du Crétacé moyen (Aptien-Vraconien) qui dessinent dans la partie une fermeture périclinale. [6]

**Le Trias :** Les formations Triasiques sont représentées dans la partie Sud-Ouest de l'anticlinal de Boukhadra sous forme d'affleurement à grande extension, où elles sont parfois recouvertes par endroits par des sédiments plus récents (crétacés, miocènes). [6]

Les dépôts Triasiques rencontrés dans la région de Boukhadra sont représentés par les marnes bariolées à gypse (les marnes renferment aussi des grès et des calcaires), des argiles bariolées, gypses (le gypse est présent en grande quantité sous forme d'amas), des blocs rocheux de dolomies noires, de grès micacés, débris de calcaires et de grés. [4]

Les dépôts du Trias se développent dans les parties Ouest, Sud et Sud-Est. Ces formations sont en contact anormal ou en discordance avec les dépôts aptiens du crétacé (Diapirisme). [4] La puissance constatée des sédiments Triasiques dépasse 50m. [9]

L'évolution tectono-sédimentaire des différents massifs de la région qui s'est traduite par l'installation et le développement d'une sédimentation essentiellement carbonatée localisée sur l'apex des diapirs. Ces formations calcaires constituent l'un des plus importants réceptacles des minéralisations. [6]

Les formations triasiques rencontrées dans les parties centrales des structures anticlinales soulevées sous forme de pointements sont intensément déformées et apparaissent bréchifiées, écrasées et à structure chaotique.

Dans la carrière de Boukhadra (gîte ouest), le trias affleure aux niveaux 890-902m et 914m.

**Le Crétacé :** Dans le profil du crétacé, nous retrouvons le Cénomaniens, l'Aptien, l'Albien, le Coniacien, et le Cénomaniens où on a la série Aptienne, porteuse de la minéralisation qui est caractérisée par des marnes et des calcaires constituant la partie inférieure qui encaisse le gîte Sud, des calcaires récifaux construits à organismes fossiles (rudistes) qui constituent le niveau porteur de la minéralisation principale et des grès et calcaires de la partie supérieure de l'Aptien non productif ; et on a : [4]

- **L'Aptien :** Les dépôts ou les sédiments aptiens de la région Boukhadra occupent de vastes surfaces. L'aptien occupe à lui seul la plus grande partie des affleurements de la région (Ouenza, Boukhadra, M'khiriga, Kef Rekhma et Boudjaber). Les formations Aptiennes se rencontrent dans le noyau, des structures anticlinales ainsi qu'au voisinage immédiat des formations triasiques ; elles constituent la majeure partie de tous les reliefs importants, [4], [5], [7]

L'aptien se présente sous forme de deux faciès bien distincts :

- Faciès carbonaté (calcaire) ;
- Faciès terrigènes (marno-grésocalcaireux). [4]

Le Clansayésien comporte une série de marne grise et grise-jaune avec de minces interlits de calcaires gréseux. Ces marnes contiennent par endroit des grès finement à très finement grenue avec une couche de calcaire sublithographique à ammonite ; la puissance de la série est de l'ordre de 90 m. [9]

L'Aptienne porteuse de la minéralisation qui encaissant le gîte sud et les petites veines (carrière principale). Les Calcaires récifaux (construit organogènes rudistes qui constituent le niveau porteur de la minéralisation principale). [7]

- **L'Albien :** La base et le sommet de l'albien sont surtout représentés par des marnes, la partie moyenne étant constituée dans une large mesure par des calcaires sublithographiques. [4]

En 1956, Dubourdiou distingue que les dépôts albiens sont lithologiquement variés et peuvent être divisés en trois horizons : inférieur, moyen et supérieur : [6]

Les dépôts d'Albien inférieur : sont composés de marnes jaunes et gris-jaunes avec des interlits de calcaires gréseux et argileux, caractérisés par une importante accumulation d'Ammonites ; la puissance de cet horizon est d'environ 150m.

Les dépôts de l'Albien moyen : sont représentés par des marnes gris-noires avec des intercalations de calcaires et calcaires argileux ; la puissance de la série est d'environ 130m.

Les dépôts de l'Albien supérieur : sont représentés par des marnes grises ou grises noires avec des interlits de calcaires argileux noirs ; la puissance de la série est d'environ 200m.

- **Vraconien** : Les sédiments vraconiens occupent de vastes surfaces aux environs de Boukhadra, soit au nord ou au NW du massif (région de l'Oued el Harcha, Fedj es Sekoum...), soit plus à l'est, dans la plaine étendue située au sud du Def. [6]

La séquence est composée de minces lits de marnes avec intercalation d'argile marneuse gris-noires à leur extrême base, et légèrement verdâtres et de calcaires marno-argileux. La puissance maximale est de 470m. [4]

- **Le Cénomanien** : Il affleure largement aux environs de Boukhadra où il est parfois très riche en organismes. Il affleure aussi à l'est de Boukhadra et en bordure de l'Haoud es Srrhir, [6]

Il s'agit d'une série de marnes gris, plus ou moins chargées ou verdâtres grises qui comportent par endroits, des intercalations des alternances de calcaires gris bleu ou gris noir très argileux en général, toujours peu épais, ont une patine claire, blanchâtre ou ocre. [4],[6]

- **Turonien** : Les dépôts de cet âge s'observent dans la partie Ouest et Sud du domaine traité ; il affleure à l'Haoud es Srrhir au voisinage de Morsott, atteignant 9km de longueur du NE au SW et large de 2km en moyenne.

Il s'agit surtout d'accumulation assez épaisse de calcaires gris plus ou moins argileux et massif de rares minces intercalations marneuses dans la partie basale et de marnes grises en général très riches en carbonates de chaux ; la puissance est variable, décamétrique jusqu'à quelques centaines de mètres. [4],[6]

Ces formations sont suivies par de plusieurs séries de marnes argileuses riches en ammonites, huîtres et divers ; l'épaisseur de cet étage a été estimée à 250m dans la région d'Ain Chenia au nord de Djebel Boukhadra et à 190m au Djebel Bou Krorza à l'ouest de l'Ouenza où il devient très calcaire (d'après Dubourdiou 1956).

- **Coniacien** : contient les marnes argileuses avec intercalation d'argile marneuse et par endroit de calcaire marneux. [4]

**Le Tertiaire** : Les dépôts classés comme Tertiaire (miocène) sont observés seulement dans la partie occidentale du domaine étudié et sont représentés par des conglomérats à éléments variés, cimentés par une matrice carbonatée et des intercalations de roches gréseuses. [4]

**Le Quaternaire** : Les dépôts récents du Quaternaire sont formés par un matériel caillouteux, grés, débris de minerai et de conglomérats. Ils sont répandus aux flancs de la montagne et dans les parties basses du relief. [4]

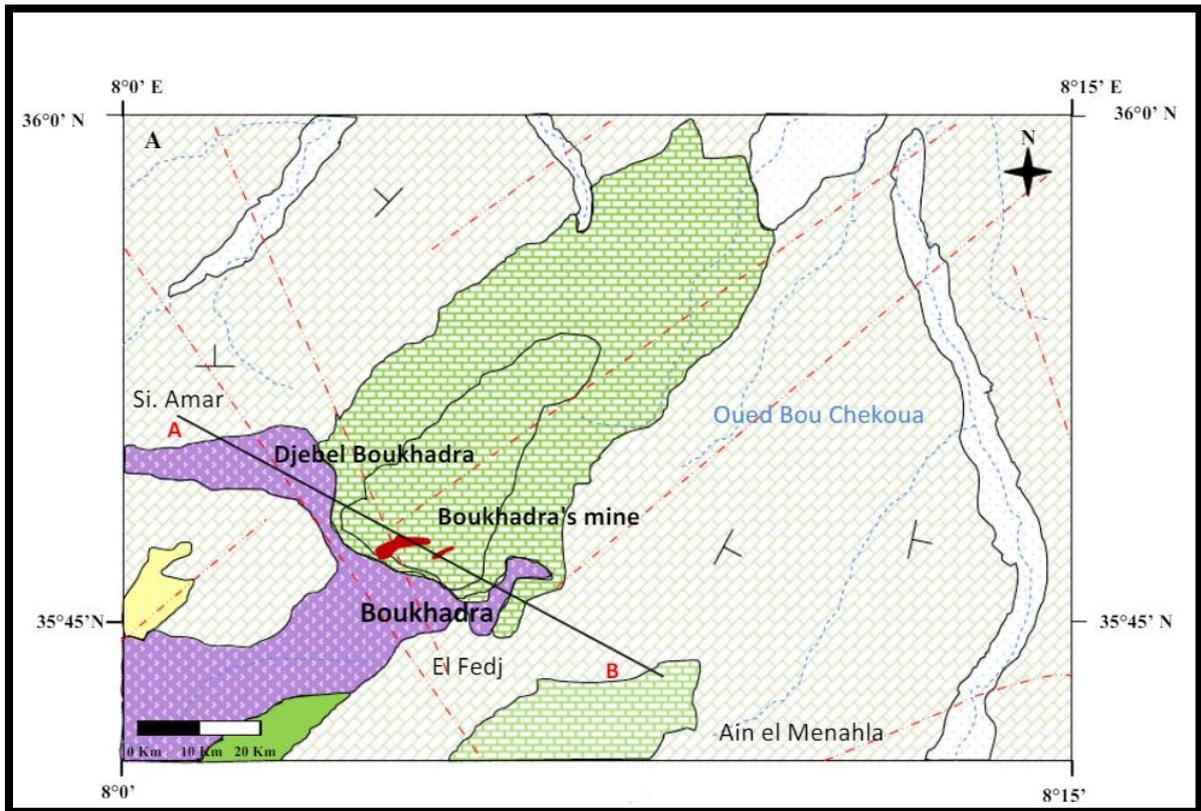


Figure 4 : Carte géologique simplifiée de la zone de Djebel Boukhadra. [10]

## 2.2. Description succincte de la structure du massif de Boukhadra

Pour la description du massif de Boukhadra, on distinguera trois éléments : la partie NE (un périclinal en demi- ellipse), la zone effondrée de Bled Dhissa et les limites bordières des évaporites triasiques (Fig. 4). [6]

### - La partie NE : l'anticlinal de Boukhadra

L'anticlinal de Boukhadra s'étend sur 7 à 8 Km du SW au NE, sa largeur variant entre 3 et 5 Km (Fig. 4). C'est l'un des anticlinaux qui caractérisent l'Atlas saharien oriental dont l'ossature est assurée par les niveaux calcaires compétents du Crétacé. Il est relayé au SE par la structure synclinal de l'Haoud es Srhir . Cet anticlinal résulte des compressions néogènes qui ont structuré cette partie de l'atlas saharien oriental en une suite de synclinaux et d'anticlinaux, le plus souvent percés par des évaporites triasiques. [6]

### - La partie SW : la zone effondrée de Bled Dhissa

Toute la région limitée au NE par le Djebel Boukhadra et au SE par l'Haoud es Srhir correspond à un effondrement qui se raccorde au fossé de Tebessa-Morsott. L'affaissement du Dhissa est attesté par les calcaires turoniens du Koudiat el Hamra qui affleurent en contrebas de l'Aptien de Boukhadra ; Le Bled ed Dhissa s'étend entre la région du Koudiat el

Hamra au N et la route de Morsott au SE. Il est en grande partie recouvert de limons mais contient cependant de nombreux affleurements : calcaires albo-aptiens au S, formations triasiques (calcaires dolomitiques, grès) plus au N. [6]

### - Les limites Bordières :

Il s'agit de l'ensemble des affleurements crétacés qui limitent les évaporites triasiques, situés au SW de l'anticlinal de Boukhadra. Deux ensembles d'affleurements peuvent être distingués :

#### a- Les affleurements de la limite bordière NW (zone de la gare) :

C'est une branche orientée NW-SE (Fig. 4). La barre calcaire en contact au Sud avec le Trias constitue la crête qui domine la gare de Boukhadra. Elle affleure sur 1700 m de longueur. La barre de calcaires albo- aptiens est redressée à la verticale ou plongeant très fortement au SW.

Les calcaires dont l'épaisseur est de l'ordre d'une vingtaine de mètre représentent la prolongation des formations avoisinant le Skip. Ils ont été soulevés par le Trias et repoussés du S vers le N. Ces calcaires aptiens changent brusquement de direction pour s'aligner de l'ENE à l'WSW. [6]

#### b- Les affleurements de la limite bordière SE (Oum es Sba) :

C'est une branche orientée NE-SW. Cette limite est constituée par des crêtes formées par des calcaires albo- aptiens redressés à la verticale et se prolongeant sur près de 1500 m du NE au SW. Il s'agit de deux lames de calcaires d'épaisseur de 10 à 20 m, séparées par des horizons tendres revêtus d'éboulis. [6]

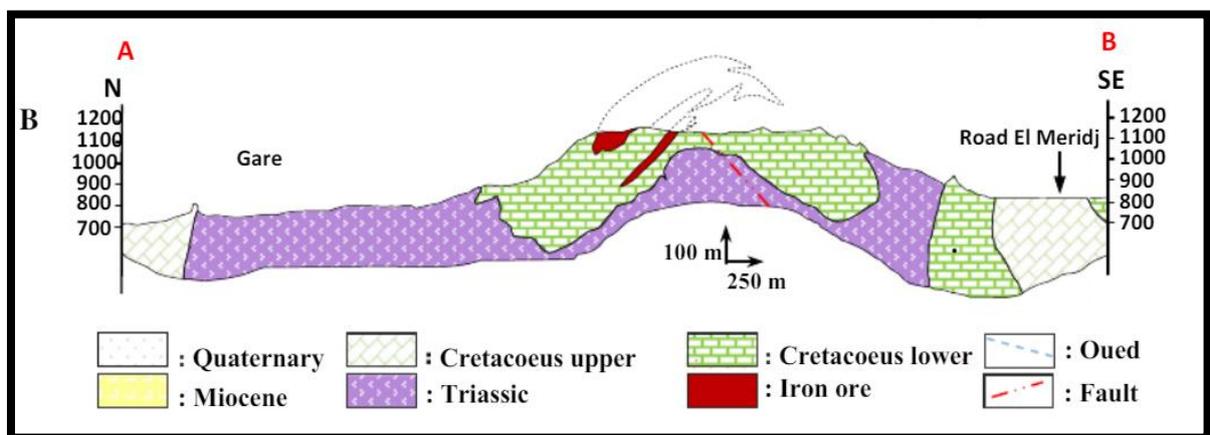


Figure 5 : Coupe transversale dans l'anticlinal de Boukhadra . [10]

### 3. Tectonique de la région

Du point de vue tectonique, la région de Boukhadra est marquée par deux phases tectoniques importantes ; la phase de plissement de direction NE-SO et la phase de tectonique cassante ayant engendré des mouvements de socle qui sont à l'origine de la formation des fossés de Tébessa – Morsott et des Ouled – Boughanem ainsi que le horst de Boudjaber. [4]

Dans la structure anticlinale de Boukhadra, on observe deux grandes dislocations tectoniques :

- La 1<sup>ère</sup> se prolonge presque parallèlement à l'axe de l'anticlinal à partir du pic vers la terminaison périclinale.
- La 2<sup>ème</sup> zone de dislocation tectonique de direction WNW-ESE coupe la structure dans sa partie centrale en deux parts ; l'amplitude de cette dislocation peut arriver jusqu'à 1000m.

D'autres failles sans importance majeure, à petits rejets sont signalées également aux environs immédiats du gisement. [4]

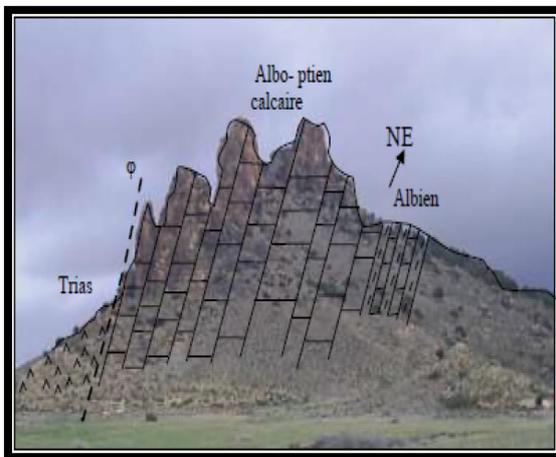


Figure 6 : Calcaire Albo-Aptiens de la branche NE-SW de la limite de bordière SE (Oum es Sbaa). [6]

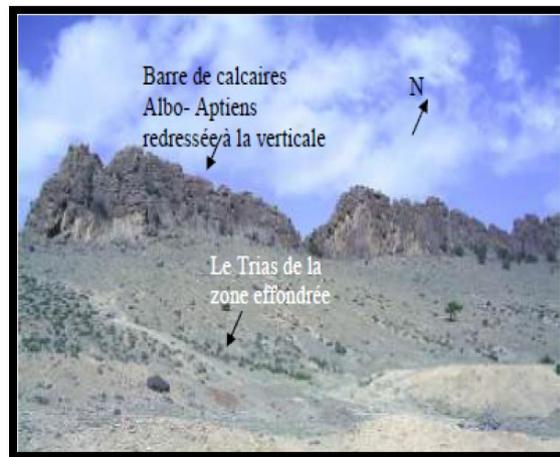


Figure 7 : Calcaire Albo-Aptiens de la branche NE-SW de la limite de bordière NW (zone de la gare). [6]

Il excite un diapirisme dans la structure de Boukhadra qui est Triasique et avait une contribution principale dans la formation de la structure de Djebel Boukhadra. [9]

#### 3.1. Les principaux accidents tectoniques :

Le Djebel Boukhadra est un grand pli anticlinal d'axe SW-NE, interrompu au Sud par l'effondrement de Bled ed Dhissa. Il est relayé au SE, par le synclinal perché de l'Haoud es Srhir. Les failles qui affectent la région donnent, en fait, des irrégularités structurales de ces mégastructures. Elles ont des directions NE- SW et NW- SE. [6]

Les failles NE-SW caractérisent beaucoup plus la terminaison périclinale du massif. Elles sont dues à la résistance opposée au plissement par les formations rigides (les accidents du Kat el Hamra et Kat bou Chekoua au NE et l'accident Oum es Sba au SE).

Les failles NW-SE se localisent au Sud de Boukhadra. Elles affectent la quasi- totalité du synclinal de l'Haoud es Srhir et le recoupent orthogonalement d'une manière presque régulière. Cette famille de failles s'amortissent aux seins des formations plastiques vers le NW tel que les marnes du Cénomaniens et ainsi l'aire du Bled ed Dhissa et réapparaissent de nouveau à l'extrémité NW (A. Oum Debane). [6]

### 4. Description du gisement de Boukhadra

#### 4.1. Géomorphologie

Le gisement ferrugineux de Boukhadra appartenant au domaine de l'Atlas saharien est localisé dans le massif montagneux de Djebel Boukhadra, caractérisé par une structure anticlinale très simple de direction NE-SO avec une terminaison périclinale au NE.

Le Djebel Boukhadra s'étend sur une longueur de 7 à 8 km et une largeur variant de 3 à 5 km, suivant une direction NE-SO. Les côtes absolues dans les limites de la concession minière variant de 750m au pied de la montagne à 1463m au point culminant, localisé au niveau du pic de Boukhadra. [4]

La mine de fer est située entre 8° 01' et 8° 04' est et entre 35° 40' et 35° 50' nord. Djebel Boukhadra est une structure anticlinale composée principalement de sédiments Mésozoïque (Secondaire) et Cénozoïque (Tertiaire) à couverture mince du Quaternaire. [4]

Le relief de la région de Boukhadra est un plateau ; ses forêts abritent une faune et une flore riche.

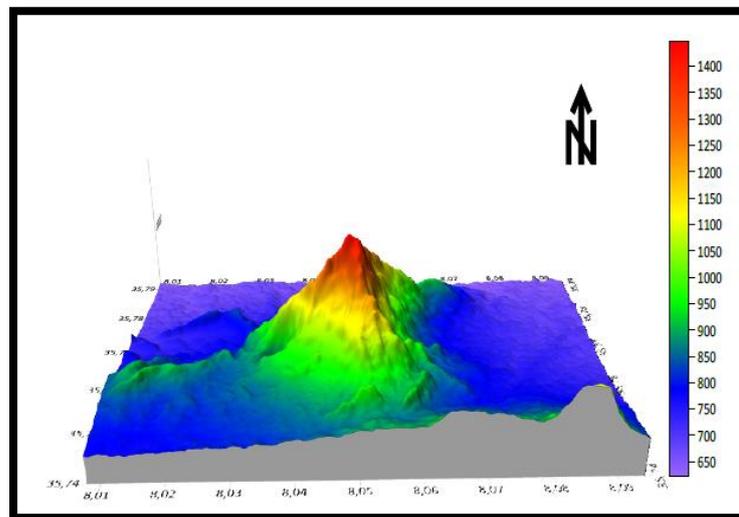


Figure 8 : Localisation géographique 3D de la mine de Boukhadra. [11]

### 4.2. Aperçu sur les résultats des travaux de prospection

La prospection géologique a été effectuée principalement par des travaux miniers et des sondages de profondeur moyenne, suivant les niveaux (845 à 1225). Elle est concentrée sur les parties supérieures (amont) des corps minéralisés, excepté la zone de la carrière principale où la prospection est allée jusqu'au niveau 845m. [3]

Sur les axes, principal (100-108) et Sud-est (4-11), les travaux de recherche sont arrêtés au niveau 1045m et sur l'axe nord au niveau 1105m. [3]

Les travaux de recherches dans le périmètre de la carrière principale ont montré que la minéralisation se prolonge jusqu'au niveau hydrostatique (818m). Ceci a été confirmé lors des travaux d'exploitation. [11]

### 4.3. Morphologie du gisement et Nature du minerai exploité

Le minerai exploité est du fer sous forme d'oxyde de fer montré par l'hématite rouge, de formule chimique ( $Fe_2O_3$ ), présente en abondance dans ce gisement avec une teneur moyenne de 54% de fer.[2]

Comparativement aux gisements d'Ouenza, le minerai de Boukhadra est d'une qualité supérieure, riche en Fer ( $Fe_{moy}$  sup à 50 %). [11] ; le gisement est de forme ventriculaire, dont la genèse est hydrothermale ou sédimentaire d'une longueur de 900 à 2200m et d'une puissance variante de 10 à 15m. [3]

La minéralisation est de type hématite - limonite résultant de l'oxydation de la sidérite ; la texture du minerai est finement poreuse ou concrétionnée géodique.

Tableau. 1 : Profondeurs moyennes et angles de pendages du gîte exploité en souterrain [2]

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

Globalement, les réserves globales sont de 57 millions et sont composées de quatre (04) corps minéralisés principaux de démarche et dimensions très variables et de petites veines de moindre importance : [9]

- Corps principal ;
- Corps Nord ;
- Corps Médian ;

- Corps Sud.

- 1- **Le corps principal** : développé entre les coupes 119 et 125 est localisé dans la partie profonde de la carrière (816 – 868). Il est caractérisé par une longueur de 300m en direction, une profondeur de 30m (Jusqu'au niveau sidérolitique) et une puissance moyenne de 70m environ. Ce corps représente la racine (tronc commun) des autres corps miniers.
- 2- **Le corps Nord** : est caractérisé par une longueur de 800m (jusqu'au pic), une profondeur de 180m et une puissance moyenne de l'ordre de 30m.
- 3- **Le corps Médian** : de dimension sensiblement supérieure par rapport aux corps nord et sud a une longueur de 500m, une profondeur de 200m en aval pendage et une épaisseur moyenne de 35m.
- 4- **Le corps Sud** : qui s'est développé dans trois directions différentes et qui renferme 64% des réserves globales du gisement.

Les quatre grands corps et quelques petites veines de moindre importance se joignent dans la partie occidentale pour former un seul corps minier qui est bien prospecté à partir de la coupe 108 sur l'axe principal (corps sud et Médian); les réserves sont en cours d'exploitation par la méthode à ciel ouvert (carrière principale et BK II). [9]

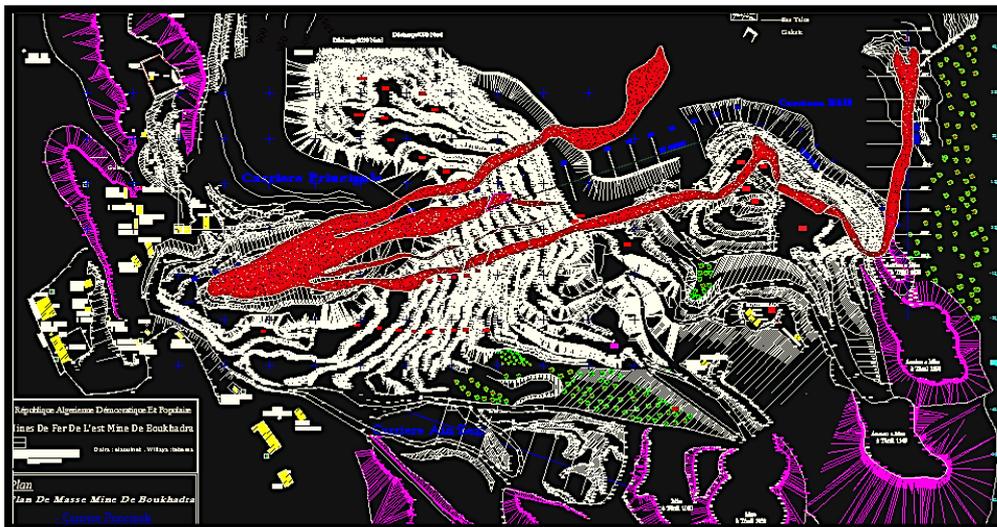


Figure 9 : Morphologie du gisement de Boukhadra (en rouge) par logiciel AutoCAD. [3]

Sur la base des travaux d'exploitation de la mine, on distingue deux principaux gîtes dans le gisement de Boukhadra : [9]

- a- **Gîte principal** : Le gîte principal est constitué de deux grands filons : nord et médian et deux petites veines qui se joignent ensemble en un grand corps, c'est le corps principal.

Ce corps, stratoïde, représente la racine des autres corps minéralisés, et est situé dans la partie ouest du gisement et c'est celui qui a été concerné par l'exploitation à ciel ouvert.

- b- **Gîte Sud** : Le gîte Sud se présente sous la forme d'un filon. Il change de direction trois fois, et rejoint le gîte principal dans sa partie centrale. Ce gîte fait l'objet d'une exploitation souterraine dans sa partie NW et fait aussi objet d'une exploitation combinée (souterraine, à ciel ouvert) dans cette même dernière partie.

La position de ces corps (principal, nord, médian et sud) par rapport à l'encaissant est particulièrement bien visible au niveau de la carrière principale.

L'exploitation souterraine est concentrée sur la partie sud du gisement (corps Sud) ; et les réserves sont réparties sur trois axes :

- Axe principal ;
- Axe Sud – Est ;
- Axe Nord.

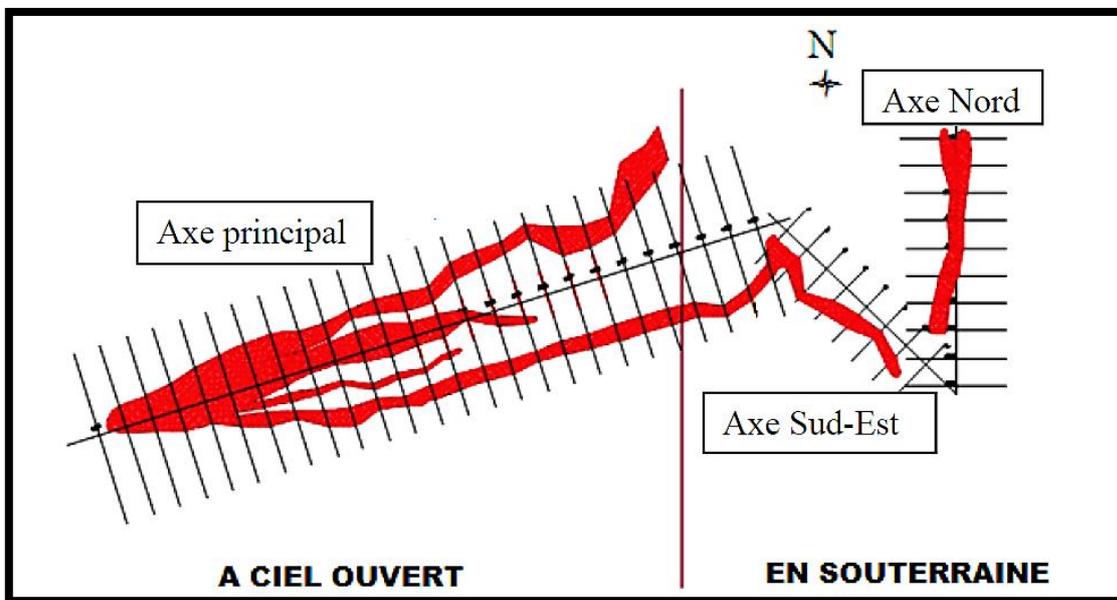


Figure 10 : Présentations de trois axes. [11]

### 5. Hydrogéologie

D'après les études hydrogéologiques il n'y a aucune nappe aquifère en eau potable dans la région minière de Boukhadra (la zone de Boukhadra souffre d'un grand manque d'eau qui ne répond ni aux besoins de la population ni à ceux des installations minières), mais il existe une nappe aquifère d'eau non potable qui est caractérisée par un niveau hydrostatique égale à 818m.

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, le réseau

hydrographique dans la région de la mine de Boukhadra est faible, à l'exception des multiples petits chéneaux d'écoulement pluviaux sans importance majeure qui parsème Djebel Boukhadra. [4]

Selon la géologie, on ne peut pas parler d'oueds, ou de réseau hydrographique proprement dit, mais on remarque des talwgs sec pendant une longue période de l'année et à faible écoulement. Leurs captages sont pratiquement impossibles à cause de la topographie et de leurs faibles quantités. [11]

### 6. Climatologie

Le village de Boukhadra se distingue par une alternance d'une saison chaude et sèche et une saison froide et humide avec une pluviométrie moyenne annuelle faible variable de 300 à 400 mm avec parfois de faibles chutes de neige.

Le climat est continental et semi-aride, en hiver relativement froid et pluvieux, avec un vent assez fort. La température moyenne annuelle de la région est de (+15 °C) avec un minimum de (-5 °C) en hiver et un maximum allant jusqu'à (+ 45 °C) en été, donc sec et chaud. [5]

### Synthèse

Le gisement ferrugineux de Boukhadra caractérisé par une structure géologique anticlinale très simple est d'une qualité de minerai supérieure, riche en Fer ; le gisement est de forme ventriculaire, dont la genèse est hydrothermale ou sédimentaire ; les réserves globales sont de 57 millions et sont composées de quatre (04) corps minéralisés principaux, deux principaux gîtes dans le gisement de Boukhadra : Gîte principale et gîte sud.

La minéralisation se prolonge jusqu'au niveau hydrostatique (818m). Le Djebel Boukhadra est le résultat d'une évolution tecto-sédimentaire où les diapirs des évaporites jouent un rôle très important, La nature sédimentaire du terrain étudié fait qu'il existe une anisotropie très marquée liée à leur dépôt.

Les formations les plus abondantes dans le massif de Boukhadra sont d'âge Aptien et dans lesquels on distingue deux groupes de faciès distincts :

- Faciès carbonatés représentés par plusieurs types de calcaire.
- Faciès terrigènes qui sont essentiellement formés par des calcaires gréseux.

L'eau n'a pas d'influence sur les ouvrages de la mine de Boukhadra parce que le niveau hydrostatique est en dessous de la zone d'exploitation.

*L'état actuel de la mine de  
Boukhadra*

### 1. L'état actuel de la mine de Boukhadra

#### Introduction

La mine de Boukhadra contribue à l'approvisionnement du marché local en minerai de fer, à la lumière de la concurrence mondiale pour les minéraux.

La production minière passe par plusieurs étapes importantes, de la mise en place de la mine à sa fermeture.

Il existe différentes manières d'extraction le minerai (mode d'exploitation à ciel ouvert ou mode souterrain ou bien les deux et des méthodes en chaque mode).

Parmi les modes se trouve l'exploitation souterrain, que nous irons certainement sous la contrainte d'extraire le minerai ou une partie importante de celui-ci.

Une mine souterraine est en quelque sorte une usine aménagée au sein de la terre en vue d'extraire de la roche en place les minéraux utiles qu'elle renferme. L'accès au gisement et l'abattage du minerai, c'est-à-dire de la roche qui renferme un mélange de minéraux dont au moins un peut être traité pour obtenir un produit commercialisable, s'effectuent par foration et tir à l'explosif. Le minerai est transporté au jour, où il est traité pour obtenir un concentré riche en valeur marchande.

L'exploitation d'un gisement en souterrain nécessite des infrastructures spéciales : un réseau de puits et de galeries communiquant avec la surface et permettant la circulation du personnel, le transport du matériel et du minerai. On accède au fond par un puits d'extraction, duquel partent des galeries menant aux chantiers. Les différents niveaux d'exploitation sont reliés par des galeries appelées plans inclinés. Toutes les excavations souterraines doivent être desservies par des systèmes d'aérage (amenée d'air frais et évacuation d'air vicié), d'alimentation en électricité, en eau et en air comprimé, d'exhaure, de roulage et de communications. [11]

#### 1.1. L'exploitation de Boukhadra

Le minerai est exploité par deux méthodes d'exploitation :

- Exploitation à ciel ouvert.
- Exploitation souterraine.

Exploitation à ciel ouvert : le djebel Boukhadra étant un relief montagneux exploité par des demi-tranchées.

## L'état actuel de la mine de Boukhadra

Exploitation souterraine : la méthode appliquée est la méthode du sous niveau abattu dont l'ouverture est faite par des galeries au jour. L'exploitation souterraine est effectuée suivant : trois axes : Axe Nord, Axe Principal et L'Axe Sud Est. [4]

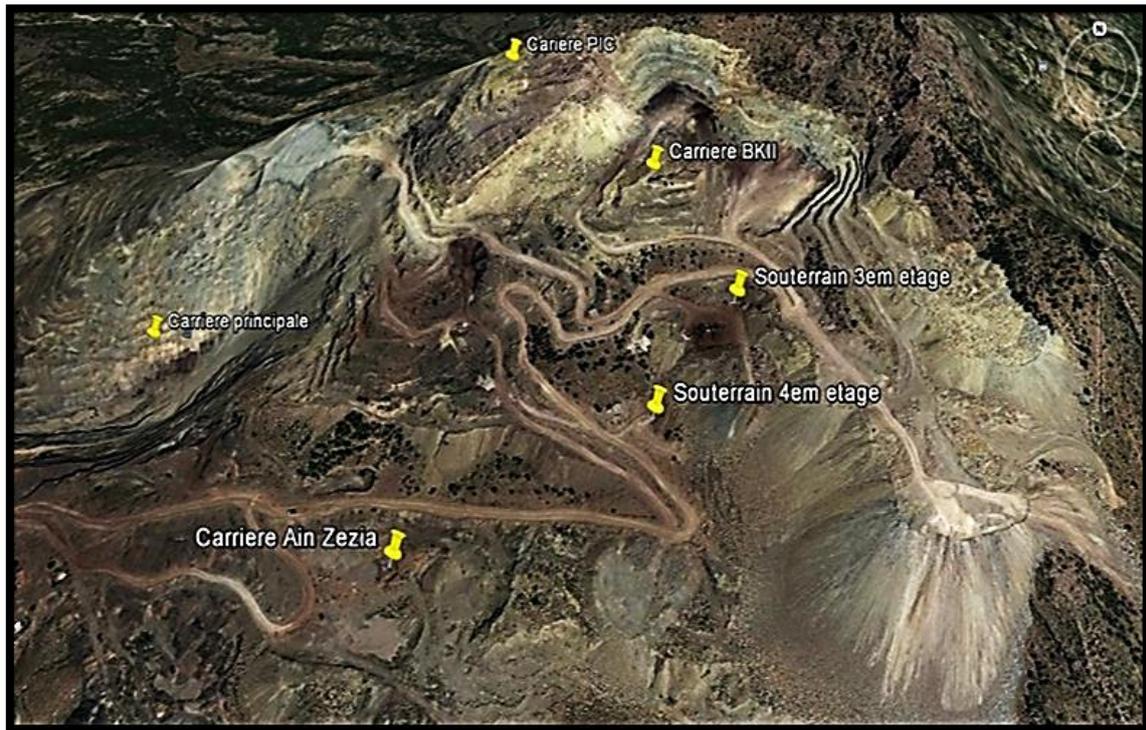


Figure 1 : Situation géographique représente les modes d'exploitation de la mine de Boukhadra. [1]

Tableau.1 : Les réserves géologiques et exploitables de la mine de Boukhadra. [57]

Sites et quartiers	Réserves géo (T)		Réserves exp (T)		Observation
	Tonnage	Fe %	Tonnage	Fe %	
Total ciel ouvert	12901106	53,30	11723490	52,31	
Total souterrain	33336356	55,76	30835456	55,34	
Total de la mine	46237462	55,08	42558946	54,48	En catégorie B + C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub>
Total de la mine	55487762	/	51809246	/	En catégorie C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub> +P

1.2. Régime de travail de la mine

1.2.1. Organisation de travail

En compte tenu de la matière première, la mine est dotée d'un régime de travail de 16h/24h effectué selon le calendrier suivant :

- 1<sup>ère</sup> Poste de 5h à 13h
- 2<sup>ème</sup> Poste de 14h à 21h

Tableau.2 : Organisation de travail. [37]

Le mode	Np par jour	Nh par poste
A ciel ouvert	2 postes continus 1 <sup>ère</sup> semestre et 03 postes continus 2 <sup>ème</sup> semestre	7h30/ poste
Souterraine	2 postes discontinus	6h30/ poste

Tableau.3 : Pour les travaux d'extraction - chargement et de transport. [37]

	Pour minerai	Pour stérile
Nombre de poste	2 P/j	2 p/jr
Duré d'un poste	8 h	8 h

Tableau.4 : Pour les travaux de forage et de tir. [37]

	Pour foration	Chargement des trous
Nombre de poste	2 P/j	1 p/jr
Duré d'un poste	8 h	5 h

- Le nombre de jours ouvrables par an :

Stérile : 330 jours/an

Minerai : 266 jours/an

- Nombre de jours ouvrables par semaine :

Pour la carrière : 7 Jours

Pour le souterraine : 5 Jours

- Nombre de postes par jour :

$$N_{p/j} = 2 \text{ postes}$$

- Nombre de postes par an :

$$N_{p/an} = N_{j/an} \times n; p/an$$

$N_{j/an}$  : nombre de jours ouvrables ; an

n : nombre de postes ; jour

1. Pour le stérile :

$$N_{p/an} = 330 \times 2 = 660 \text{ p/an}$$

2. Pour le minerai :

$$N_{p/an} = 266 \times 2 = 532 \text{ p/an}$$

### 1.3.2. Production annuelle planifiée

Actuellement, il n'y-a pas d'extraction de minerai dans la mine de fer de Boukhadra. Seulement l'évacuation du stérile dans la carrière à ciel ouvert.

- Mais pour notre étude on a utilisé les données de l'Anne 2020. [57]

Tableau.5 : Production annuelle planifiée.

Production	L'équation	Les donnés	Les résultats
Par année	Elle est donnée par l'entreprise pour l'année 2020		$P_{an} = 287500 \text{ T/an.}$
Par mois	$P_{mois} = \frac{PAN}{N_{mois/an}} ;$ T/mois	$N_{mois/an} = 12 \text{ mois}$	$P_{mois} = \frac{287500}{12}$ $= 24000 \text{ T/mois}$
Par semaine	$P_{semaine} = \frac{P_{mois}}{N_{semaine/moi}} ;$ T/semaine	$N_{semaine/mois} = 4$ semaines	$P_{semaine} = \frac{16700}{4}$ $= 6000 \text{ T/semaine}$
Par jour	$P_j = \frac{Pan}{N_{j/an}} ;$ T/jour	Pour minerai :	$P_j = \frac{287500}{266}$ $= 1080 \text{ T/jour}$
		Pour stérile :	$P_j = \frac{287500}{330}$ $= 870 \text{ T/jour}$
Par poste	$P_p = \frac{P_j}{N_p} ;$ T/poste	Pour minerai :	$P_p = \frac{1080}{2}$ $= 540 \text{ T/poste}$
		Pour stérile :	$P_p = \frac{870}{2}$ $= 435 \text{ T/poste}$

## 2. Exploitation à ciel ouvert :

Le djebel Boukhadra étant un relief montagneux exploité par des demi-tranchées ; la hauteur du gradin est de 15 m dans les parties amont, de 12 m dans les parties aval, à l'exception du site PIC elle est de 10 m ; [2]

**La foration** s'effectue aux moyens de sondeuses, de chariots et de marteaux perforateurs ; Les diamètres des trous de foration sont respectivement de 160 mm, 80 mm et de 26 mm ; L'abattage s'effectue à l'explosif par tir électrique.

**Le chargement** est opéré à l'aide de pelles mécaniques et de chargeuses sur pneus de type DIESEL de capacité respective 3.32 et 5.5 m<sup>3</sup> de godet.

**Le transport** est réalisé à l'aide des camions de carrière vers les terrils extérieurs au périmètre d'exploitation pour le stérile sur une distance d'un (1) Km et vers le concasseur pour le minerai sur une distance de 2.5 Km.

**Le traitement mécanique** est assuré par un concasseur giratoire d'une capacité de 300 T/h, le minerai concassé est acheminé par bande transporteuse, jusqu'aux trémies de chargement au niveau de la gare sur une distance de 1 Km d'où il est évacué dans des wagons de 60 T de charge utile vers le complexe sidérurgique ALFASID (MITTAL STEEL- ANNABA). [1]

### 2.1. Paramètres de la méthode d'exploitation à ciel ouvert

D'après les études :

Tableau.6 : les Paramètres de la méthode d'exploitation à ciel ouvert.

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Hauteur du gradin	$H_g$	15	m
Largeur d'enlevure	A	4.2	m
Largeur de la plate-forme de travail	$L_{pt}$	76.26	m
Largeur du tas de roche abattus	X	46.42	m
La chausse de transport	T	15.47	m
Largeur de prisme d'éboulement	Z	3.67	m
Vitesse de déplacement	$V_{cha}$	225	m/p
Vitesse d'avancement du front	$A_{an}$	31.9	m/an
Angle du talus stable	$\beta$	60°	Dégré
Angle du talus	$\alpha$	85°	Dégré

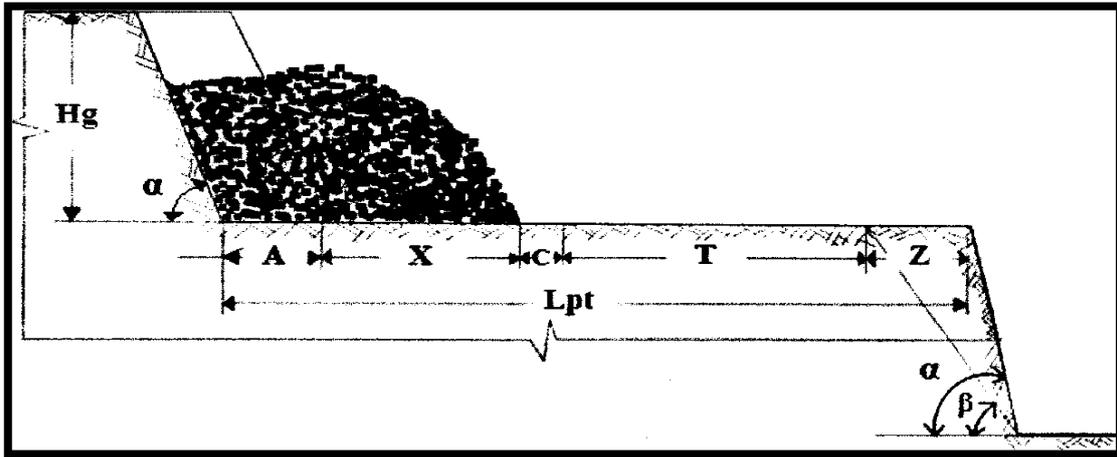


Figure 2 : Schéma de Paramètres de la méthode d'exploitation à ciel ouvert.



Figure 3 : La sondeuse BBURG HD 1500D utilisé pour les travaux de forage au niveau de la mine de Boukhadra.



Figure 4 : Chargement et transport par Chargeuse Caterpillar 990K et Camion Caterpillar 75G.



Figure 5 : Traitement mécanique réalisé par le concasseur giratoire.

Le traitement mécanique est assuré par un concasseur giratoire d'une capacité de 300 T /h dont les caractéristiques citées ci-après :

Tableau.7 : les caractéristiques de concasseur.

Paramètres	Option
Marque	ALLISCHALMERS
Type	PM 13519/36
Puissance	125 KW
Année de mise en exploitation	1951
Source d'énergie	Électrique
Granulométrie	250 à 300 mm de diamètre
Grosseur max des morceaux	1000 mm
Productivité du concasseur	300 T/h

Le minerai concassé est acheminé par bande transporteuse, jusqu'aux trémies de chargement au niveau de la gare sur une distance de 1 Km d'où il est évacué dans des wagons de 60 T de charge utile vers le complexe sidérurgique (ANNABA).



Figure 6 : La bande transporteuse de Boukhadra.

### 3. Exploitation souterraine

La méthode appliquée est la méthode du sous niveau abattu dont l'ouverture est faite par des galeries au jour. L'exploitation souterraine est effectuée suivant trois axes : [11]

- Axe Nord ;
- Axe Principal ;
- L'Axe Sud Est.

Plusieurs méthodes ont été expérimentées : (chambre magasin, sous niveaux foudroyés et sous niveaux abattus) ; Il a été retenu la méthode d'exploitation par sous niveaux abattus qui se résume comme suit : [36]

**Creusement** des ouvrages préparatoires et de découpage ; formation de la coupure verticale ; La hauteur du sous niveau est de **20 m**.

**La foration** est réalisée par trous profonds en éventail et s'effectue par des chariots de foration ; L'abattage s'effectue à l'explosifs par tir électrique ;

**Le chargement** et le transport de minerai au niveau des blocs d'exploitation sont assurés par des pelles chargeuses transporteuses de capacité (**3.8 m<sup>3</sup>** de godet).

**Le transport** du minerai est culbuté dans une cheminée principale de transport jusqu'au niveau de base de roulage d'une section creusée dans les encaissants. [38]

#### 3.1. Ouverture du gisement

On appelle ouverture, le creusement des ouvrages donnant l'accès au gisement à partir du jour. Principalement ces ouvrages doivent assurer dans des meilleures conditions techniques et économiques les processus suivants : [36]

- Circulation d'air (l'aération) ;
- Des voies de transport pour le produit à extraire, pour le matériel et pour le personnel.

Le découpage précède les travaux préparatoires et l'exploitation proprement dite. La résolution de problème d'ouverture d'un gisement consiste à choisir le type, le nombre et l'emplacement des ouvrages principaux et auxiliaires donnant l'accès au gisement à partir du jour. [38]

Etant donnée l'infinité des variétés et des conditions technique et économique, le choix du mode le plus rationnel d'ouverture d'un gisement s'effectue le plus souvent par la méthode des variantes. Et pour n'importe quel gisement, cette méthode consiste à :

- Etudier quelques modes d'ouverture applicables selon les conditions géologiques et minières.
- Faire la comparaison économique des variantes possibles. [38]

### 3.2. Choix du mode d'ouverture

Lors de l'exploitation d'un gisement, il est rationnel de choisir le mode d'ouverture répondant aux conditions les plus efficaces de l'exploitation.

Généralement l'ouverture souterrain d'un gisement dépend des facteurs principaux sont : les facteurs géologiques, miniers et économiques. [11]

- ✓ Les facteurs géologiques :
  - Relief de terrain ;
  - Forme et dimension du gisement ;
  - Puissance, profondeur et pendage de gite ;
- ✓ Les facteurs technico-miniers :
  - Productivité de la mine ;
  - Durée de service de la mine souterraine ;
  - Moyen de mécanisation et sécurité de travail ;
- ✓ Les facteurs économiques :
  - Dépenses capitales de construction de la mine souterraine ;
  - Rendement ;

En outre, la méthode d'ouverture choisie doit assurer la sécurité de travail pour les personnels, l'équipement minier et de transports.

Le gisement de Boukhadra est considéré comme dressant, il est situé dans un relief montagneux par conséquent le mode d'ouverture est par galerie au jour, l'ouverture à la galerie jour facilite l'ouverture, les ouvrages doivent être protégées contre l'inondation et effondrement. [11]



3.3. La division du champ minier

On appelle « champ minier » le gisement limité pour l'exploitation par une mine.

Pour notre cas on a un gisement du champ minier dressant on peut appliquer la division des champs minier en étage. La hauteur de l'étage et de 30 à 100m ; par ce que le gite est puissant, dressant et de bonne stabilité des roches encaissantes on prend  $h = (60m)$ .

Division d'un étage en bloc. La hauteur d'un bloc et de 10 à 30. D'après notre cas apprend  $h = 20m$ .

Les étages et les réserves géologiques, hors contour final de la carrière principale, sont représentés :

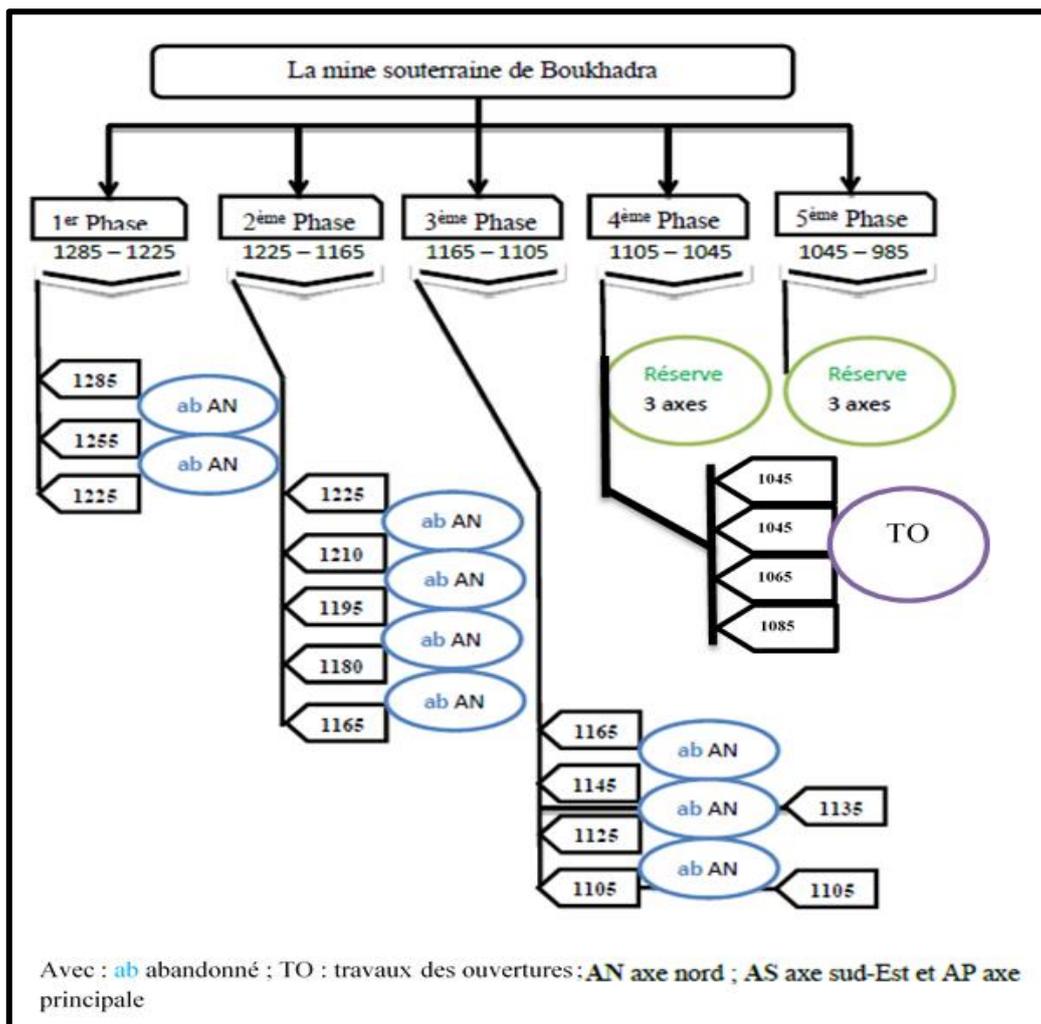


Figure 8 : Organigramme représentatif des phases d'exploitation souterraine. [11]

### 4. Le Cycle d'abattage avec l'explosif

Le creusement traditionnel à l'explosif reste encore la technique d'excavation la plus économique dans de nombreuses situations. Il obéit à un cycle spécifique composé de sept phases successives et répétitives.

#### 4.1. Le traçage

##### - Traçage des trous de mine

Le traçage ou la foration des trous de mine est réalisé selon un plan établi et déterminé par les besoins de l'exploitation. Actuellement dans la mine souterraine, il est réalisé grâce à des marteaux perforateurs. Les trous sont forés à des diamètres 30mm et 65mm dépend de nature de et les caractéristiques de dureté des roches. Le traçage est une activité bruyante et parfois très poussiéreuse. [36]



Figure 9 : Marteau perforateur utilisé dans la mine de Boukhadra. [7]



Figure 10 : Trous forés dans les travaux d'ouverture de la phase 4<sup>ème</sup> [7]

Tableau.8 : les caractéristiques de marteau perforateur.

Type	Poids (kg)	Diamètre du taillons (mm)	Longueur du taillons (mm)	Consommation D'air comprimé (m <sup>3</sup> /min)	Nombre de marteaux Perforateurs
Ps-50, pk-3	50	64	1.5	3.4 - 4.7	3

##### - Traçage des trous profonds

Le traçage ou la foration des trous profonds est réalisé selon un plan établi et déterminé par les besoins de l'exploitation. Actuellement dans la mine souterraine, il est réalisé grâce à chariot de foration.

La profondeur des trous profonds varie de 5 jusqu'à 60m, et même plus, et le diamètre de 30 - 40mm jusqu'à 150 - 200mm.



Figure 11 : chariot de foration de la mine de Boukhadra.

Tableau.9 : Les paramètres des trous et des charges dans un front Boukhadra.

Désignation	Valeur	Unité
Longueur des trous	2.2	m
Angle d'inclinaison des trous	75	Degré
Plan horizontal	75	Degré
Plan vertical	75	Degré
Longueur des charges	1,75	m
Longueur de bourrage	0.45	m

#### 4.2. Le chargement des trous

La phase de chargement consiste à placer les substances explosives dans les forages selon le plan de tir établi par le concepteur en fonction de la position des forages et du tir. Le chargement des trous est réalisé par une machine de chargement. Avec des types d'explosif soit Marmanit 1, 2, 3 ou TEMEX 1, 2. [7]



Figure 12 : Machine de chargement des trous. [7]

### 4.3. L'abattage

L'abattage ou tir est réalisé par passes ou volées dont la longueur varie selon le type de roches rencontré. En principe, les volées ont entre 1 à 5m de longueur. L'abattage peut être réalisé en pleine section ou en sections divisées.

Dans notre cas la longueur d'avancement est variée entre 1.2 m à 1.5 m. [36]

### 4.4. L'aérage

L'aérage ou la ventilation est une phase importante du cycle, souvent négligée. La destruction des explosifs provoque par combustion, la production de gaz toxiques (700 à 900 l de gaz par Kg d'explosifs) et de poussières abondantes.

L'évacuation de ces matières dans un lieu confiné nécessite la mise en place de moyens importants de ventilation, soit par dilution (ventilation soufflante), soit par aspiration (ventilation aspirante), soit les deux à la fois, pendant un temps variable en fonction de la quantité produite. Cette quantité va dépendre de la nature et de la quantité de l'explosif, de la nature du rocher, de la section de la galerie, de la qualité du confinement de l'explosif...

Le temps nécessaire à l'évacuation des produits dangereux ou toxiques (gaz et poussières) dépend des quantités produites mais également de la puissance des moyens mis en œuvre et de leur typologie. [36]

D'après l'abattage de minerai de fer (Hématite  $FE_2O_3$ ), il faut aérer la zone à l'aide de ventilateur aspirant l'air viciée ou bien souffler l'air frais (aérage artificielle) ou bien naturel, de la mine de Boukhadra on a installé le ventilateur au niveau 1105 mais le ventilateur s'arrête car les schémas des ouvrages sont simples et les engins de foration est hydraulique malgré ça on utilise l'aérage naturel et cette opération ce fait par les deux galeries au jours (galerie axe principale et la galerie sud-est et le vide au jours qui on trouve au niveau 1105). [11]

### 4.5. La purge et le boulonnage

L'opération de purge est assez délicate car elle consiste à faire tomber les écailles ou les blocs non stables. Elle se fait à l'aide d'un pic appelé pince à purger. Elle doit être pratiquée par des personnes formées à ce type d'opération.

Elle est généralement suivie d'une phase de boulonnage qui consolide la voûte. En principe, cette phase se situe juste après la purge car elle assure la stabilisation de la voûte et des parements afin de permettre le travail des hommes sous le décousu. [11]

### 4.6. Le marinage

Après la purge, les matériaux qui ont été excavés par le tir sont évacués à l'aide d'une chargeuse transporteuse et de camions navette. Parfois, le marinage du tir est réalisé grâce à des berlines tractées par des locomotives sur rails ou sur convoyeurs à bandes. Chacune de ces méthodes est choisie en fonction de la section de la galerie et de la distance à parcourir ainsi que des contraintes de pollution.

Notre choix de section de la galerie dépend aux paramètres dimensionnels de chargeuse. [36]



Figure 13 : Chargeuse chargé le godet. [11]

Le transport c'est une procédure très importante et occupe une grande place dans le processus miniers.

Il consiste à déplacer les charges de minerai ou stériles d'un lieu à l'autre, dans notre cas de front d'abattage ou de cheminée de soutirage vers le couloir de culbutage ou la zone de stockage de minerai. Il se fait soit par cheminée, scraper, wagonnet ou par camion. [36]

Dans notre cas la mine de Boukhadra utilise 2 camions de la marque de ATLAS COPCOMT2000 car :

- Il a grand relativement efficacité de transport des minéraux utiles et roches stériles sur la distance courte ;
- Simplicité de construction des engins de transport ;
- La manœuvrabilité. [36]



Figure 14 : Procédure de chargement dans la mine souterraine de Boukhadra. [7]

Ça hauteur est de 2425mm, et ça largeur de 3366mm

Le temps de cycle moyen de chargement est de 55.05s.

Le chargement et le transport des roches abattues s'effectue à l'aide d'une chargeuse transporteuse avec une capacité de charge de 3m<sup>3</sup>, les déblais sont évacués par un camion navette avec une capacité de la benne de 20 t vers la zone de décharge au jour, le minerai sera culbuté du niveau 1105 au niveau 1065 par la chargeuse à travers un couloir à chute, après le culbutage, le minerai sera rechargé par une chargeuse Caterpillar dans des camions pour le transporter vers le concasseur. [36]



Figure 15 : Déchargement de camion. [36]

#### 4.7. Le transport

Le transport est réalisé à l'aide des camions de carrière vers les terrils extérieurs au périmètre d'exploitation pour le stérile sur une distance d'un 1Km et vers le concasseur pour le minerai sur une distance de 4Km. [36]

### 4.8. Concassage

Le minerai extrait du massif présente une granulométrie qui ne répond pas aux exigences de transport par convoyeur, camion ou par train, c'est pour cette raison que n'importe quel type de minerai doit subir un traitement mécanique.

Le traitement mécanique consiste à la réduction des dimensions des roches abattues afin d'obtenir une granulométrie favorable au transport et aux exigences des clients.

Le minerai de fer extrait dans la mine de BOUKHADRA étant de très bonne teneur en fer ne nécessite aucune opération chimique de traitement. Néanmoins ; le seul traitement que ce minerai subit est le concassage. Afin d'arriver chez les consommateurs dans les normes granulométriques adéquates ; le minerai extrait est concassé.

Le traitement mécanique est assuré par un concasseur giratoire d'une capacité de 300 t/h. [11],[36]

### 4.9. L'expédition

Le minerai concassé est acheminé par bande transporteuse, jusqu'aux trémies de chargement au niveau de la gare sur une distance de 1Km d'où il est évacué dans des wagons de 60T de charge utile vers Complexe sidérurgique d'El Hadjar. [11]

### 4.10. Le soutènement :

Le soutènement consiste à mettre en place des moyens techniques de manière à reprendre les efforts à court terme du terrain.

Il a un rôle de protection pour les travailleurs, de supportage pour assurer la stabilité des gros blocs et de confinement pour limiter la convergence du terrain.

Dans les ouvrages souterrains sortant galerie au jour au des roulages, on remarque que le type de soutènement utilisé est métallique pour éviter l'éboulement de terrain sortant les couches de marne, mais l'emplacement des rails de soutènement est disposé sans étude géotechnique de terrain c'est-à-dire manque écritoire de l'étude. Dans la mine de Boukhadra en utilise les cintres métalliques. [36]

Dans notre cas la 4<sup>ème</sup> phase se trouve dans un ancien remblai, et une couche importante de marnes jaune qui est très instable alors il est obligé de faire un soutènement immédiat et quand les autres soutènements sont très couteux et l'existence des cintres au niveau de la mine on va faire le soutènement par cintre métalliques. [36]



Figure 16 : Le soutènement de la galerie de la 4<sup>ème</sup> phase.

## 5. État actuel des ouvrages de la 4<sup>ème</sup> phase

Les travaux de prospection dans cette phase sont effectués par ouvrage minier et sondage et ont été réalisés uniquement sur les deux axes (principal et Sud –Est) l'autre axe a été estimé selon la continuation de corps minéral des phases supérieures à la phase 3<sup>ème</sup>. [11]

### 5.1. Les travaux d'ouvertures :

Il existe actuellement : des ouvrages miniers réalisés aux 2 niveaux : [36]

- ✓ Sous niveau 1045 : les ouvrages miniers réalisés à ce niveau sont liés au jour avec une galerie d'entrée qui exige un soutènement métallique (cintre).
  - Une galerie au jour d'entrée qui exige un soutènement métallique.
  - Un montage relie les niveaux 1045 et 1065 situé axe Sud - Est (Coupe 5).
  - Une cheminée d'aérage principal : 1105, 1045, 985, 925 Sud - Est (Coupe 7).
  - Un travers banc d'aérage principal de longueur 395m Sud - Est (Coupe 11).
  - Un montage entre 1045 /1065 et un travers banc d'accès et du transport situé à l'axe Nord (Coupe 298).
- ✓ Sous niveau 1085 :
  - Un montage entre 1085 et 1105 à l'axe principal (Coupe 103). [36]

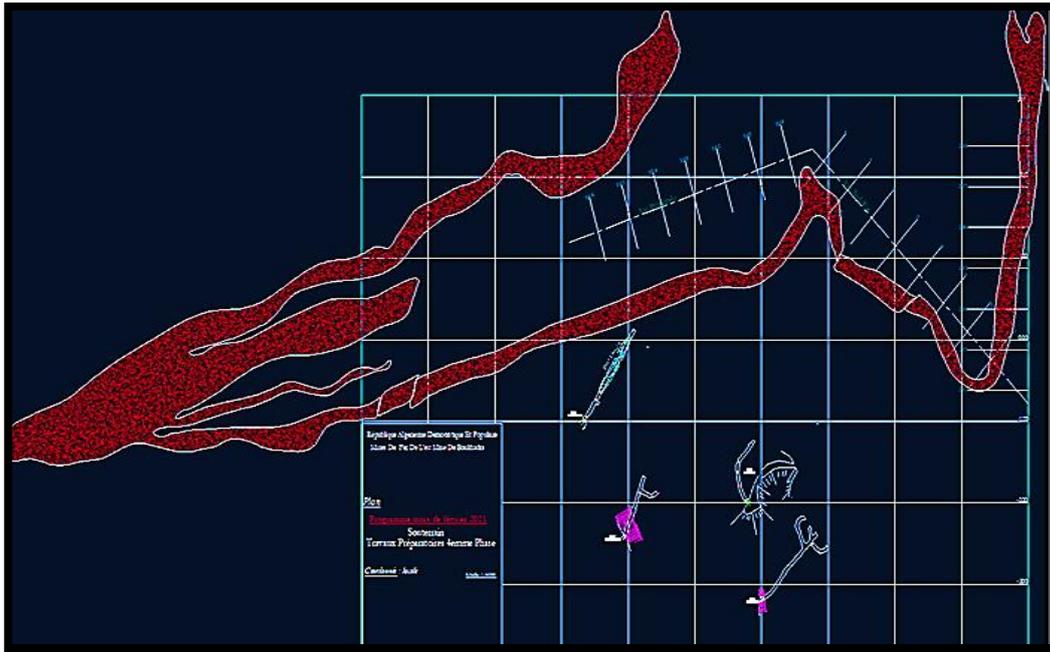


Figure. 17 : Plan topographique des travaux d'ouverture souterraine 4<sup>ème</sup> phase (février 2021) par logiciel AutoCAD. [37]

La méthode par sous niveaux abattu avec chambre vides, est la meilleure méthode utilisée dans la mine de Boukhadra alors on va utiliser pour la 4<sup>ème</sup> phase est composé de niveau de tête 1105 et niveau de base 1045 et deux sous niveau 1085 et 1065 sur les trois axes.

Travaux d'ouvertures et de développement Souterrain (la dernière mise à jour) :

Tableau. 10 : Le développement souterrain 2019. [37]

Niveau x	Accès ver la coupe	Métrages prévu (m)	Métrages réalisé (m)	Reste (m)
1045	11	420	157	263
1045	105	350	100	250
1085	8	330	80	250
1065	8	300	0	300
1065	105	250	133	117
<b>TOTAL</b>		1650	470	1180

### 5.2. Les problèmes rencontrent au niveau 1045m

Lors des travaux d'exploitation, on rencontre certaines contraintes qui nous empêchent à réaliser les objectifs tracés parmi lesquels on cite principalement :

Le problème principal et le plus important dans la galerie principale au niveau 1045m de la mine souterraine de Boukhadra est l'éboulement des roches à travers chaque avancement du creusement.

La section de la voute de la galerie devenir plus gros a causé le résultat de l'application du même plan de tir dans les différents types des roches lors de l'opération de creusement et négligence le trou de bouchon.



Figure 18 : Zone d'éboulement instable soutenu par un cintre métallique.

La photo précédente présente l'éboulement engendré par les travaux de creusement de galerie de roulage au niveau 1045.

Nous remarquons des déversements dans la galerie lors le creusement, la voie de la galerie a beaucoup changé à chaque effondrement et lors l'accès doit être instable.

Dont des endroits de cette galerie sont soutenues par des cintres métalliques et blindage par bois à cause des risques d'éboulement (terrain instable),

Il y a trois problèmes importants :

- Insuffisance du parc de chargement, transport et foration ;
- Problème de qualification du personnel, dû à la relève qui n'a pas eu lieu suite au départ des gens qualifiés en retraite ;
- Manque de moyen humain surtout pour le développement.

Et deux autres sous-problèmes :

- Problème de soutènement (endroits nécessitants le soutènement) ;
- Problème d'alimentation en eau.

### Synthèse

Le djebel Boukhadra est un relief montagneux exploité à ciel ouvert par des demi-tranchées, et exploité souterraine par la méthode de sous niveau abattu.

La mine souterraine de Boukhadra existe uniquement dans la corp sud, dans la corp nord il y a des gradins à ciel ouvert qui élargissent. L'exploitation est effectuée suivant trois axes : Axe Nord, Axe Principal et l'Axe Sud Est.

Les travaux dans les phases supérieures à la phase 4<sup>ème</sup> est fini. Et il y a des travaux d'ouvertures dans cette dernière.

Notre niveau d'étude est la galerie 1045m, l'exploitation dans les autres niveaux sont faite par méthode sous niveau abattu. Le chargement et le transport des minéraux utiles sont assurés par des chargeuses transporteuses. L'abattage du minerai se fait par explosifs.

Concernant à la méthode d'exploitation appropriée à la 4<sup>ème</sup> phase on a décidé de garder la méthode utilisée à la phase supérieure ça veut dire la méthode par sous niveau abattus avec chambre vide, où le niveau de tête 1105 et le niveau de base 1045 et deux sous niveau 1085 et 1065 sur les trois axes.

Nos travaux d'abattage assurent une production de 4584.776 t qui est très favorable en utilisant juste les équipements trouvés dans la mine, alors notre choix est plus économique.

La mine de Boukhadra souffre de plusieurs problèmes. Il y a un grand retard enregistré dans les travaux de développement au niveau du souterrain. A cause de l'existence de plusieurs points d'éboulements ; d'effondrements montrent l'état d'instabilité qui existe dans cette mine souterraine de Boukhadra ; un diagnostic de stabilité est d'une importance capitale pour comprendre le niveau de risque que court les ouvriers de la mine.

La politique de réglementation minière est instable, ceci est dû à un certain nombre de raisons, Ceci est démontré par la productivité annuelle, qui n'est jamais constante. L'activité s'est arrêtée plusieurs fois, surtout en souterrain.

Le problème de stabilité des ouvrages en souterrain lors de l'opération de creusement montre l'existence de quelques éboulements rocheux au niveau de notre galerie d'étude du niveau 1045m. Cette problématique fera l'objet du chapitre suivant.

*Caractérisation  
géomécanique du massif  
rocheux de Boukhadra*

## Introduction

La classification géomécanique d'un massif rocheux est nécessaire dans les opérations minières telle que les opérations de creusement des ouvrages miniers pour déterminer le besoin de protection de ces ouvrages dont la durée de vie utile est considérable, exige une stabilité optimale adéquate pour assurer la sécurité et éviter une réhabilitation coûteuse en cas d'effondrements et d'événements provoqués par mauvais soutènement ou mauvaise méthode de creusement.

Actuellement, il existe de nombreuses classifications géomécaniques, telles que celles proposées par Protodiakonov, Bieniawski, Laubscher, Taylor, Barton et Romana, dont le principe est l'évaluation de la qualité de la masse rocheuse, afin de la diviser en domaines structurels, ces limites coïncident généralement avec des caractéristiques géologiques comme les failles ou les joints de stratification. [32]

Pour une caractérisation géomécanique adéquate, il est nécessaire de connaître les principales propriétés des roches dans lesquelles l'excavation doit être réalisée.

Tout cela doivent être prises en compte pour une étude détaillée de la masse rocheuse sont définies dans ce chapitre.

### 1. Description du massif rocheux de Boukhadra :

Nous nous intéressons dans notre travail au creusement de la galerie de base du niveau 1045m de la mine souterraine de Boukhadra, en raison des problèmes géologiques rencontrés par les ingénieurs exploitants, nous essaierons de faire une étude géotechnique détaillée et nécessaire pour comprendre la meilleure façon de creusement de cette galerie. Nous présentons la coupe géologique visuelle pour déterminer la structure globale du tracé de la galerie de base du niveau 1045m.

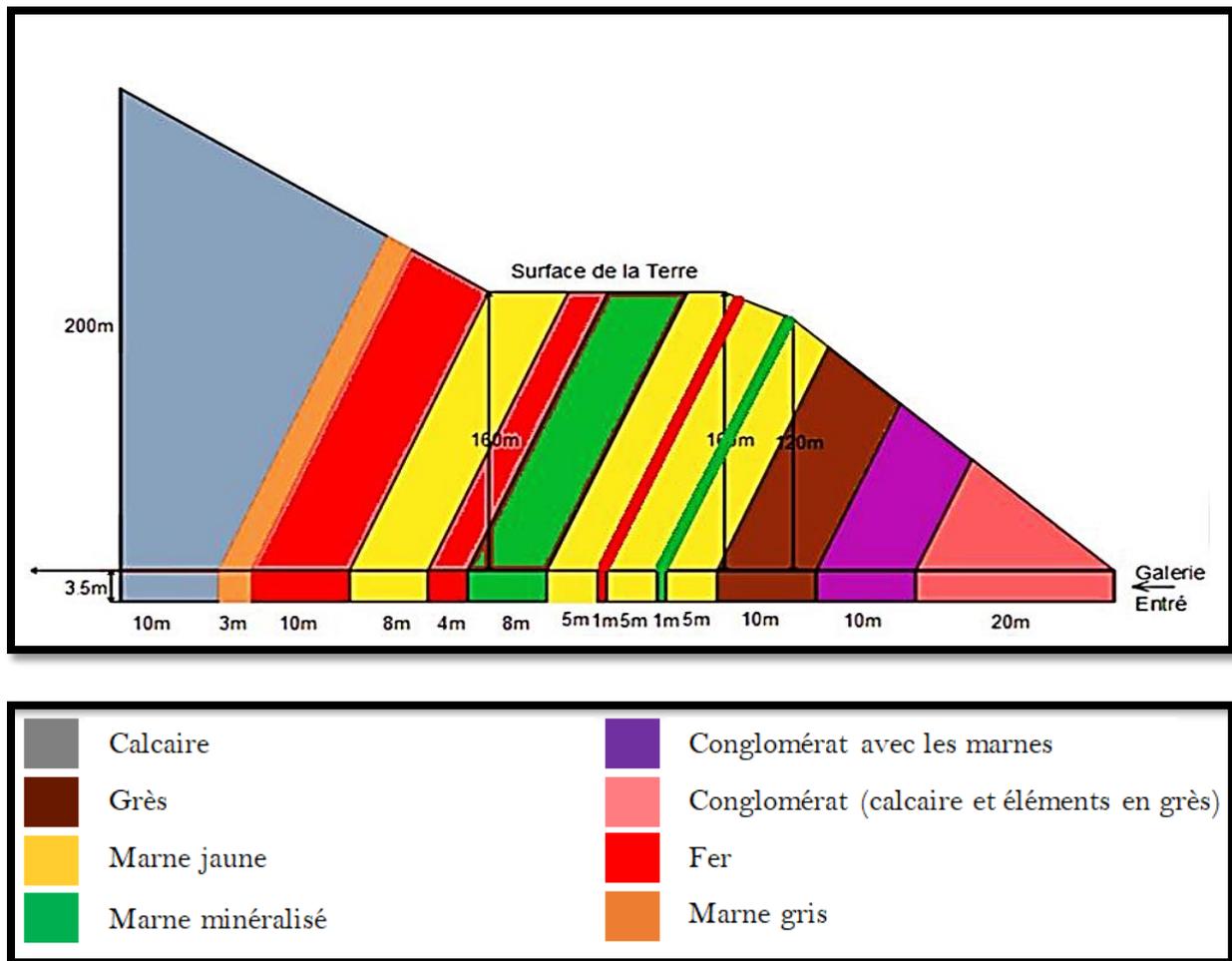


Figure 1 : Représentant le tracer de la galerie 1045m.

Les différentes formations rocheuses rencontrées à travers la galerie principale à une distance de cent mètres (100m) sont :

Conglomérats ; Les grès ; marne jaune ; marne minéralisée ; minerais de fer ; marnes gris ; calcaires.

Dans les vingt premiers mètres de l'entrée de la galerie nous trouvons un rocher de conglomérat en blocs métriques avec des contacts directs avec des matrices marneuses et gréseuses avec des remplissages de calcite blanche.

Les dix prochains mètres en trouvent des conglomérats en blocs métriques en contact direct avec les marnes et des traces de calcites.

À une distance de trente mètres de l'entrée de la galerie, nous trouvons les grès à une distance de dix mètres.

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

Et à distance de dix-sept mètres on trouve 5m de la marne jaune après un mètre de la marne minéralisée par la suite 5m de la marne jaune après un mètre de minerai de fer et on trouve encore une fois 5m de la marne jaune.

Suivie par ; huit mètres de la marne minéralisée sont suivies par quatre mètres du minerai de fer et huit mètres de la marne jaune. Ensuite, nous rencontrons à nouveau du minerai de fer à distance de dix mètres.

Enfin, à une distance de treize mètres, on le trouve divisé en trois mètres de la marne gris et dix mètres du calcaire.

### 1.1. Discontinuités du massif de Boukhadra :

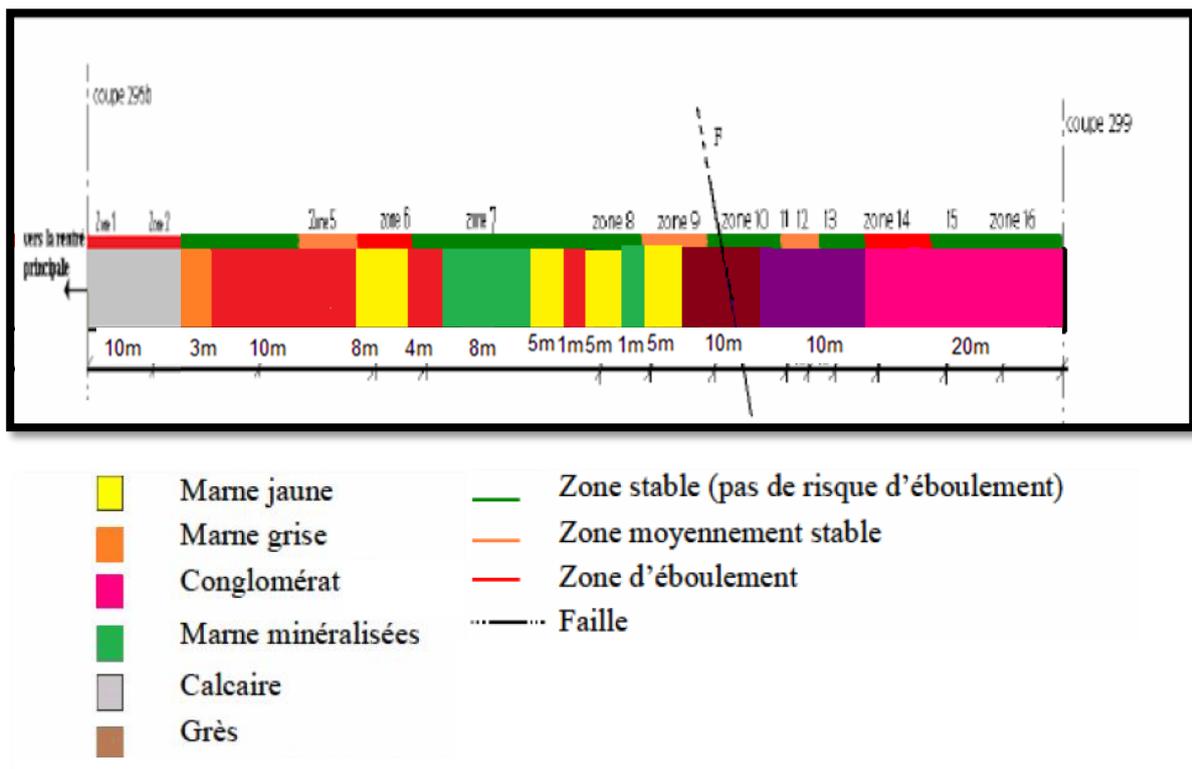


Figure 2 : coupe géologique visuelle de la galerie principale du niveau 1045m par logiciel AutoCAD.

Le tableau.13 donne une quantification des discontinuités (failles, fissures) dans le tronçon étudié (la galerie principale du niveau 1045 m).

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

Tableau. 1: Relevés des failles et fissures existantes dans le tronçon étudié de la galerie principale du niveau 1045 m.

Discontinuités	Direction (grade)	Pendage (°)	Ouverture (cm)	Remplissage	Distance de l'entrée (m)
Faille	290 nord	-	-	Calcite	5.5
Faille	260 nord	-	-	-	12
Faille	Nord sud	60°	-	Calcite	18
Des petits	Différentes	-	-	Calcite	-
Fissures	Directions	-	-		
Faille	310 nord	55°	30	-	22
Des petits	Différentes	-	-	-	-
Fissures	Directions				
Faille	310 nord	35°	50	Calcite	24
Faille	310 nord	-	-	Calcite	26
Faille	Nord sud			-	34
Faille	290 nord	59°			36
Faille	260 nord	48°			39
Faille	310 nord	45°			40
Des petits	310 nord	45°	35		42
Fissures	293 nord	56°			43.5
Faille	269 nord	50°			45
Des petits	315 nord	47°			50
Fissures	322 nord	36°			55
Faille	298 nord	40°			63
Faille	264 nord	56°			
Faille	190 nord	65°	40		
Faille	261 nord	51°			65
Faille	260 nord	42°			67
Faille	233 nord	58°			
Des petits	222 nord	51°			71
Fissures	298 nord	61°			
Faille	310 nord	44°			
Des petits	323 nord	28°			
Fissures	224 nord	40°	20		78
Faille	222 nord	51°			
Faille	312 nord	36°			
Faille	298 nord	43°			82
Faille	214 nord	50°			
Faille	195 nord	56°	25		
Faille	267 nord	18°			85
Des petits	261 nord	37°			
Fissures	290 nord	56°			
Faille	266 nord	44°			87
Des petits	310 nord	45°			
Fissures	310 nord	45°			
Faille	160 nord	30°			91
Faille	189 nord	66°	15		
Faille	310 nord	60°			
Faille	277 nord	54°			95
Faille	260 nord	30°	40		
Faille	215 nord	20°			
Des petits	170 nord	52°			97
Fissures	189 nord	60°			
Faille	220 nord	55°			
Des petits	294 nord	66°			99.5

On désigne par discontinuité une interruption de la roche qui résulte de la formation du massif. Les discontinuités dans la mine de Boukhadra peuvent être d'origine tectonique (failles, fractures) ou stratigraphique.

Ce réseau de discontinuités confère au massif une structure, importante à connaître les causes des problèmes géotechniques au niveau 1045m.

Notons que plusieurs discontinuités visibles sur le massif rocheux peuvent également résulter d'effets arrière de tirs précédents, à cause du mauvais plan de tir ce qui provoque agrandir la taille de la voute, et aussi il s'agit du cas où le travail de l'explosif d'un tir précédent a contribué à pré-fragmenter l'arrière du front. Il est cependant difficile de distinguer les discontinuités initiales de celles créées par le tir.

La fracturation initiale du massif induit deux effets opposés :

- D'une part, elle fragilise le massif, et donc réduit globalement sa résistance mécanique.
- D'autre part, elle contraire l'action mécanique de l'explosif, par atténuation de l'onde de choc lors de son passage à travers les discontinuités et par détente des gaz dans les fissures.

Fonction de leurs directions et d'autres propriétés relatives à l'abattage des roches, les discontinuités influent d'une manière flagrante sur l'importance de l'onde de choc lors de la fragmentation des roches. Les discontinuités influent d'une manière très négative sur la résistance des roches ce qui empêche les fissures radiales de se propager à travers le massif fissuré et du coup, une faible zone d'arrachement apparent autour du trou. [32]

### 2. Classification géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

#### 2.1. Classification géomécanique de Bieniawski (RMR) :

Le système de classification géomécanique Bieniawski ou système RMR (Rock mass rating), a été développé par Z.BIENIAWSKI 1976, elle se base sur la description des terrains traversés et les caractéristiques des roches, cette méthode utilise cinq paramètres pour déterminer la qualité du massif rocheux : [8]

- Résistance à la compression de la roche ;
- RQD (Rock Qualité Désignation) ;
- Espacement des discontinuités ;
- Conditions des discontinuités ;
- Condition des venues d'eau.

##### a) La résistance de la roche

La résistance d'une roche aux contraintes induites est l'une des principales exigences pour les classifications géomécaniques les plus utilisées aujourd'hui, telles que le RMR, ou le GSI modifié, la méthodologie suivante présentent pour les obtenir en fonction de leurs processus de laboratoire. [32],[2]

##### Test de compression simple

Les échantillons sélectionnés pour les tests de résistance à la compression simple ont été collectés en 18 points représentatifs inclus dans la section (5m à 100m) de la galerie du défrent facies de la mine de boukhadra, qui doit être classée géomécaniquement plus en détail.

Le choix des endroits de prélèvement des échantillons a été réalisé en tenant compte du changement de facies et de couleurs de la roche, la densité et l'orientation des fissures, ainsi que la stratification. Ces échantillons sont détachés directement du massif A l'aide d'un marteau, Des roches cylindriques avec des volumes variables de (10/5/5) cm apte à l'expérimentation dans la machine de compression simple ont été obtenues. Le nombre de ces blocs rocheux est de 18 blocs.

De plus, des prélèvements ont été effectués dans la veine minière et dans des roches effondrées correspondant au point topographique 9NE, de la mine d'où sont déduites les caractéristiques d'une éventuelle zone minéralisée à exploiter. Les endroits de prélèvement sont indiqués sur la photo.



Figure 3 : zone d'échantillonnage contact (Minerai / Marne) au dernier point de la galerie.

Le transport et l'emballage de ces échantillons a été réalisé avec le plus grand soin.



Echantillon de Fer



Echantillon de Calcaire



Echantillon de Grès



Echantillon de marne jaune

Figure 4 : Échantillons prélevés dans la galerie de niveau 1045m.

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

---

La confection des éprouvettes à partir de ces échantillons a été réalisée au laboratoire de géotechnique, pour réaliser le test de compression simple, les échantillons de roche doivent être découpés afin d'obtenir des cylindres de dimensions uniformes à partir de chaque échantillon analysé, le découpage à l'aide d'une machine "CUTROCK", l'opération se fait à l'aide d'un disque diamanté destiné spécialement pour les roches et une raille métallique qui prend la roche à tailler pour faciliter l'avancement d'échantillon vers l'outil de découpage et pour conserver son alignement.

Le polissage indispensable de ces échantillons a été effectué afin d'obtenir des surfaces planes et parallèles.

Les tests ont été effectués dans le laboratoire de l'Institut des Mines à L'université Larbi Tebessi – Tébessa.



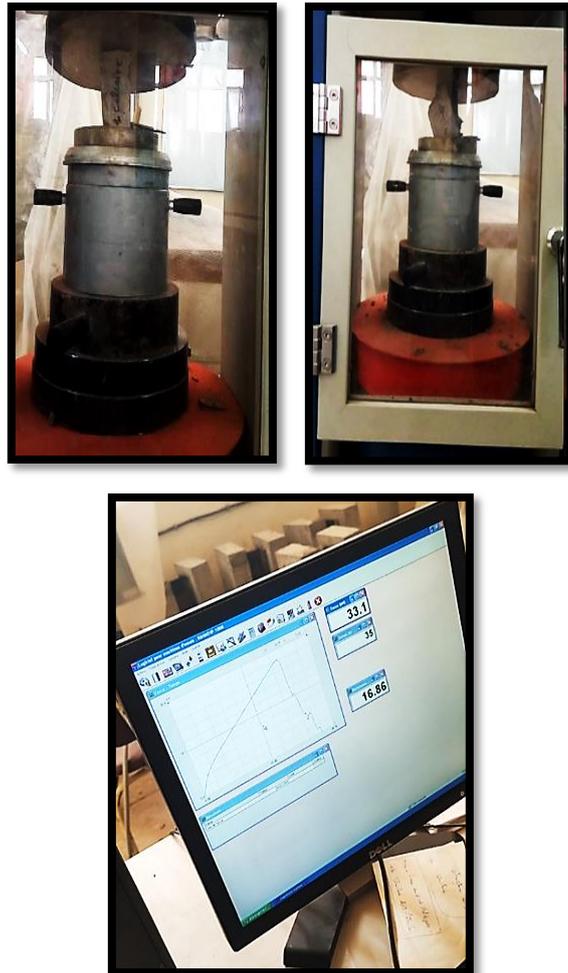


Figure 5 : Photo de l'essai de la résistance à la compression.

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

Les échantillons correspondent aux points topographiques et les résultats des essais sur eux indiqués dans le tableau suivant :

Tableau.2 : les résultats de l'essai de compression simple.

La nature de la roche	Point d'échantillonnage		Résistance à la Compression (MPa)	Moyenne de la résistance à la compression (MPa)
Conglomérat	Ech <sub>1</sub>	E+05m	9.14	10
	Ech <sub>2</sub>	E+15m	9.66	
	Ech <sub>3</sub>	E+25m	11.20	
Grès	Ech <sub>1</sub>	E+32m	29.89	30
	Ech <sub>2</sub>	E+36m	31.12	
	Ech <sub>3</sub>	E+38m	28.99	
Marne jaune	Ech <sub>1</sub>	E+42m	4.20	4
	Ech <sub>2</sub>	E+54m	4	
	Ech <sub>3</sub>	E+73m	3.80	
Marne minéralisé	Ech <sub>1</sub>	E+45.5m	19.63	20
	Ech <sub>2</sub>	E+59m	21.96	
	Ech <sub>3</sub>	E+63m	18.41	
Minerai de fer	Ech <sub>1</sub>	E+51.5m	45.01	44
	Ech <sub>2</sub>	E+67m	44.33	
	Ech <sub>3</sub>	E+82m	42.66	
Calcaire	Ech <sub>1</sub>	E+93m	89	90.07
	Ech <sub>2</sub>	E+95m	91.12	
	Ech <sub>3</sub>	E+99m	90.08	

En remarque une variabilité des résultats, souvent pendant que nous avons entrés dans la galerie la valeur de la résistance à la compression simple va augmenter.

La résistance à la compression du minerai de fer et du calcaire est loin plus grande que celle des autres roches étudiées dans ce travail.

b) **Le R.Q.D (Rock quality designation) :**

À partir d'un sondage carotté, d'un diamètre de l'ordre de 50 mm, le RQD est calculé sur la longueur de passe de sondage :

$$RQD = 100 * \frac{\sum \text{des longueurs de carottes de longueur } \geq 10 \text{ cm}}{\text{longueur de la passe de sondage}}$$

Tableau.3 : Tableau de R.Q.D.

RQD	Qualité de la masse rocheuse
90 - 100 %	Excellente
75 - 90 %	Bonne
50 - 75 %	Moyenne
25 - 50 %	Pauvre
< 25 %	Très pauvre

Classification de RQD du massif rocheux de djebel de Boukhadra :

. Tableau. 4 : RQD des différentes couches (Qualité de la masse rocheuse).

Les Roches	RQD %	Qualité de la masse rocheuse
Conglomérat	50	Moyenne
Grés	65	Moyenne
Marne jaune	55	Moyenne
Marne minéralisé	60	Moyenne
Minerai de fer	76	Bonne
Calcaire	78	Bonne

D'après l'analyse du paramètre RQD, on constate que le massif est formé principalement par cinq couches (marne jaune, conglomérat, marne minéralisée, calcaire et minerai de fer) dont la qualité varie de moyenne à bonne.

**c) L'espacement des joints :**

Les espacement appirent  $x_{app}$  mesuré le long d'une ligne d'observation son reliées aux espaement vrais  $x$  par l'expression suivants : [41]

$$X = X_{app} \cdot \cos \theta$$

$\theta$  : est l'angle entre la ligne.

L'observation et le pole moyen des discontinuité on définit la fréquence comme :

$$\lambda = \frac{1}{L} = \frac{1}{L_{app} \cdot \cos \theta}$$

L : la distance moyenne entre deux plans successif.

Le terme discontinuités reprend ici les joints, failles, stratifications et autres plans de faiblesse. À nouveau, Bieniawski s'inspire de la classification proposée par Deere.

Tableau.5 : L'espacement des joints. [8]

Description	Espacement	Etat du massif
Très large	> 3 m	Solide
Large	1 m à 3 m	Massif
Moyennement serrée	0.5 m à 1 m	A blocs
Serrée	50 mm à 0.5 m	Fracturé
Très serrée	< 50 mm	Ecrasé-broyé

**d) La nature des joints :**

Ce paramètre prend en considération l'ouverture des joints, leur continuité, leur rugosité et la présence éventuelle de matériaux de remplissage.

Tableau. 6 : La nature des joints. [8]

Classe	Nature des joints
1	Surfaces très rugueuses, non continues, épontes en contact, épontes non altérées.
2	Surfaces légèrement rugueuses, épaisseur < 1 mm, épontes non altérées.
3	Surfaces légèrement rugueuses, épaisseur < 1 mm, épontes altérées.
4	Surfaces lustrées ou remplissage < 5 mm ou joint ouvert de 1 à 5 mm joints continus.
5	Remplissage mou > 5 mm ou joints ouverts > 5 mm joints continus.

**e) Les venues d'eau :**

Des tentatives de prise en considération de l'influence de l'eau souterraine sur la stabilité des excavations, sont présentées sous diverses formes :

- Une mesure du débit d'eau entrant dans l'ouvrage ;
- Le rapport entre la pression d'eau dans les joints et la contrainte principale maximale ;
- Une observation qualitative des venues d'eau.

Tableau. 7 : Les venues d'eau. [8]

Classe	Venues d'eau
1	Débit 0 l/min, contrainte principale 0, complètement sec.
2	Débit 10 l/min, contrainte principale 0.1, humide.
3	Débit 10 à 25 l/min, contrainte principale 0.1 à 0.2, saturé.
4	Débit 25 à 125 l/min, contrainte principale 0.2 à 0.5, pression modérée.
5	Débit 125 l/min, contrainte principale > 0.5, problèmes sérieux.

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

Les paramètres à étudier avec leurs notes respectives pour l'analyse géomécanique le total des notes nous donnent le RMR du massif étudié, ont résumés dans le tableau suivant :

Tableau. 8 : Les paramètres de RMR.

Paramètres			Coefficients						
1	Résistance de La roche	Indice Franklin	> 8 MPa	4 - 8 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Indice Franklin non utilisable		
		Résistance à la compression	> 200 MPa	100 - 200 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	10-25 MPa	3-10 MPa	1-3 MPa
	note	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	note		20	17	13	8	3		
3	Espacement des joints		> 3 m	1 - 3 m	0.5 - 1 m	50 - 300 mm	< 50 M		
	note		30	25	20	10	5		
4	Nature des joints		Surfaces très rugueuses non continue	Surfaces légèrement rugueuses	Surfaces légèrement rugueuses	Surfaces lustrées ou remplissage < 5 mm ou joint ouvert 1 à 5 mm	Remplissage mou > 5 mm ou joints ouverts > 5 mm joints continus		
			Eponte en contact	Epaisseur < 1 mm	Epaisseur < 1 mm	joints continus			
note		25	20	12	6	0			
5	Venues d'eau	Débit sur 10 m	Aucune venue d'eau		< 25 l/min	25 - 125 l/min	> 25 l/min		
		Pression d'eau contrainte principale	0		0.0 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	Hydro-géologie	Complètement sec		Suintements (eau interstitielle)	Pression d'eau modérée	Problèmes sérieux de venues d'eau			
	note		10		7	4	0		

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

Classification RMR du massif rocheux de djebel de boukhadra :

- Classification RMR de la couche du conglomérat :

Tableau. 9 : Classification RMR de la couche du conglomérat.

Couche	Conglomérat					
Les paramètres	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	10	50	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Eponge altérées	0.3 – 1 m	Complètement sec	60
Valeurs extrêmes de la classification	10 - 25	50 - 75				
Note	2	13	10	20	15	

Joint orientation = - 5 alors RMR = 60 - 5 = 55.

- Classification RMR de la couche de grès :

Tableau. 10 : Classification RMR de la couche de grès.

Couche	Grès					
Les paramètres	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	30	65	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Eponge altérées	0.3 – 1 m	Complètement sec	62
Valeurs extrêmes de la classification	25 - 50	50 - 75				
Note	4	13	10	20	15	

Joint orientation = - 5 alors RMR = 60 - 5 = 57.

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

- Classification RMR de la couche de la marne jaune :

Tableau. 11 : Classification RMR de la couche de la marne jaune.

Couche	Marne jaune					
Les paramètres	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	4	55	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Epointe altérées	0.3 – 1 m	Complètement sec	59
Valeurs extrêmes de la classification	3 - 10	50 - 75				
Note	1	13	10	20	15	

Joint orientation = - 5 alors RMR = 59 - 5 = 54.

- Classification RMR de la couche de la marne minéralisé :

Tableau. 12 : Classification RMR de la couche de la marne minéralisé.

Couche	Marne minéralisé					
Les paramètres	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	20	60	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Epointe altérées	0.3 – 1 m	Complètement sec	60
Valeurs extrêmes de la classification	10 - 25	50 - 75				
Note	2	13	10	20	15	

Joint orientation = - 5 alors RMR = 60 - 5 = 55

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

- Classification RMR de la couche de minerai de fer :

Tableau. 13 : Classification RMR de la couche de minerai de fer.

Couche	Minerai de fer					
Les paramètres	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	44	76	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Eponte non altérées	0.3 – 1 m	Complètement sec	76
Valeurs extrêmes de la classification	25 - 50	75 - 90				
Note	4	17	20	20	15	

Joint orientation = - 5 alors RMR = 76 - 5 = 71

- Classification RMR de la couche du calcaire :

Tableau. 14 : Classification RMR de la couche du calcaire.

Couche	Calcaire					
Les paramètres	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de Base
Mesure	90.07	78	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1mm Eponte non altérées	0.3 – 1 m	Complètement sec	79
Valeurs extrêmes de la classification	50 - 75	75 - 90				
Note	7	17	20	20	15	

Joint orientation = - 5 alors RMR = 76 - 5 = 74

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

Tableau. 15 : Classification géomécanique Beniaowski, (1989). [2]

RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classe du rocher et Description	<b>1</b> Très bon rocher	<b>2</b> Bon rocher	<b>3</b> Rocher moyen	<b>4</b> Rocher médiocre	<b>5</b> Rocher très médiocre
Temps de tenue Moyen	10 ans pour 5 m de portée	6 mois pour 4 m de portée	1 semaine pour 3 m de portée	5 heures pour 1.5 m de portée	10mn pour 0.5 m de Portée

Tableau. 16 : Classification RMR du massif rocheux du Djebel de Boukhadra (Description du massif rocheux). [2]

Les couches	RMR	Classe du massif Rocheux	Description du massif rocheux
Conglomérat	55	3	Rocher moyen
Grés	57	3	Rocher moyen
Marne jaune	54	3	Rocher moyen
Marne minéralisé	55	3	Rocher moyen
Minerai de fer	71	2	Bon rocher
Calcaire	74	2	Bon rocher

D'après les résultats du RMR, on déduit que les couches du calcaire et de minerai de fer ont une bonne qualité et le temps de tenue moyen sans soutènement est 6 mois pour 4 m de portée. En revanche, les autres couches de marnes, le conglomérat et les grés sont de qualité moyenne et le temps de tenue moyen sans soutènement est 1 semaine pour 3 m de portée.

### 2.2. Classification géomécanique de Barton le Q système

Cette classification géomécanique est basée sur l'indice de qualité «Q», également appelé indice de qualité pour l'excavation de tunnels, rock mass quality ou Tunnelling Quality Index (système Q) ou tout simplement système du NGI en hommage de l'Institution Géotechnique Norvégienne. [4]

Ce paramètre nous donne une estimation de la qualité de la masse rocheuse en tenant compte des facteurs suivants :

$$Q = \frac{R.Q.D}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Tableau.17: Classification du massif rocheux par rapport à l'indice Q. [8]

Indice Q	Qualité de la masse rocheuse
0.001 – 0.01	Exceptionnellement pauvre
0.01 – 0.1	Extrêmement pauvre
0.1 – 1	Très pauvre
1 – 4	Pauvre
4 – 10	Moyenne
10 – 40	Bonne
40 – 100	Très bonne
100 – 400	Extrêmement bonne
≥ 400	Exceptionnellement bonne

Cette méthode utilise six paramètres pour déterminer la qualité pour l'excavation de tunnels :

- Indice RQD (Deere en 1964) : Rock Quality Designation ;
- Nombre de familles de joints (Jn) : Joint Set Number ;
- Indice de rugosité des joints (Jr), celle du plus faible plan de fissuration ;
- Indice de l'altération des joints (Ja), caractéristiques de ce dont les fissures sont remplies ;
- Facteur de réduction pour la présence d'eau dans les joints (Jw) ;
- Facteur de réduction pour les contraintes in situ (SRF).

b) Nombre de familles de joints (Jn) :

L'étude stéréographique du massif rocheux de Boukhadra à montre que ce massif est formé par trois familles de discontinuités avec présences de discontinuités secondaire.

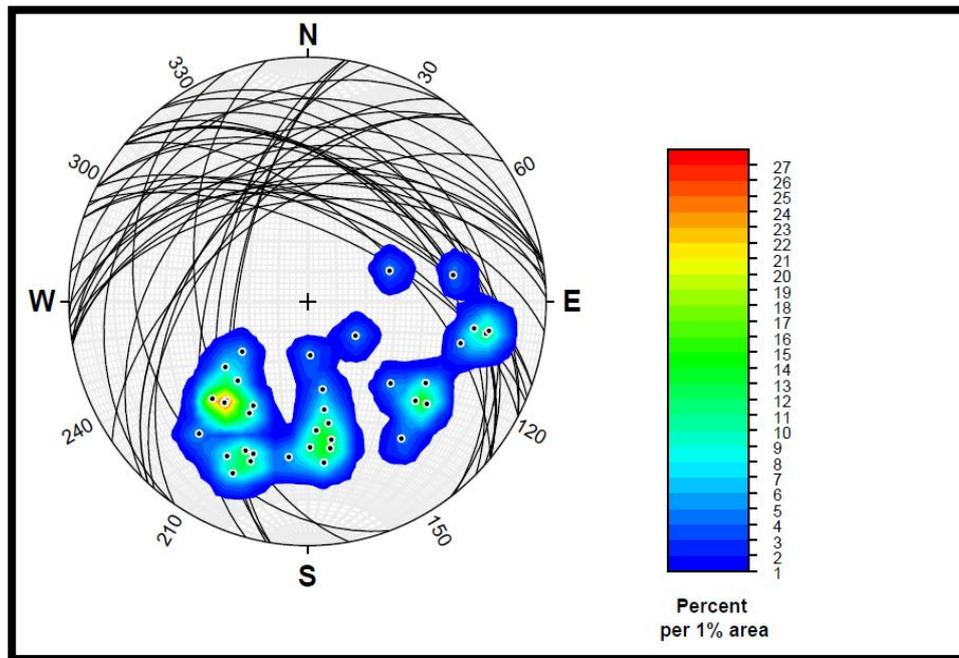


Figure 6 : Projection stéréographique des plans et des pôles.

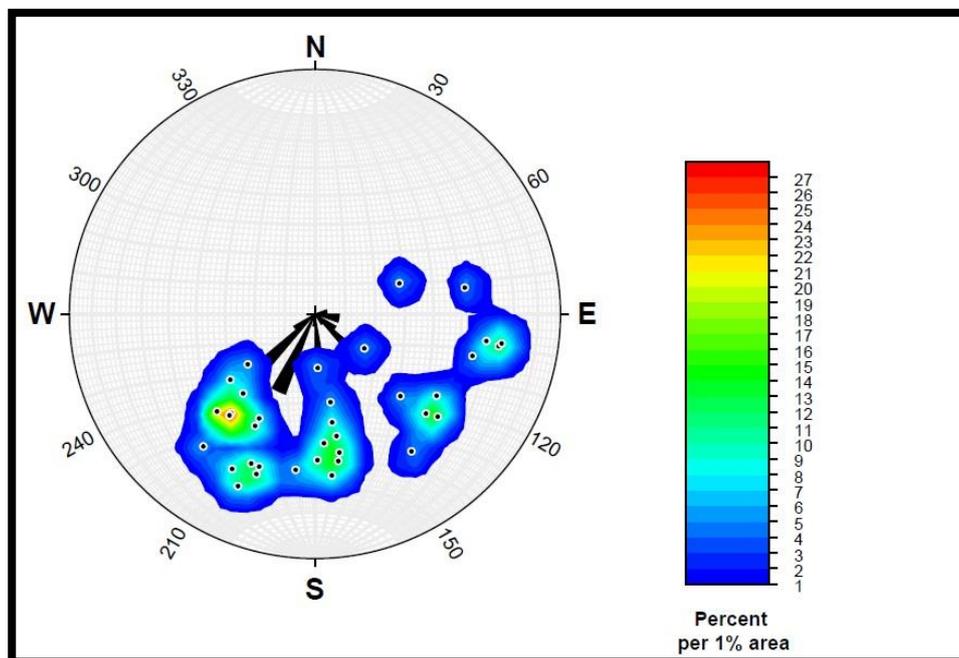


Figure 7 : Orientation des familles de discontinuités (Rosset diagramme).

Il existe trois familles majeures et une famille mineure de discontinuités :

- Une famille majeure : N130 Pendage de 42 ;
- Une famille majeure : N170 Pendage de 12 ;
- Une famille majeure : N220 Pendage de 39 ;
- Une famille mineure : N94 Pendage de 52.

Tableau. 18 : Paramètre de classification en fonction du nombre de familles jointes. [8]

Indice des familles de joints		Jn
A	Rocher massif, joints rares ou absents	0,5 - 1,0
B	Une famille de joints	2
C	Une famille + joints erratiques	3
D	Deux familles	4
E	Deux familles + joints erratiques	6
F	Trois familles	9
G	Trois familles + joints erratiques	12
H	Quatre familles ou plus, joints erratiques, fracturation très dense, "morceaux de sucre", etc...	15
J	Rocher broyé, meuble	20

c) Indice de rugosité des joints (Jr) :

Tableau. 19 : Paramètre de classification en fonction du facteur de rugosité. [8]

Indice de rugosité des joints		Jr
(a) Epontes en contact (b) Epontes en contact après cisaillement de moins de 10 cm		
A	Joints discontinus	4
B	Joints ondulés, rugueux ou irréguliers	3
C	Joints ondulés, lisses	2
D	Joints ondulés, striés (lisses, luisants, polis)	1,5
E	Joints plans, rugueux ou irréguliers	1,5
F	Joints plans, lisses	1,0
G	Joints plans, striés	0,5
(c) Epontes hors contact après cisaillement		
H	Zone argileuse d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact	1.0
J	Zone sableuse, graveleuse ou broyée d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact	1.0

d) Indice de l'altération des joints (Ja) :

Tableau. 20 : Paramètre de classification en fonction du facteur d'altération. [8]

Indice d'altération des joints		Ja	$\Phi_r$ approximatif
<b>(a) Epontes en contact</b>			
A	Joint serré, recimenté, remplissage dur, non- radoucissant, étanche (par ex. quartz ou épidote).	0.75	-
B	Epontes non altérées, taches superficielles seulement.	1.0	25°-35°
C	Epontes légèrement altérées, enduit sans minéraux argileux, mais avec des parties sableuses.	2.0	25°-30°
D	Enduit d'argile silteuse ou sableux faiblement argileux.	3.0	20°-25°
E	Enduit de minéraux faiblement frottant c'est-à-dire kaolinite, mica, gypse, chiante, talc, graphite... avec une petite quantité d'argiles gonflantes.	4.0	8°-16°
<b>(b) Epontes en contact après cisaillement de moins de 10cm</b>			
F	Roche désintégrée, avec des parties sableuses mais sans argile.	4.0	25°-30°
G	Remplissage argileux fortement sur consolidé	6.0	16°-24°
H	Remplissage argileux faiblement à moyennement sur-consolidé.	8.0	8°-16°
J	Remplissage argileux avec minéraux gonflants ex montmorillonite, la valeur de Ja dépend du pourcentage de minéraux expansifs et des conditions d'hydratation.	8.0-12.0	6°-12°
<b>(c) Epontes hors contact après cisaillement</b>			
K, L,M	Zones ou bandes de roche désintégrée ou broyée avec des conditions d'argile identiques aux cas G, H et I.	6.0 8.0	-
N	Zones ou bandes de matériau silteux, ou sableux avec une faible teneur en argile.	5.0	25°-35°
O,P, R	Zones ou bandes de matériau argileux épaisses avec des conditions sur les minéraux argileux identiques aux cas G, H et I.	10.0 -13.0 ou 13.0 -20.0	6°-24°

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

e) Facteur de réduction pour la présence d'eau dans les joints ( $J_w$ ) :

Tableau. 21 : Paramètres de classification en fonction du facteur de réduction de la présence d'eau. [8]

Influence de l'eau en charge		$J_w$	Pression d'eau approximative ( $\text{kg/cm}^2$ )
A	Excavation à sec ou faibles venues d'eau ( $< 5 \text{ l/mn}$ localement).	1	$< 1$
B	Venues d'eau ou pressions faibles, déboursage occasionnel au droit d'un joint.	0.66	1 – 2.5
C	Fortes venues d'eau ou pression importante dans du rocher de bonne tenue à joints sans remplissage.	0.50	2.5 – 10
D	Fortes venues d'eau ou pression importante, déboussages fréquents.	0.33	2.5 – 10
E	Très fortes venues d'eau lors des tirages, demi-ruant ensuite avec le temps.	0.1 – 0.2	$> 10$
F	Très fortes venues d'eau ou pressions très importantes sans réduction notable avec le temps.	0.05 – 0.10	$> 10$

f) Facteur de réduction pour les contraintes in situ (SRF) :

Tableau. 22 : Paramètre de classification en fonction du facteur de réduction des contraintes, SRF. [8]

(a) Ouvrage recoupant des zones de faiblesse provoquant la décompression du rocher lors du percement		SRF
A	Zones de faiblesse fréquentes, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement ; rocher environnant très décomprimé (toutes profondeurs).	10.0
B	Zones de faiblesse individuelles, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement (prof. de l'excavation $\leq 50 \text{ m}$ ).	5.0
C	Zones de faiblesse individuelles, contenant de l'argile ou du rocher décomposé chimiquement (prof. de l'excavation $> 50 \text{ m}$ ).	2.5
D	Nombreuses zones de cisaillement en rocher sain, sans argile ; rocher environnant décomprimé (toutes profondeurs).	7.5
E	Zones de cisaillement individuelles en rocher sain, sans argile (prof. de l'excavation $\leq 50 \text{ m}$ ).	5.0
F	Zones de cisaillement individuelles en rocher rigide, sans argile (prof. de l'excavation $> 50 \text{ m}$ ).	2.5
G	Joints ouverts, rocher très fracturé et décomprimé, "morceaux de sucre", etc... (toutes profondeurs).	5.0

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

Tableau. 23 : Paramètre de classification en fonction du facteur de réduction des contraintes, SRF. [8]

<b>(b) Rocher sain, problèmes de contraintes in situ</b>		<b>Rc/σ1</b>	<b>Rt/σ1</b>	<b>SRF</b>
H	Contraintes faibles, excavation peu profonde.	> 200	> 13	2.5
J	Contraintes moyennes.	200 - 10	13 - 0.66	1.0
K	Contraintes importantes, structure très ser-réa (condition normalement favorable à la stabilité mais peut être défavorable à la tenue des piédroits).	10 - 5	0.66 - 0.33	0.5 - 2
L	('welques' "coups de toit") (rocher massif).	5 - 2.5	0.33 - 0.16	5 - 10
M	"Coups de toit" importants (rocher massif).	< 2.5	< 0.16	10 - 20
<b>(c) Rocher "poussant" (déformation plastique du rocher sous l'action de fortes contraintes naturelles)</b>				<b>SRF</b>
N	Rocher "poussant" à moyenne pression.			5 - 10
O	Rocher "poussant" à forte pression.			10 - 20
<b>(d) Rocher gonflant (action chimique en fonction de la présence d'eau)</b>				<b>SRF</b>
P	Pressions de gonflement moyennes.			5 - 10
O	Pressions de gonflement importantes.			10 - 15

Les valeurs des différents paramètres de cette classification, ainsi que des notes explicatives supplémentaires permettant d'évaluer ceux-ci plus adéquatement dans le tableaux suivante :

Tableau. 24 : Classification Q système du massif rocheux du Djebel de Boukhadra.

Les paramètres	Conglomérat	Grés	Marne jaune	Marne minéralisé	Minerai de fer	Calcaire
RQD	50	65	55	60	76	78
Jn	6	6	6	6	6	6
Jr	0.5	0.5	0.5	3	3	4
Ja	4	4	4	0.75	0.75	0.75
Jw	1	1	1	1	1	1
SRF	5	5	10	2.5	2.5	2.5
Q	0.2	0.27	0.11	16	20	27
Qualité du massif rocheux	Très pauvre	Très pauvre	Très pauvre	Bonne	Bonne	Bonne

Afin de relier l'indice de qualité Q de la galerie au comportement et au besoin de soutènement d'un massif rocheux, une relation appelée Dimension Equivalente «De» de l'excavation a été développée. Cette relation est obtenue en divisant la largeur, le diamètre

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

ou la hauteur de l'excavation par un facteur appelé rapport de support d'excavation (ESR) ou appelé dimension équivalente de l'excavation.

Après avoir défini la valeur de l'indice  $Q$  représentatif de la qualité du massif, Barton a introduit un paramètre supplémentaire  $De$  :

$$De = \frac{\text{longueur ; diamètre ou hauteur de l'excavation (en m)}}{ESR}$$

Avec ESR (Excavation Support Ratio) étant un facteur dépendant de la finalité de l'excavation, autrement dit, du degré de sécurité recherché pour la stabilité. [8]

Le tableau suivant présente les valeurs recommandées pour l'ESR mises à jour par Grimstald et Barton (1993).

Tableau. 25 : Paramètre de classification selon l'indice ESR. [8]

Types d'excavation		ESR
A	Ouvertures temporaires dans les mines.	3.5
B	Ouverture permanentes dans les mines, conduites forcées pour usines hydroélectriques, galerie pilotes pour grandes excavations.	1.6
C	Chambre de stockage, tunnels routiers et ferroviaires d'importance mineure, tunnels d'accès, Cheminées d'équilibre.	1.3
D	Centrales électriques, tunnels routiers et ferroviaires d'importance majeure, abris souterrains de galeries.	1.0
E	Centrales nucléaires souterraines, aménagement sportifs et publics, entreprises.	0.5 - 0.8

$$De = \frac{3 \text{ m}}{1.6} = 1.87$$

Avec le calcul de la dimension équivalente et de l'indice  $Q$ , on procède à la détermination des caractéristiques du soutènement à partir du graphe d'estimation du support proposé par Grimstald et Barton (1993).

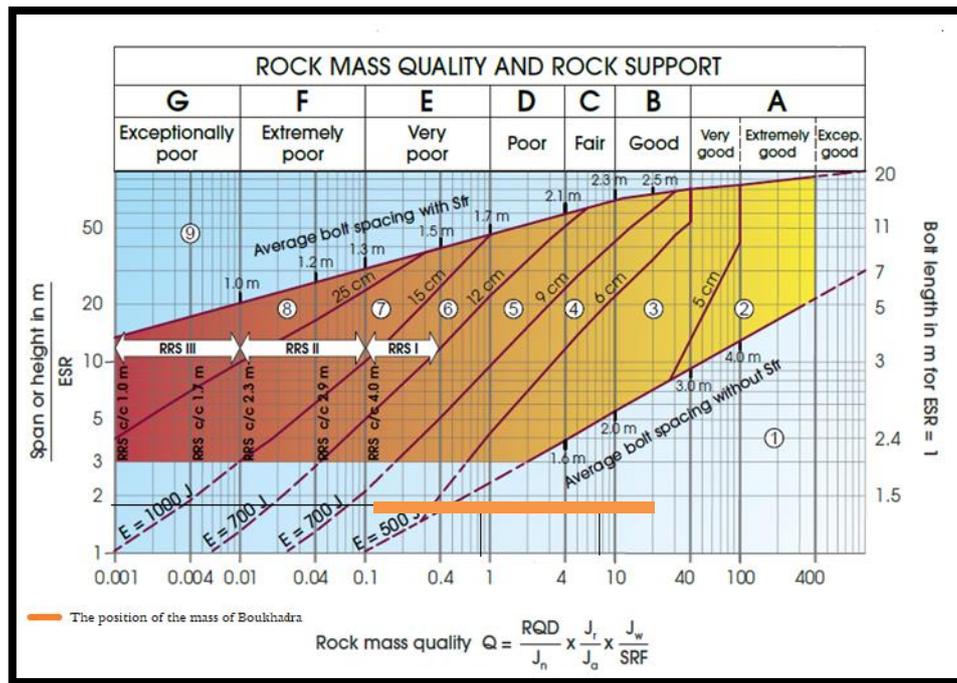


Figure 8 : Limitations dans le diagramme de support rocheux Q système.

L'application de Q système à les formations de massif rocheux de Boukhadra, classifié ce massif à deux qualités majeures, très pauvre qualité et bonne qualité,

Le RQD est entre 50 de conglomérat à 78 de calcaire.

Le nombre de famille est deux familles pour tous les facies

En prenant la valeur de la rugosité des joints 0,5 pour les conglomérats, les marnes jaunes, les grès, et la valeur 3 pour le minerai de fer et les marnes minéralisés et le valeur 4 pour les calcaires.

En prenant la valeur de l'altération des joints 4 pour les conglomérats, les marnes jaunes, les grès et la valeur 0,75 pour le minerai de fer, les marnes minéralisées et les calcaires.

L'absence de l'eau permet de prendre la valeur 1 pour le Jw pour toutes les formations

En prenant le SRF entre 2,5 de calcaire et 10 de marne jaune.

Les formations de bonne qualité sont : les calcaires, les marnes minéralisées, le minerai de fer.

Les formations de très pauvre qualité sont : les marnes jaunes, les conglomérats, les grès.

Les valeurs de Q allant de 0.11 à 27 sort du domaine de performance de cette méthode de classification pour le choix du soutènement adéquat comme le montre la figure 34.

### 2.3. Méthode de H. LAUFFER

H. LAUFFER, en 1958, apporta une amélioration importante à ce type de méthode (Fig. 35). La classification du terrain qu'il propose considère deux paramètres fondamentaux pour la conception d'un ouvrage souterrain, à savoir :

- La portée active, c'est-à-dire la plus petite des longueurs suivantes que l'on peut laisser sans soutènement :
  - Soit la dimension maximale de l'excavation ;
  - Soit la distance entre le front de taille et le soutènement ;
- Le temps de tenue du terrain sur cette portée.

Dans l'application pratique, H. LAUFFER se basait sur des observations qualitatives, généralement faites en galerie de reconnaissance, afin d'extrapoler les résultats aux dimensions de l'ouvrage projeté. [8]

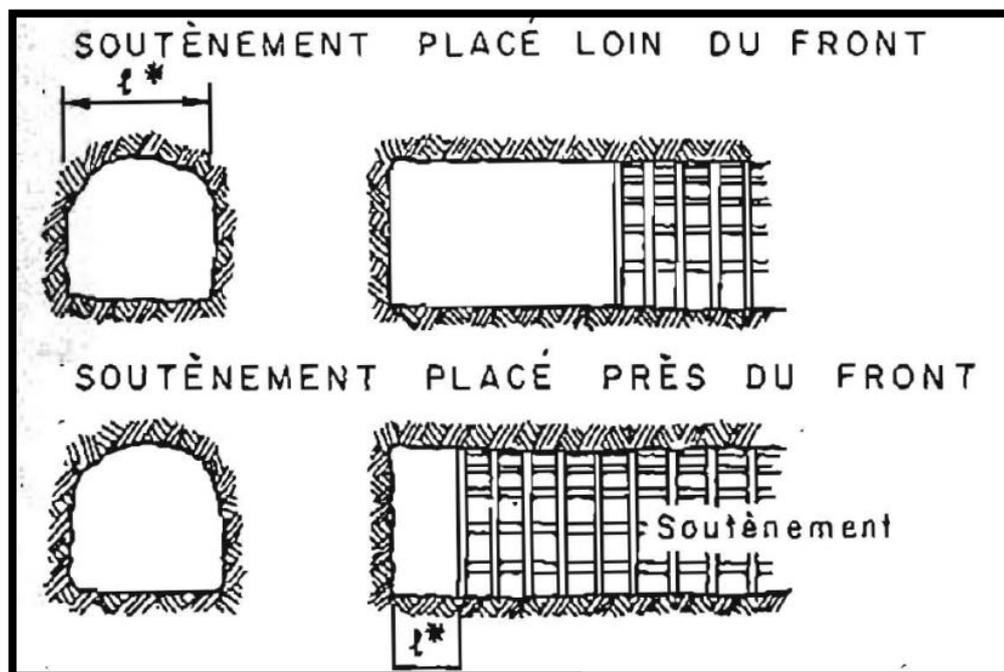


Figure 9 : Longueur libre ou portée critique : diamètre ou longueur de la galerie qui peut être maintenu stable sans revêtement. [8]

Le paramètre le plus utilisé est le R.O.D.

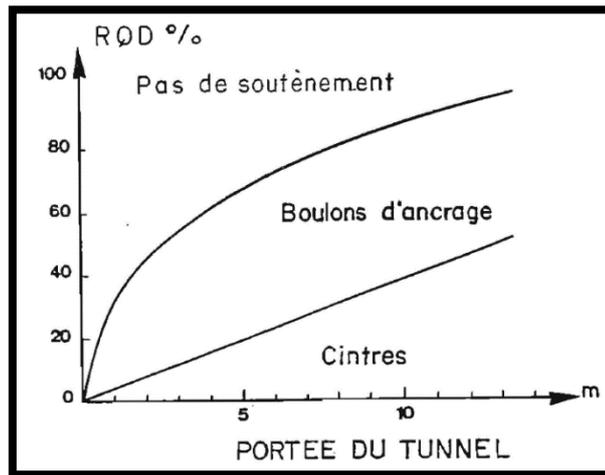


Figure 10 : Type de soutènement en fonction du R. Q.O. et de la portée du tunnel. [8]

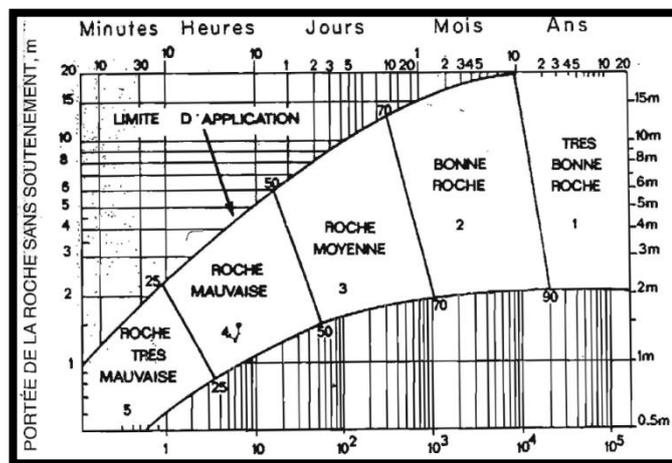


Figure 11 : Temps de tenue en heures. [8]

D'après la classification de H. LAUFFER, on déduit que les couches du calcaire et de minéral de fer ont une bonne qualité et le temps de tenue sans soutènement est 6 à 10 mois pour 2 à 15 m de portée (boulons d'ancrage ou pas de soutènement). En revanche, les autres couches de marnes, le conglomérat et les grès sont de qualité moyenne et le temps de tenue moyen sans soutènement est quelque jours à 1 semaine pour 2,5 à 13 m de portée.

### 3. Soutènement des galeries minières

Pour assurer la sécurité des travaux, le soutènement d'un ouvrage doit être opportun, stable et avoir la forme correspondant aux conditions de la gîte des roches et à la forme choisie de section de l'ouvrage.

## Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Boukhadra

---

Le soutènement est réalisé après l'évacuation du déblai et après l'égalisation à la pioche ou au marteau piqueur des parois, de la sole et de la couronne de l'ouvrage.

Lors du choix d'un soutènement, il faut tenir compte de la grandeur de la pression et de sa direction qui peut se manifester du haut, des cotes et du bas. En présence de pression du bas, les roches sont expulsées dans l'ouvrage du côté de la sole.

Nous avons faire le soutènement pour :

- Aide le massif à l'obtenir son nouvel état d'équilibre.
- Supporté l'ouvrage pour résister la pression des terrains qui causé par la pesanteur.
- Créé une stabilité admissible pour le travail, et éviter les éboulements.
- Sécurisé le travail.

### ✓ Critères de choix de soutènement

Le principe est de décrire de manière détaillée le massif au sein duquel est creusé l'ouvrage et de déterminer à partir de cette description la classe de soutènement adéquate. L'A.F.T.E.S. a également établi (1976) des recommandations relatives au "choix du type de soutènement en galerie".

Il est important de souligner que le principal intérêt de ces classifications est de contraindre le projeteur à une description exhaustive et quantitative du massif encaissant, mais que, en ce qui concerne le choix du soutènement, il faut savoir les utiliser avec discernement et être conscient des limites propres à chacune de ces classifications. En effet, d'autres considérations (économiques, propres au site et à l'environnement, liées à la méthode d'excavation ou au phasage...) peuvent avoir leur mot à dire sur le choix définitif.

#### - Proposition de soutènement de la galerie de base

La nature sédimentaire du terrain étudié fait qu'il existe une anisotropie très marquée liée à leur dépôt, cette anisotropie caractérisant donc la matrice rocheuse, est souvent désignée par des joints de stratification qui forment des plans de glissement naturels.

L'étude stéréographique du massif rocheux de Boukhadra au niveau 1045m, à montre que ce massif est formé par trois famille majeurs de discontinuités et une famille mineur de discontinuités, avec présences de discontinuités diffusé.

L'ouvrages de niveau 1045m de la mine souterraine de Boukhadra nécessite un soutènement imidiate par cintre métallique parce que :

- Les formation rocheux de massive est très hiterogènes et friable.
- Les galeries disposé dans la zone de broyage.

### Synthèse :

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

Le but des systèmes des classifications consiste à combiner les informations structurées des roches, de manière à fournir des estimations quantitative et qualitative sur la situation de massifs et la méthode de creusement optimale et le type de soutènement adéquat.

À partir de la projection stériographie Il existe trois familles majeures et une famille mineure de discontinuités.

Les discontinuités dans la mine souterraine de Boukhadra peuvent être d'origine tectonique (failles, fractures) ou stratigraphique ou peuvent également résulter d'effets arrière de tirs précédents, à cause du mauvais plan de tir ce qui provoque agrandir la taille de la voute.

D'après l'analyse du paramètre RQD, on constate que le massif est formé principalement par six couches (marne jaune, conglomérat, grès, marne minéralisée, calcaire et minerai de fer) dont la qualité varie de moyenne à bonne.

D'après les résultats du RMR, on déduit que les couches du calcaire et de minerai de fer ont une bonne qualité et le temps de tenue moyen sans soutènement est 6 mois pour 4 m de portée. En revanche, les autres couches de marnes, le conglomérat et les grés sont de qualité moyenne et le temps de tenue moyen sans soutènement est 1 semaine pour 3 m de portée. Le soutènement proposé par cette méthode c'est l'ancrage ponctuel.

D'après les résultats du  $Q_{\text{système}}$ , on déduit que les couches du calcaire et de minerai de fer et de marne minéralisé ont une bonne qualité. En revanche, les autres couches de marnes et les grés et les conglomérats sont des très pauvre qualité. Les valeurs de  $Q$  allant de 0.11 à 27 sort du domaine de performance de cette méthode de classification pour le choix du soutènement adéquat.

L'ouvrages de niveau 1045m de la mine souterraine de Boukhadra nécessite un soutènement imidiate par cintre métallique parce que :

- Les formation rocheux de massive est très hiterogènes et friable.
- Les galeries disposé dans la zone de broyage.

*Choix de technique de  
creusement des formations  
rocheuses hétérogènes*

### Introduction

L'excavation des matériaux dans les travaux souterrains peut se faire soit à l'aide d'engins mécaniques puissants, soit grâce à l'utilisation d'explosif. Quand les terrains ont une dureté assez importante et une cohésion suffisante, les explosifs peuvent être employés. Cette méthode présente l'avantage d'obtenir un meilleur avancement en comparaison aux techniques mécaniques. L'utilisation des explosifs est soumise à une réglementation stricte pour la sécurité des travailleurs et pour l'environnement du chantier.

Dans les conditions de Boukhadra l'abattage mécanique est techniquement non faisable et économiquement non rentable parce que :

- Les formations rocheuses sont très hétérogènes ;
- Un massif présentant une tectonique très marquée ;
- Section des ouvrages limitée ;
- Les coûts des équipements d'abattage (très cher).

Actuellement, le creusement à l'explosif des ouvrages horizontaux dans les conditions de la mine souterraine de Boukhadra est la seule initiative avec un inconvénient d'utilisation d'un même plan de tir pour tous les faciès (calcaire, fer, marne, grès ...).

Dans notre travail nous allons essayer de faire une critique sur les travaux de creusement de la galerie de base du niveau 1045m. Figure 1

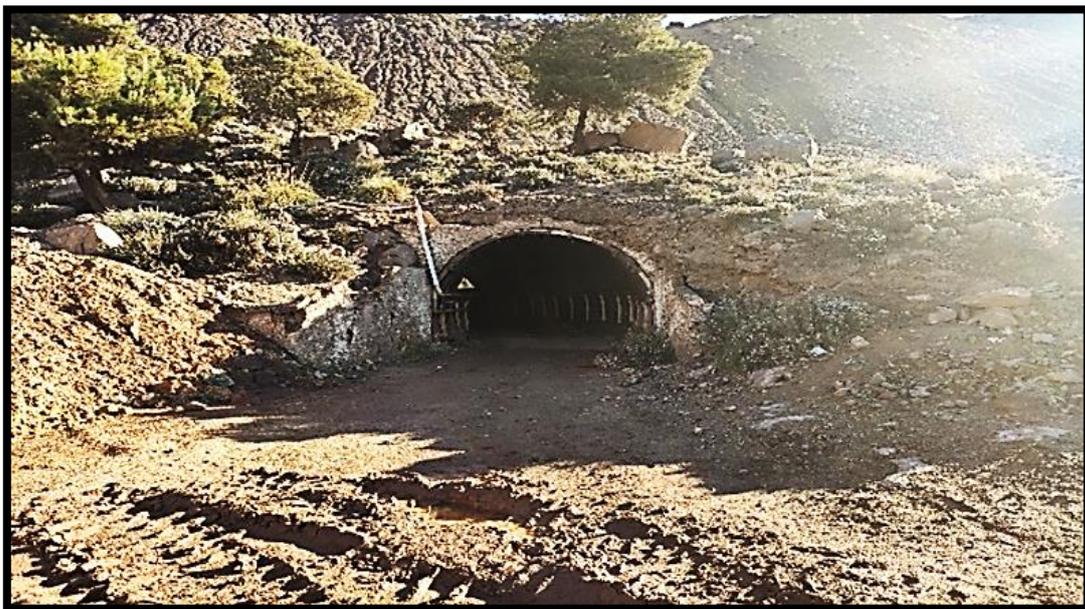


Figure 1 : Galerie au jour de niveau 1045 axe Nord.

## 1. Dimensions de la galerie de base 1045m

La section des ouvrages miniers au niveau d'exploitation (1045m) dépend du gabarit des engins de forage, chargement et transport (chariot de foration, chargeuse transporteuse, camion navette). [7]

- La largeur maximale des engins ; Longueur de chargeuse : 2,49m.
- La hauteur maximale des engins ; Hauteur de chargeuse : 2,33m.

Tableau. 1 : Les paramètres dimensionnels d'ouvrage souterrain.

Paramètres	Valeurs	Unités
Largeur moyenne	4.5	m
Hauteur moyenne	3	m
Longueur	100	m
Section	13 - 12	m <sup>2</sup>

Tableau. 2 : Les orientations d'ouvrage.

Paramètres		Galerie	Recoupes
Orientation	Direction (Azymite)	N55°	N345°
	Pendage	0° (Horizontale)	
Soutènement		Cintre métallique	
Longueur		100m	10m + 10m + 37m

## 2. Le profil en long de la galerie de base :

Au cours de notre stage pratique dans la mine de fer de Boukhadra, nous avons récolté tous les données géométriques et structurales concernant cette galerie. La figure 37 présente le profil en long de la galerie ainsi que les différents faciès géologiques qu'elle découpe.

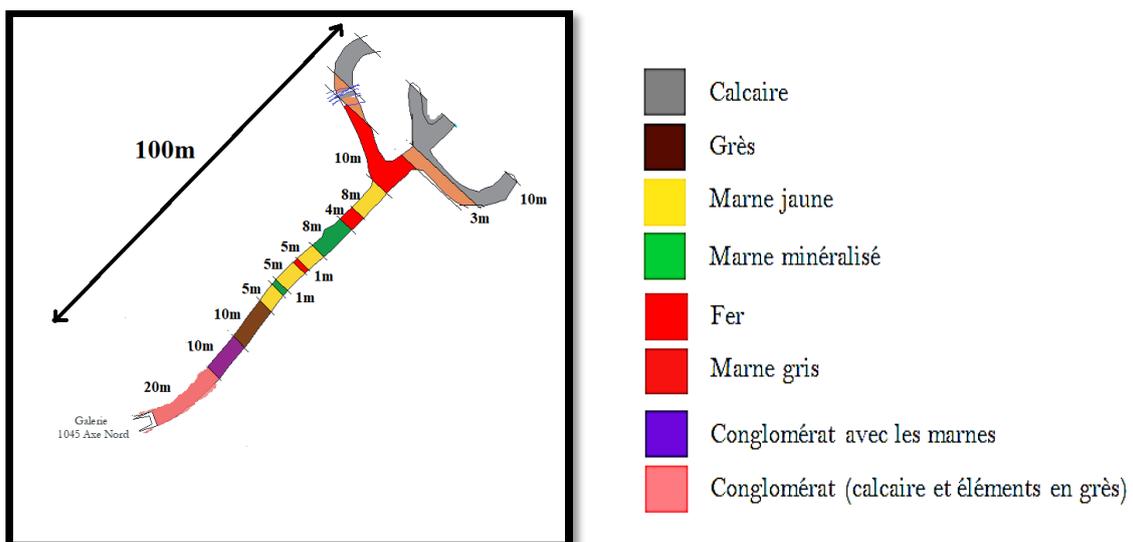


Figure 2 : division de l'ouvrage de la 4<sup>ème</sup> phase.

## 3. Méthode de creusement actuelle dans les conditions de la mine de Boukhadra

### 3.1. Le plan de tir actuel de Boukhadra

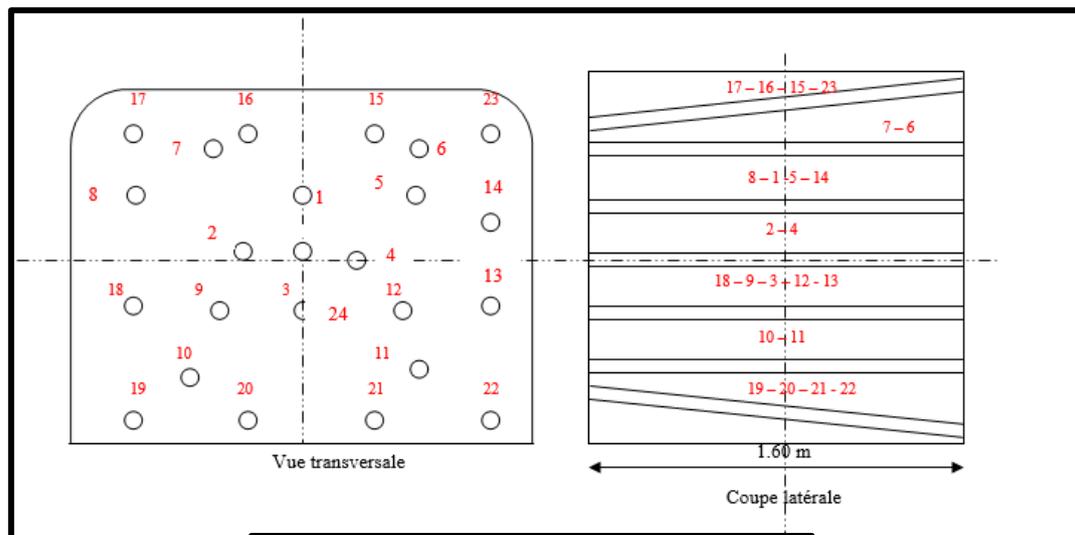
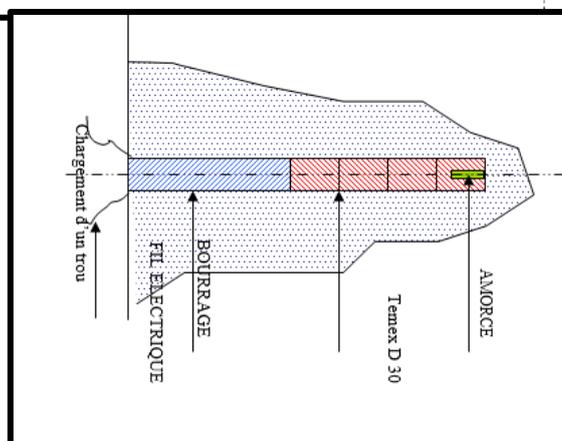


Figure 3 : Plan de tir [37]



actuel de Boukhadra.

Figure 4 : Chargement des trous de Boukhadra ; [37]

#### - Les trous de bouchon

Dans le minage souterrain, le principe est de créer une surface libre. Pour cela, une technique de forer des trous vides non-chargés appelés bouchon est mise en exécution.

Le choix du bouchon dépend des attentes de minage, mais dans la plupart des cas, le bouchon à trou parallèle permet d'avoir un avancement maximum. Il est constitué d'un ou plusieurs gros trous non chargés qui jouent le rôle de la face libre. [7]

### - Trous de bouchon en coin et pyramidaux

Dans ce type de trous on cherche à concentrer des charges au centre de la volée.

Les bouchons en coin sont utilisés lors de creusement des excavations de section  $> 6\text{m}^2$  et largeur  $< 2,5\text{m}$  dans les roches Lomagne.

Les trous de bouchon pyramidaux sont utilisés lors de creusement des excavations de section  $> 8\text{m}^2$  dans les roches dures et mi dures. [7]

### - Trous d'abattage

Sont disposés perpendiculairement au front de taille, la distance minimale entre les trous d'abattage et ceux de bouchon dépend de la dureté des roches. [7]

### - Trous de contour

Sont creusés avec une inclinaison de  $70^\circ$  à  $80^\circ$ . [7]

### Dans la mine de Boukhadra utilise :

- ✓ La distance entre les trous d'abattage  $0,70\text{ m}$  ;
- ✓ Une inclinaison de  $80^\circ$  pour les trous de contour.
- ✓ Dans notre cas il n'y a pas de trou de bouchon.

Les paramètres du plan de foration des trous sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau. 3 : Les paramètres du plan de foration Boukhadra.

Désignation	Valeur	Unité
Dureté de la roche creusée	4-8	/
Nombre de trous de bouchent	4	Trous
Nombre de trous d'abattage	8	Trous
Nombre de trous de contour	12	Trous
Angle d'inclinaison des trous	60 - 80	Degré
Distance entre les trous	0.7	Mètre
Section de la galerie	12	$\text{m}^2$

Selon le plan de foration des trous on fait un autre plan de tir qui est adapté avec les paramètres des différents trous, le tableau suivant montre les principaux paramètres des trous et des charges.

Tableau. 4 : Les paramètres des trous et des charges.

Désignation	Valeur	Unité
Longueur des trous	1.6	m
Angle d'inclinaison des trous	75	Degré
Plan horizontal	75	Degré
Plan vertical	75	Degré
Longueur des charges	1.2	m
Longueur de bourrage	0.4	m

Tableau. 5 : L'abattage des trous de mine.

Paramètre	Valeur	Unité
Type d'explosif	TEMEX	/
Densité	1220	g/cm <sup>3</sup>
Diamètre de cartouche	30	mm
Longueur de cartouche	300	Mm
Quantité d'explosif	21.5	Kg
Nombre d'ouvriers chargeant des trous	4	Ouvriers

### 4. Proposition de nouveaux plans de tir pour chaque faciès

#### 4.1. Paramètre de creusement

##### 4.1.1. Largeur nette de l'excavation $B_n$

$$B_n = m + A + n ; (m)$$

Où :

$m$  : distance entre le matériel roulant et soutènement ; dans notre cas on le prend  $m = 0.5m$  ;

$A$  : largeur de chargeuse ;  $A = 2.49m$  ;

$n$  : largeur du passage du personnel ;  $n = 1.5m$ .

##### 4.1.2. L'arc axial de la voûte $R$

$$R = 0.692 \times B_n ; (m)$$

##### 4.1.3. Les arcs latéraux $r$ :

$$r = 0.262 B_n ; (m)$$

##### 4.1.4. La hauteur de l'excavation $H_{ex}$

$$H_{ex} = H_p + H_v ; (m)$$

$H_p$  = hauteur du pied droit à partir de sol jusqu'à la naissance de la voûte ;  $H_p = 1.6 m$  ;

$H_v$  : la hauteur de la voûte ;  $H_v = 1.5 m$  ;

Où :

$f$  : coefficient tenant compte de dureté de la roche :

$$\text{Si : } f < 3 \text{ alors : } H_v = \frac{B_n}{2}$$

$$\text{Si : } f \geq 3 \text{ alors : } H_v = \frac{B_n}{3}$$

Dans notre cas, la dureté des chaque roches est supérieure ou égale à 3.

##### 4.1.5. La section de l'excavation $S_n$

$$S_n = B_n (H_p + 0.26 \times B_n) ; (m^2)$$

Où :

$B_n$  : largeur nette de l'excavation ; (m)

### 4.1.6. La section de creusement $S_{cr}$

$$S_{cr} = (1.03 \div 1.05) \times S_n ; (m^2)$$

### 4.1.7. Périmètre de l'excavation P

$$P = 2 \times H_p + 2,33 \times B_n ; (m)$$

## 4.2. Travaux de forage et de tir horizontaux

### 4.2.1. Volume à abattre par une volée $V_{ab}$

$$V_{ab} = S \times L_{tr} \times m_t ; (m^3)$$

$L_{tr}$  : longueur de trou ;  $L_{tr} = 1.6m$  ;

$m_t$  : coefficient d'utilisation qui est égale à 0,8 ;

### 4.2.2. La longueur d'avancement $L_{av}$

Après la détermination de la profondeur des trous de mine ; ont déterminé l'avancement du cycle de la taille de l'excavation selon la formule suivante :

$$L_{av} = L_{tr} \times n ; (m)$$

Avec :

$n$  : coefficient d'utilisation du trou ;  $n = (0,8 \text{ à } 0,9)$  ;

$L_{tr}$  : longueur du trou ;  $L_{tr} = 1.6 m$  ;

### 4.2.3. Consommation spécifique d'explosif q

Ont déterminé la selon la formule suivante :

$$q = q_e \times f_t \times v \times e ; (kg/m^3)$$

D'où :

$q_e$  : consommation spécifique étalon de l'explosif ;  $q_e = 0,1F$  ;  $q_e = 0,6 - 0,8 \text{ kg } /m^3$  ;

F = la dureté ;

$f_t$  : coefficient tenant compte de la structure des roches ; il est pris du tableau suivant :

Tableau.6 : Coefficient de dureté en fonction des caractéristiques de la roche.

Caractéristiques des roches	Coefficient $f_t$
Roches élastiques ; poreuses	2
Roches fissurées ; Roches schistiques disloquées.	1.4
Roches schistiques dont les plans de stratification sont perpendiculaires à l'axe des trous.	1.3
Roches cassantes sans fissureté	1.1
Roches dures et homogènes	0.8

Le massif rocheux de Boukhadra est un ensemble des roches fissurées alors ;  $f_t = 1.4$  ;

$v$  : coefficient tenant compte des surfaces libres autour de la charge à exploser et aussi de la section de l'ouvrage ;

$$v = \frac{6.5}{\sqrt{(Scr)}}$$

$e$  : coefficient d'aptitude au travail de l'explosif ;  $e = 0,8$  ;

#### 4.2.4. Nombre des trous de mine $N_{tr}$

Le nombre des trous de mine est un facteur de la section de creusement de la section de l'excavation. Le nombre de trous augmente quand la section de creusement est grande ; donc on déterminé le nombre des trous de mine par la formule suivante :

$$N_{tr} = \frac{Scr \times q}{0.785 \times d_c^2 \times \Delta \times K_r} ; \text{trous}$$

$S_{cr}$  : section de creusement de l'ouvrage ;  $S_{cr} = 12.69m^2$  ;

$d_c$  : diamètre de la cartouche ;  $d_c = 30 \text{ mm}$  ;

$\Delta$  : la densité de l'explosif ;  $\Delta = 1220 \text{ Kg/m}^3 = 1.22 \text{ g/cm}^3$  ;

$K_r$  : le coefficient de remplissage du trou de mine ;  $K_r = 0,75$  ;

$q$  : consommation spécifique d'explosif ;

#### - Répartitions des trous

Le nombre de trou de mine étant calculé ; on divise tous les trous de mine selon le rapport suivant :

- Trou de bouchon : 0,6
- Trou d'abattage : 1,0
- Trou de contour : 1,6

$$R = 0.6 + 1 + 1.6 = 3.2$$

Le nombre de chaque type de trou de mine est égal :

- Trou de bouchon :

$$N_b = \frac{N_{tr} \cdot 0.6}{3.2} ; \text{trous}$$

- Trou d'abattage :

$$N_{ab} = \frac{N_{tr} \cdot 1}{3.2} ; \text{trous}$$

- Trou de contour :

$$N_c = \frac{N_{tr} \cdot 1.6}{3.2} ; \text{trous}$$

### 4.2.5. Longueur totale des trous de mine

$$L_{tot} = N_{tr} \cdot L_{tr} ; (\text{m})$$

### 4.2.6. Charge totale d'explosif

$$Q = 0,785 \times D_c^2 \times \Delta \times K_{ch} \times L_{tot} ; (\text{Kg})$$

$K_{ch}$  = coefficient de charge ;  $K_{ch} = 0.65$  ;

$\Delta$  = densité d'explosif ;  $\Delta = 1220 \text{ g/cm}^3$  ;

$D_c$  = diamètre de cartouche ;  $D_c = 30\text{mm}$ .

### 4.2.7. Consommation moyenne d'explosif par un trou $q_m$

$$q_m = \frac{Q}{N_{tr}} ; (\text{kg})$$

- Dans le cas de trous de bouchon chargé

#### a) Charge des trous de bouchon

$$q_b = (1.1 \text{ à } 1.2) \times q_m ; (\text{kg})$$

#### b) Charge des trous d'abattage

$$q_{ab} = 1 \times q_m ; (\text{kg})$$

#### c) Charge des trous de contour

$$q_{cont} = (0,8 \text{ à } 0,9) \times q_m ; (\text{kg})$$

### 4.2.8. Nombre de cartouche dans chaque type de trous

#### a) Nombre de cartouches pour les trous de bouchons $N_{cb}$

$$N_{cb} = \frac{q_b}{p_c} ; \text{ cartouches}$$

$p_c$  = poids de cartouche d'explosif TEMEX ;  $p_c = 0.25\text{kg}$  ;

$q_b$  = charge de trou de bouchon ;

#### b) Nombre de cartouches pour les trous d'abattage $N_{cab}$

$$N_{cab} = \frac{q_{ab}}{p_c} ; \text{ cartouches}$$

$q_{ab}$  = charge de trou d'abattage ;

#### c) Nombre de cartouches pour les Trous de contours $N_{cc}$

$$N_{cc} = \frac{q_{cont}}{p_c} ; \text{ cartouches}$$

$q_{cont}$  = charge de trou de contour ;

#### - Longueur de charge $L_{ch}$

$$L_{ch} = N_c \times L_c ; (m)$$

$N_c$  = nombre de cartouche de trou ;

$L_c$  = longueur d'une seule cartouche ;  $L_c = 300\text{mm}$  ;

La longueur des charges occupe 80% de la longueur du trou.

#### - Longueur de bourrage $L_b$

$$L_b = L_{tr} - L_{ch} ; (m)$$

La longueur de bourrage occupe 20% de la longueur du trou.

### 4.2.9. La consommation totale réelle des explosifs $q_r$

$$q_r = p_c (N_b \times N_{cb} + N_{ab} \times N_{cab} + N_c \times N_{cc}) ; (Kg)$$

### 4.2.10. Distance entre les trous

#### a) La distance entre les trous a

$$a = \sqrt{\frac{S_{cr}}{N_{tr}}} ; (m)$$

b) Le diamètre de trou de bouchon central vide  $\emptyset$

$$\emptyset = 2 \times d_t ;$$

c) La distance entre les trous de bouchon ab

$$ab = (0.3 \div 0.4) a ; (m)$$

d) La distance entre les trous d'abattage aba

Si  $F \leq 7$  la distance doit être 0,45m - 0,60m ;

Si  $F > 7$  la distance doit être 0,3m.

e) Distance entre les trous de contour ac

$$ac = \frac{P}{N_c} (m)$$

4.2.11. Longueur forée pour un seul poste  $L_{pf}$

$$L_{pf} = T_p \times T_f ; (min/m)$$

$T_p$  = Nombre de poste ; ( $T_p = 7$  heure = 420min)

$T_f$  = taux de pénétration de marteau perforateur ; ( $T_f = 0.25$  m/min).

4.2.12. Nombre de poste pour la réalisation de l'ouvrage  $N_p$

$$N_p = L_{tf} / L_{pf} ; (poste)$$

$L_{tf}$  = longueur totale des trous forée.

4.2.13. Temps de chargement des trous  $T_{ch}$

$$T_{ch} = \frac{N_{tr.tch}}{n_{ch}} ; (min)$$

$t_{ch}$  : temps de chargement d'un trou ;  $t_{ch} = 2$

$n_{ch}$  : Nombre d'ouvriers chargeant des trous ;  $n_{ch} = 4$

4.3. Les calculs des paramètres

4.3.1. Paramètre d'ouvrage

Tableau.7 : Paramètre d'ouvrage.

Paramètre d'ouvrage	Valeur
Largeur nette de l'excavation ( $B_n$ )	$B_n = 4.49m$
L'arc axial de la voûte (R)	$R = 3.107m$
Les arcs latéraux (r)	$r = 1.18 m$
La hauteur de l'excavation ( $H_{ex}$ )	$H_{ex} = 3.1 m$
La section de l'excavation ( $S_n$ )	$S_n = 12.69 m^2$
La section de creusement ( $S_{cr}$ )	$S_{cr} = 13.07 m^2$
Périmètre de l'excavation (P)	$P = 13.7 m$

4.3.2. Paramètre des travaux de forage et de tir horizontaux

Tableau.8 : Paramètres des travaux de forage et de tir horizontaux.

Paramètres	Calcaire	Fer	Grès	Marne jaune	Marne minéralisé	Conglomérat	
Volume à abattre par une volée (V)	16.24 m <sup>3</sup>						
Longueur d'avancement (Lav)	1,44 m						
Consommation spécifique d'explosif (q)	1.63 kg/m <sup>3</sup>	1.22 kg/m <sup>3</sup>	1.01 kg/m <sup>3</sup>	0.61 kg/m <sup>3</sup>	0.81 Kg/m <sup>3</sup>	0.81 Kg/m <sup>3</sup>	
Nombre des trous de mine (Ntr)	33 trous	25 trous	20 trous	12 trous	16 trous	16 trous	
Longueur totale des trous de mine (Ltot)	52.8 m	40 m	32 m	19.2 m	25.6 m	25.6 m	
Charge totale d'explosif (Q)	29.58 Kg	22.4 Kg	17.92 kg	10.75 kg	14.34 kg	14.34 kg	
Consommation moyenne par un trou (qm)	0.89 kg						
Répartition des trous	Trou de bouchon	6 trous	4 trous	4 trous	2 trous	3 trous	3 trous
	Trou d'abattage	10 trous	9 trous	6 trous	4 trous	5 trous	5 trous
	Trou de contour	17 trous	12 trous	10 trous	6 trous	8 trous	8 trous
Charge de trous (q)	Trou de bouchon	0.98 kg	0.98 kg				
	Trou d'abattage	0.89 kg	0.89 kg				
	Trou de contour	0.8 kg	0.8 kg				

## Choix de technique de creusement des formations rocheuses hétérogènes

Nombre de cartouche (Nc)	Trou de bouchon	4	4	4	4	4	4
	Trou d'abattage	4	4	4	4	4	4
	Trou de contour	3	3	3	3	3	3
Longueur de charge (L <sub>ch</sub> )	Trou de bouchon	1.2 m	1.2 m	0 m	0 m	0 m	0 m
	Trou d'abattage	1.2 m	1.2 m	1.2 m	1.2m	1.2 m	1.2 m
	Trou de contour	0.9 m	0.9 m	1.2 m	1.2m	1.2 m	1.2 m
Longueur de bourrage (L <sub>b</sub> )	Trou de bouchon	0.4m	0.4m	0.4m	0.4m	0.4m	0.4m
	Trou d'abattage	0.4m	0.4m	0.4m	0.4m	0.4m	0.4m
	Trou de contour	0.7 m	0.7 m	0.7 m	0.7 m	0.7 m	0.7 m
Consommation totale réelle des explosifs (qr) :		28.75 Kg	22 Kg	17.5 kg	10.5 kg	14 kg	14 kg
Temps de chargement des trous (T <sub>ch</sub> )		16.5 min	12.5 min	10 min	6 min	8 min	8 min
Temps de procédés non régularisés (T <sub>nr</sub> )		58.5 min	54.5 min	52 min	48 min	50 min	50 min
Temps de procédés non régularisés (T <sub>nr</sub> ) (heure)		0.975h	0.9h	0.86h	0.8h	0.83h	0.83h

### 4.3.3. Les distances entre les trous

Tableau.9 : Les distances entre les trous

Paramètre		Calcaire	Fer	Grès	Marne jaune	Marne minéralisé	Conglomérat
Diamètre de trou de bouchon		30 mm	30mm	30mm	30mm	30mm	30mm
Distance entre trou de contour et	Trou de contour	0.81 m	1.14m	1.38m	2.3 m	1.72 m	1.72 m
	Trou d'abattage	0.62m	0.72m	0.8m	1.04m	0.9m	0.9m
Distance entre trou d'Abattage et	Trou de contour	0.62m	0.72m	0.8m	1.04m	0.9m	0.9m
	Trou d'abattage	0.5m	0.45m	0.6m	0.6m	0.45m	0.45m
	Trou de bouchon	0.62m	0.72m	0.8m	1.04m	0.9m	0.9m
Distance entre trou de Bouchon et	Trou d'abattage	0.62m	0.72m	0.8m	1.04m	0.9m	0.9m
	Trou de bouchon	0.19m	0.21m	0.24m	0.31m	0.27m	0.27m
L'inclinaison pour trou de bouchon		80°	80°	80°	80°	80°	80°

4.4. Les plans des forages et de tir, disposition des charges, placement de retard de chaque faciès

a) Plan de forage et tir de calcaire

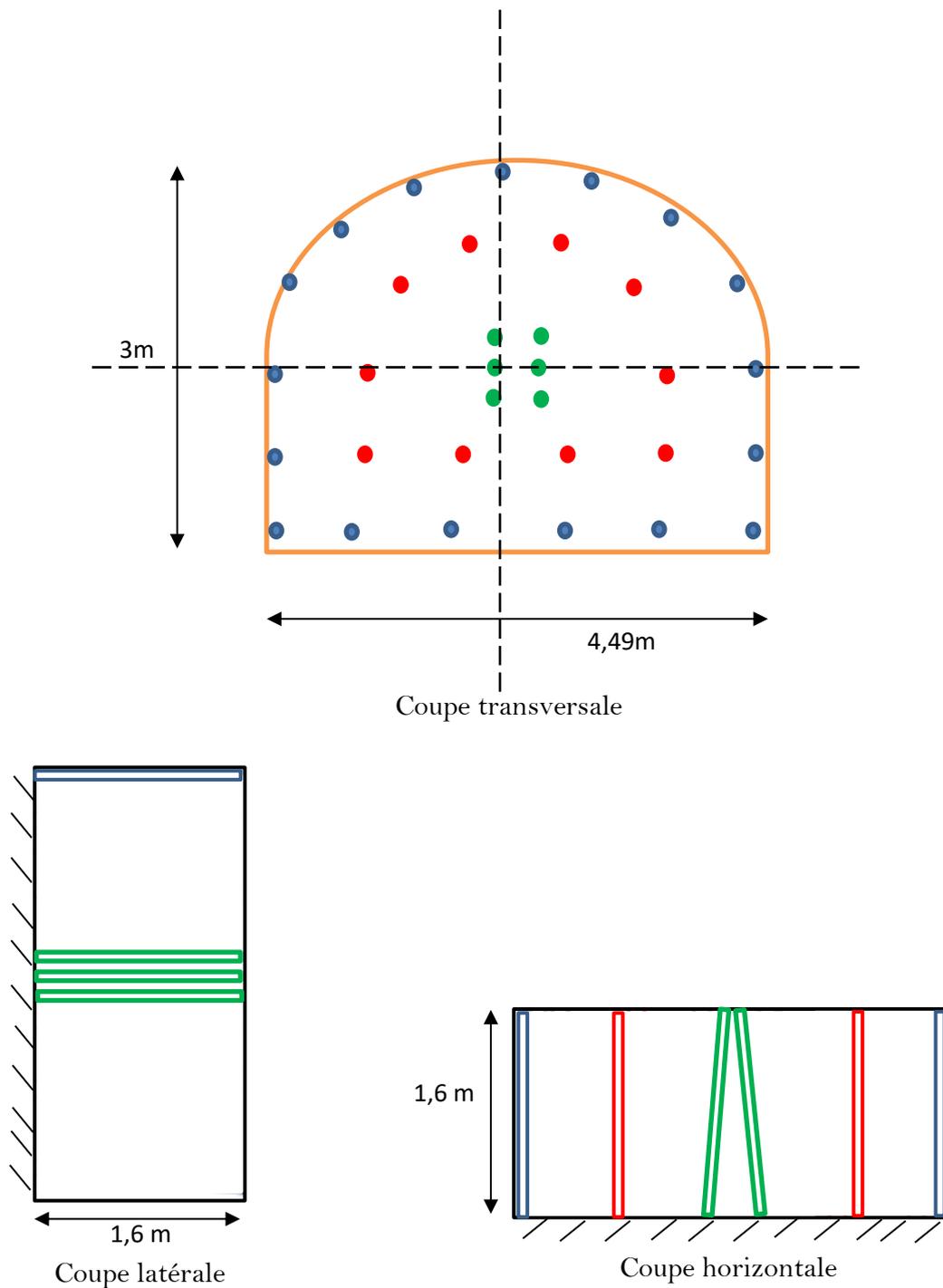


Figure 5 : plan de forage de calcaire

Disposition des charges :

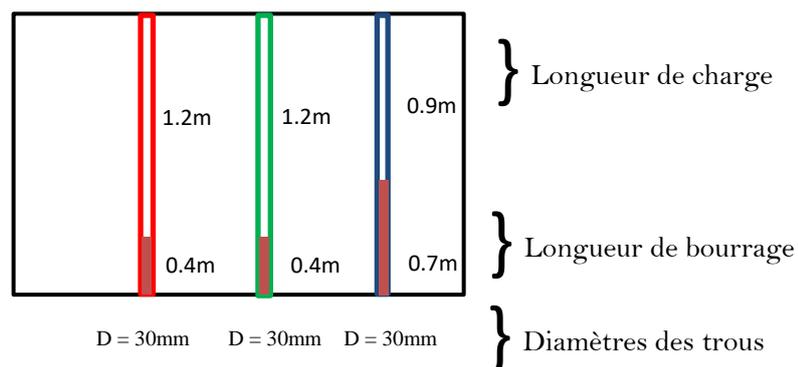


Figure 6 : disposition des charges dans les trous de calcaire

Placement de retard

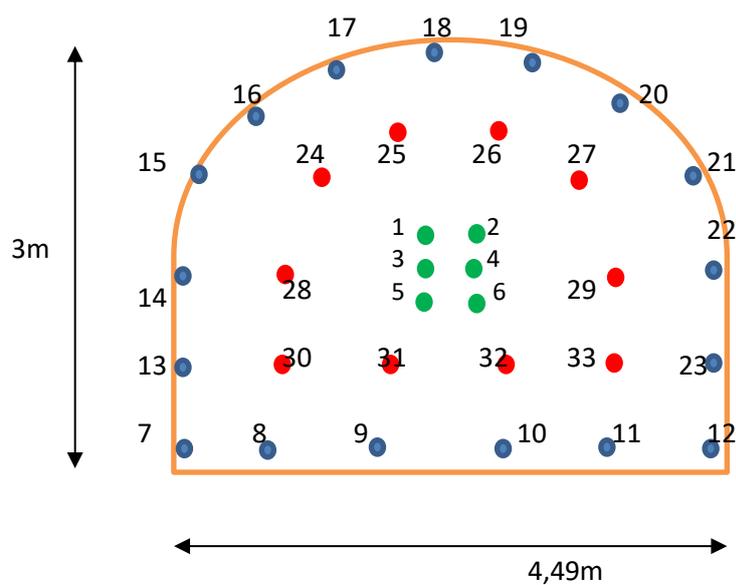


Figure 7 : placement de retard dans les trous de calcaire

b) Plan de forage et tir de fer

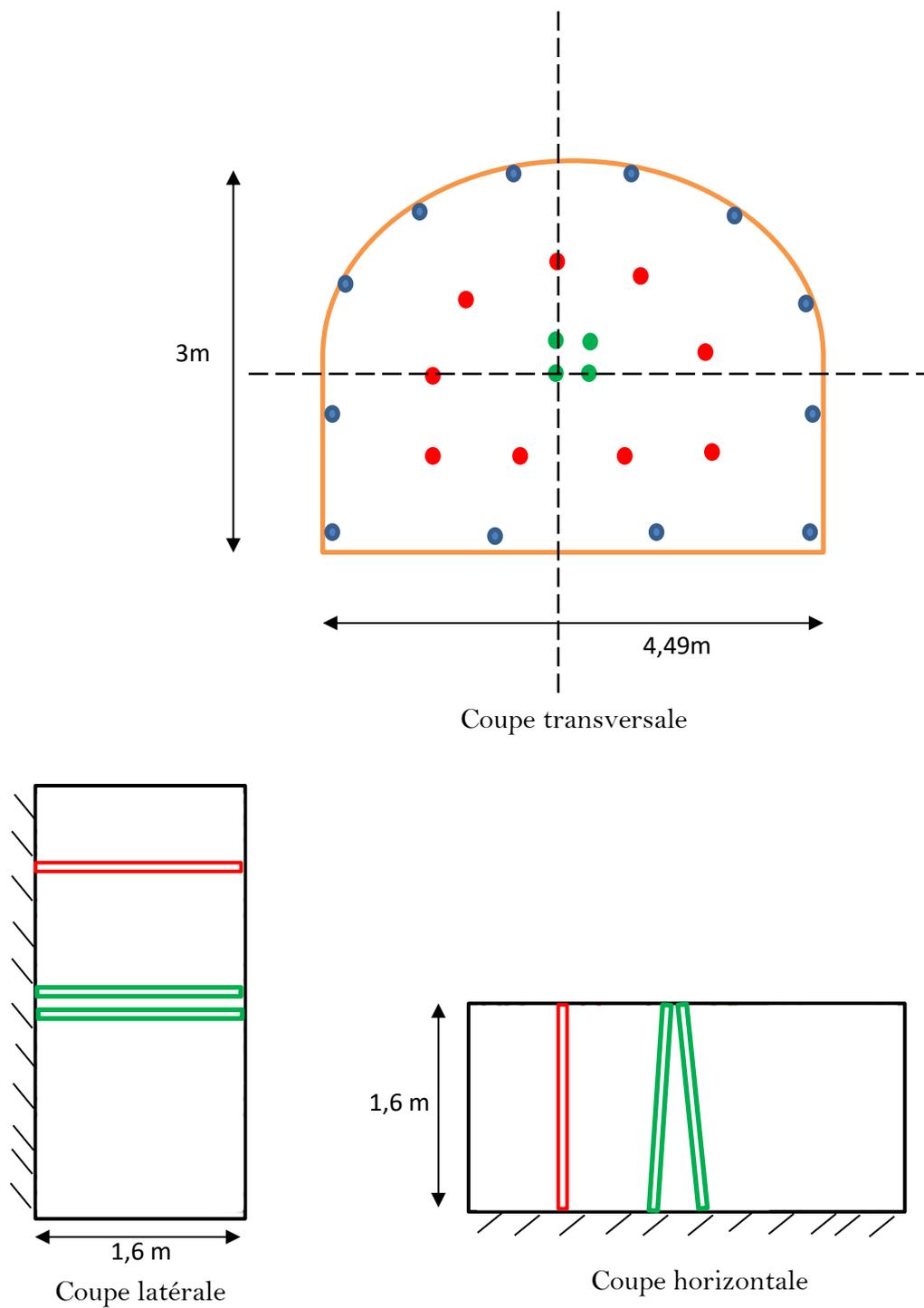


Figure 8 : plan de forage de fer

Disposition des charges

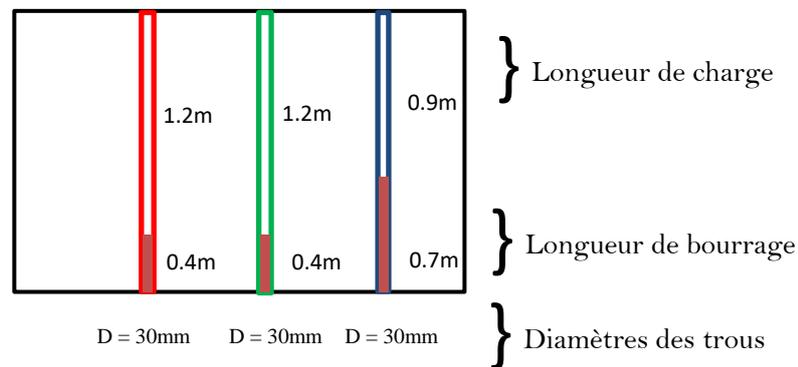


Figure 9 : disposition des charges dans les trous de fer

Placement de retard

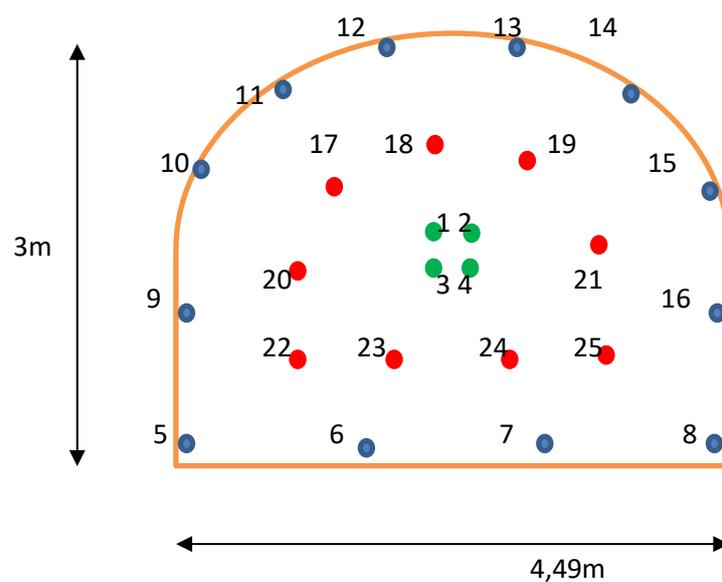


Figure 10 : placement de retard dans les trous de fer

c) Plan de forage et tir de grès

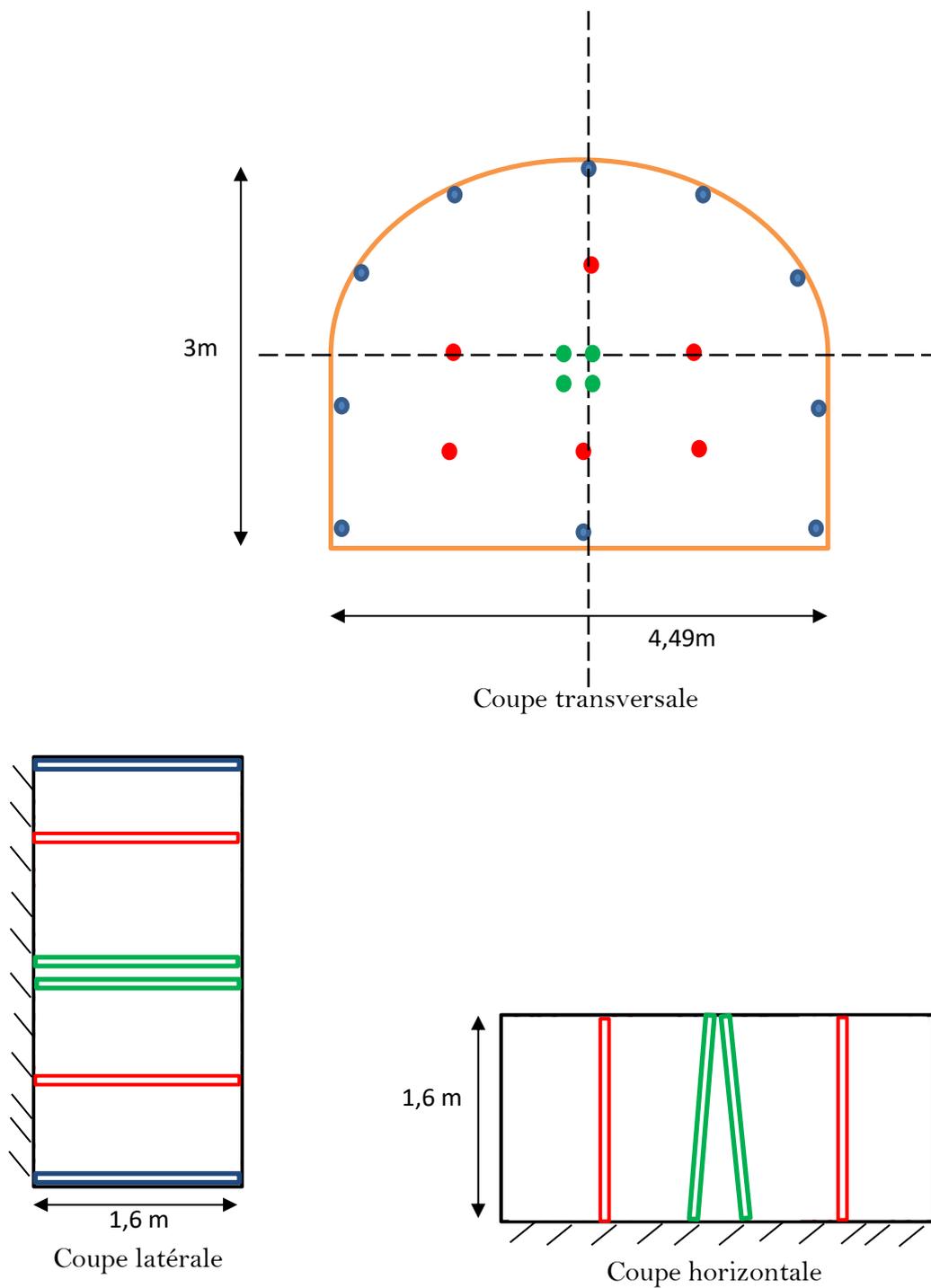


Figure 11 : plan de forage de grès

## Disposition des trous

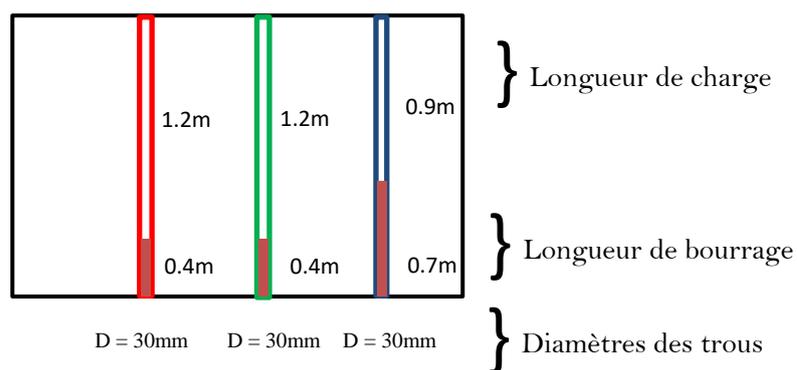


Figure 12 : disposition des charges dans les trous de grès

## Placement de retard

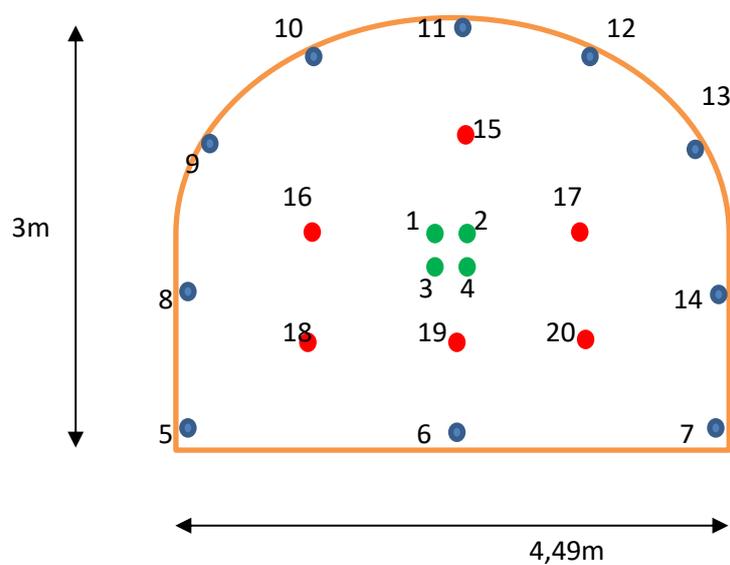


Figure 13 : placement de retard dans les trous de grès

d) Plan de forage et tir de marne jaune

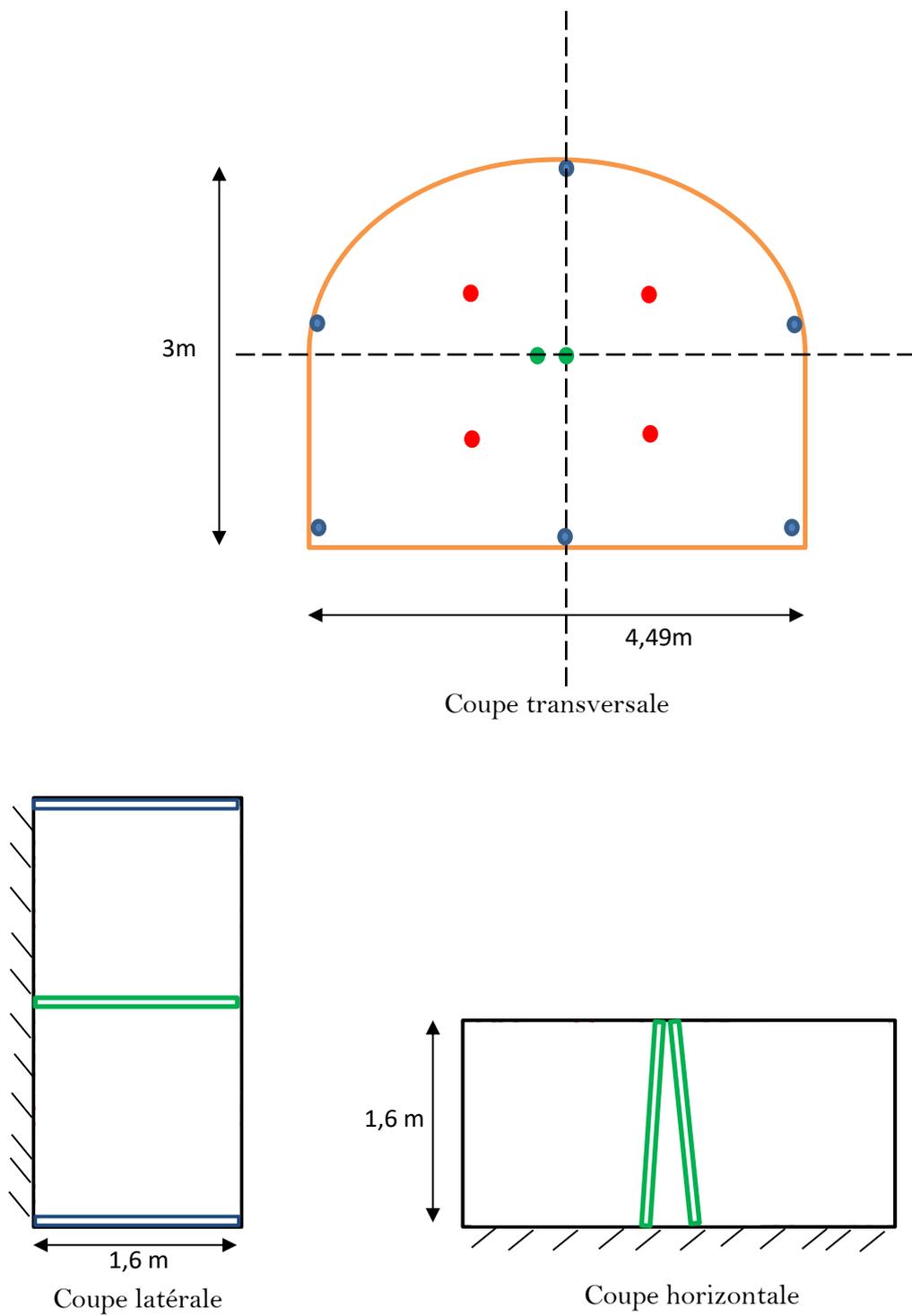


Figure 14 : plan de forage de marne jaune

## Disposition des charges

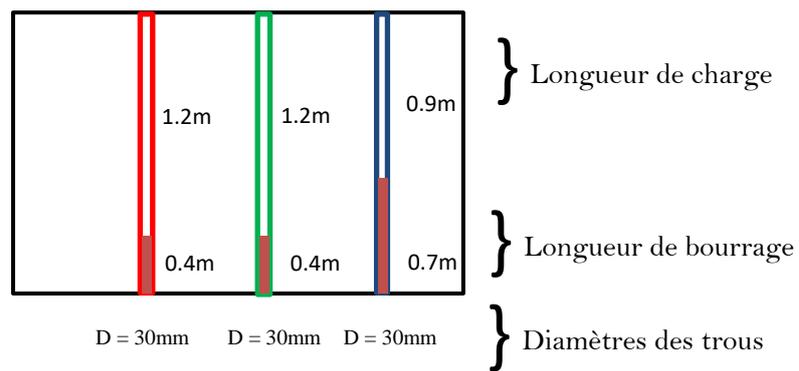


Figure 15 : disposition des charges dans les trous de marne jaune

## Placement de retard

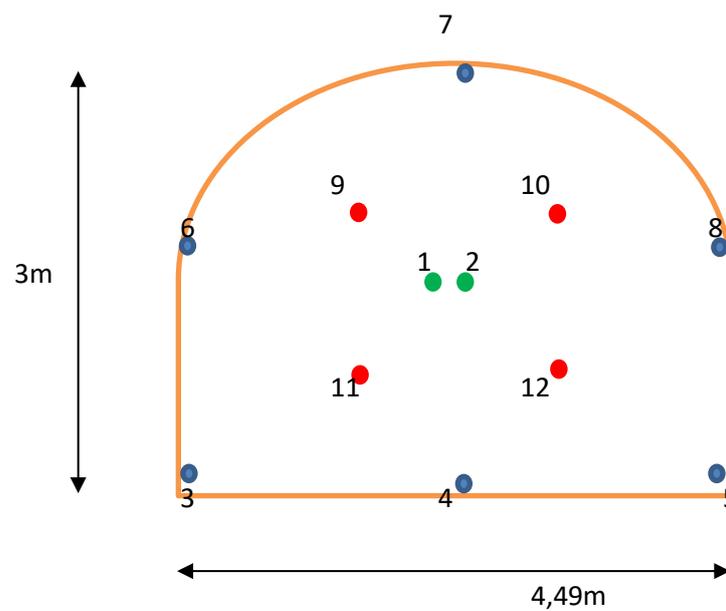


Figure 16 : placement de retard dans les trous de marne jaune

e) Plan de forage et tir de conglomérat

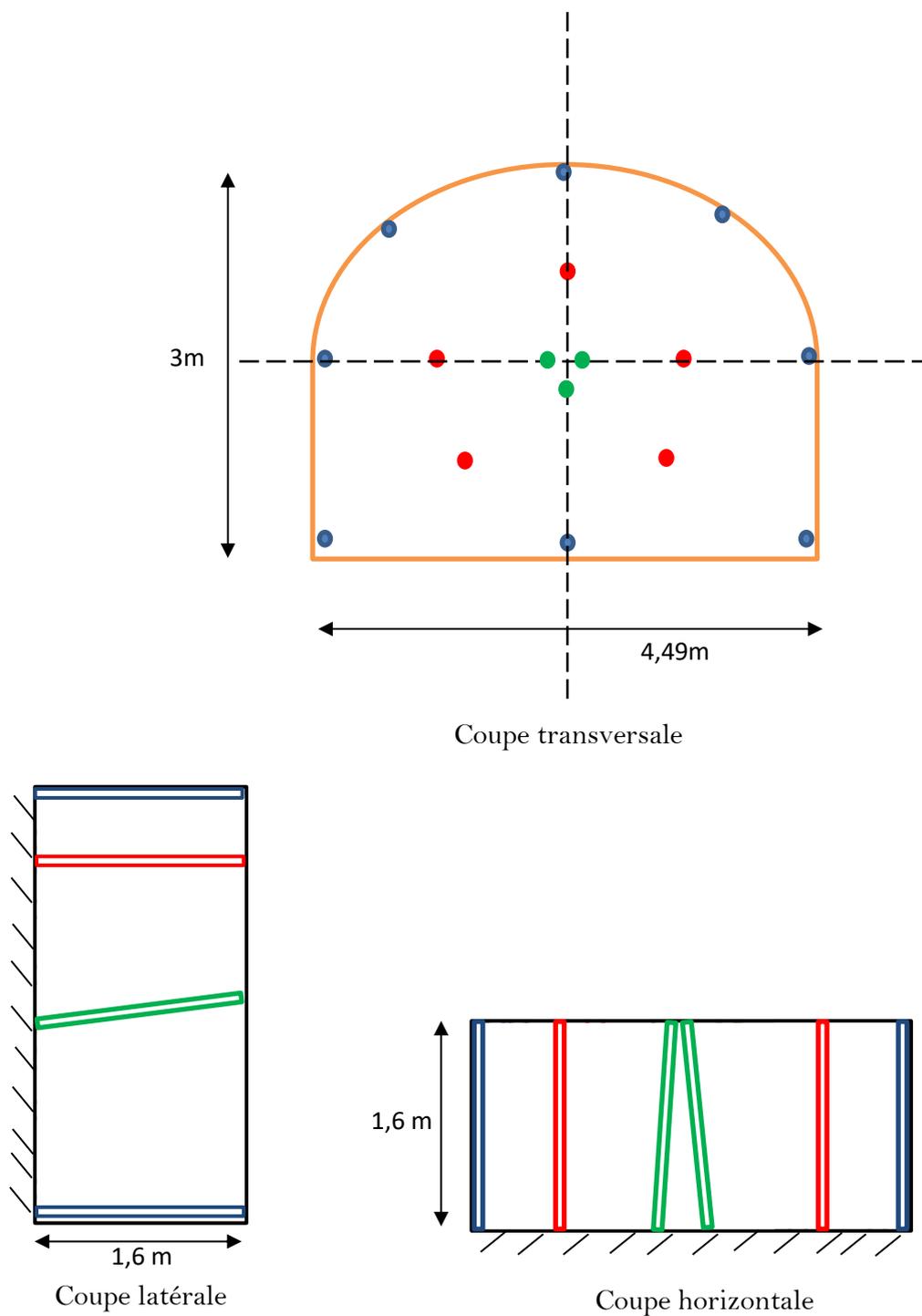


Figure 17 : plan de forage de conglomérat

## Disposition des charges

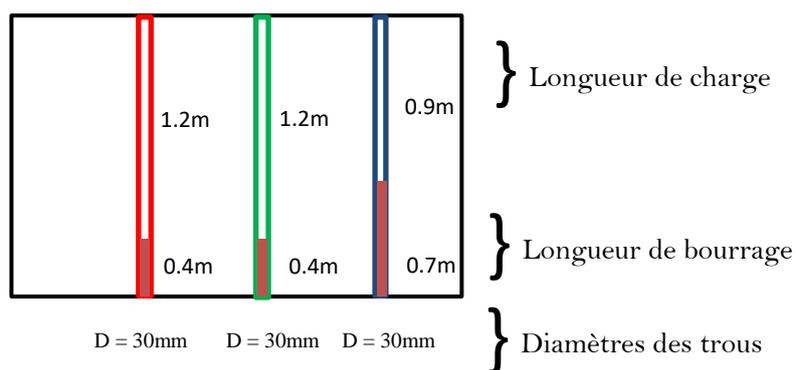


Figure 18 : disposition des charges dans les trous de conglomérat

## Placement de retard

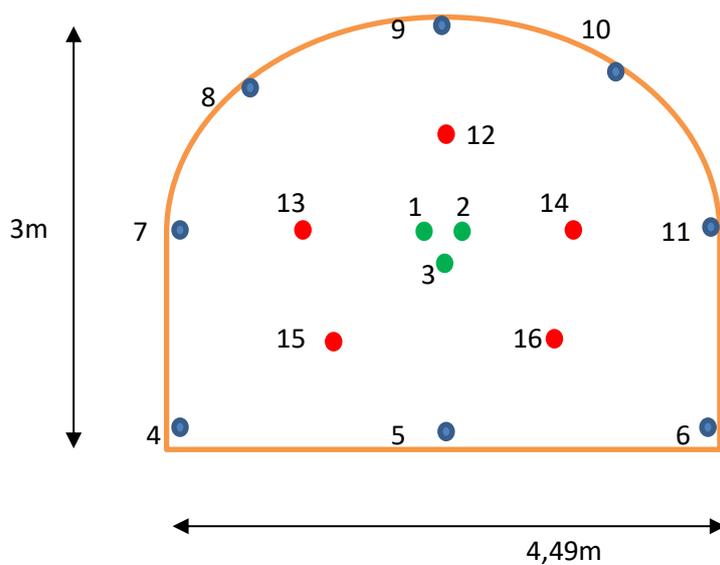


Figure 19 : placement de retard dans les trous de conglomérat

f) Plan de forage et tir de marne minéralisé

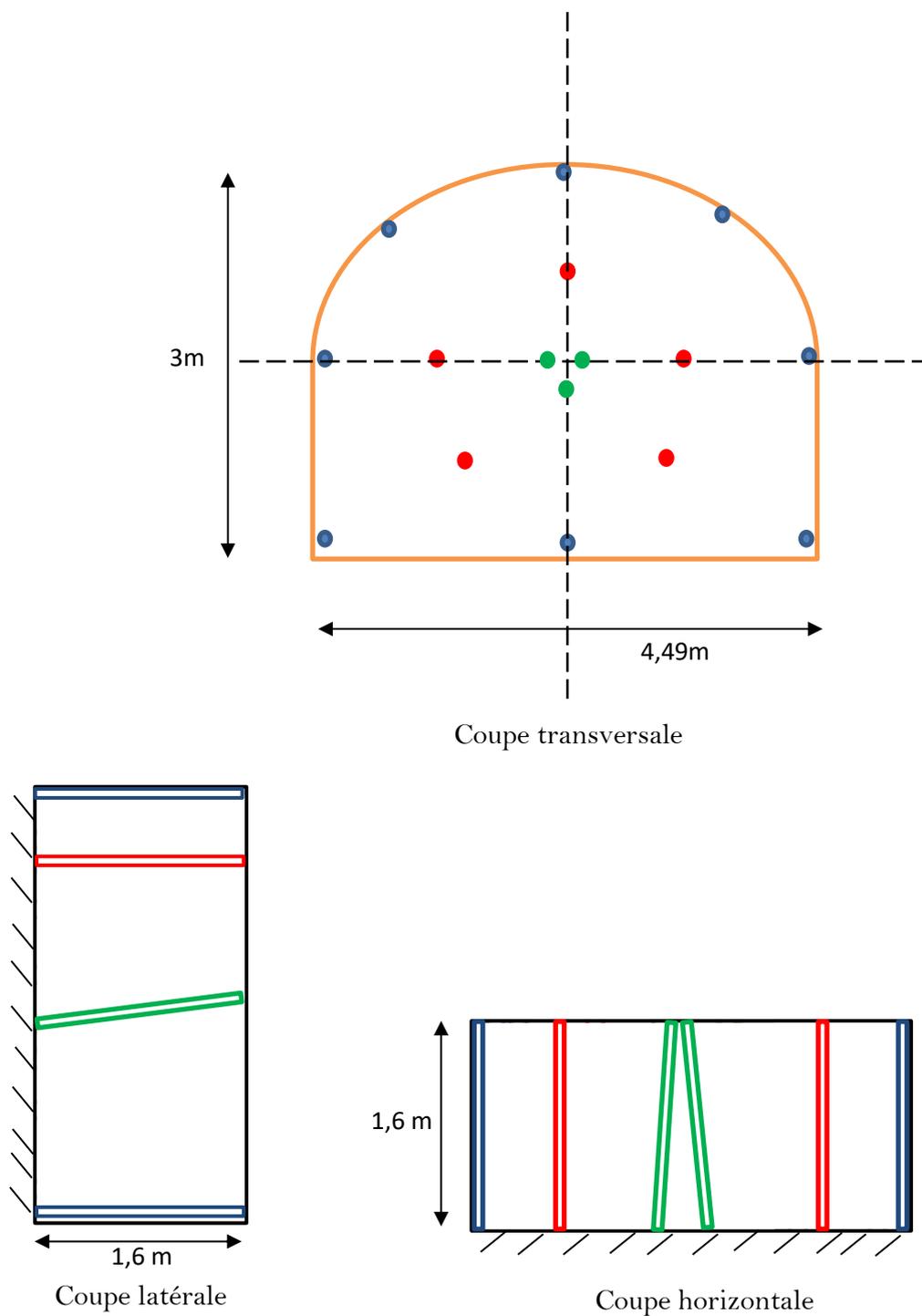


Figure 17 : plan de forage de marne minéralisé

## Disposition des charges

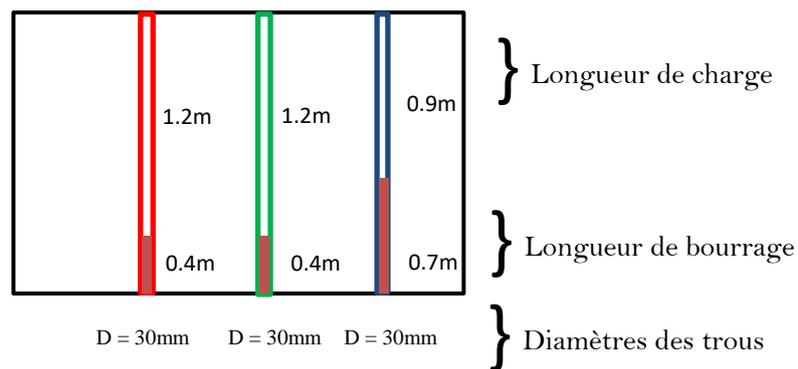


Figure 18 : disposition des charges dans les trous de marne minéralisé

## Placement de retard

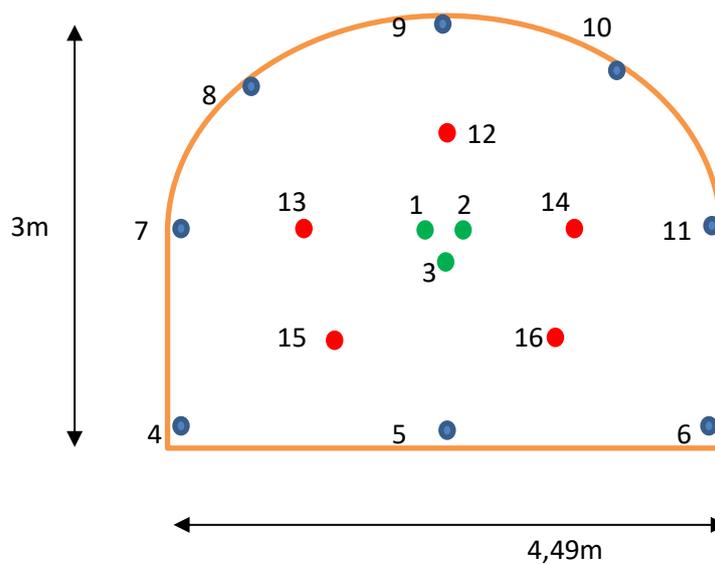


Figure 19 : placement de retard dans les trous de marne minéralisé

### 5. Comparaison

L'ouvrage 1045m de la mine souterraine de Boukhadra a creusé par certains paramètres, nous avons comparé ces paramètres avec notre paramètre proposant dans la 100m creusé et distingue les meilleurs paramètres pour la mine.

D'après la figure 2 on distingue les couches dominantes qui intersecté avec l'ouvrage

Tableau. :10 représente les résultats de notre correction proposée.

La couche dominante	Epaisseur de couche	Nombre de trou total	Longueur total foré	Duré de la réalisation d'ouvrage	Nombre de poste	Quantité d'explosif
<b>Conglomérat</b>	30m	300	480m	34.5h	4.57	244 kg
<b>Grès</b>	10m	125	200m	14.34h	1.9	100 kg
<b>Marne jaune</b>	17m	127	204m	14.65h	1.94	106 kg
<b>Marne minéralisé</b>	8m	80	128m	9.16h	1.21	65 kg
<b>Fer</b>	4m	63	100m	7.12h	0.95	55 kg
<b>Marne jaune</b>	8m	60	96m	6.9h	0.91	50 kg
<b>Fer</b>	13m	203	325m	23.3h	3.09	179 kg
<b>Calcaire</b>	10m	206	330m	23.71h	3.14	180 kg
<b>Total</b>	100m	1164	1863m	133.7h	17.71	979 kg

Tableau.11 : représente le Tableau récapitulatif.

Paramètres	Variant actuel	Variant proposé	Différence
Nombre de trou total creusé	1563 trous	1164 trous	399
Longueur totale de forage	2500 m	1863 m	637 m
Quantité d'explosif consommé total	1344 kg	979 kg	365 kg
Duré total de réalisation de forage d'ouvrage	179.5 h	133.7 h	45.8 h
Nombre de poste	23.8	17.7	6

### Synthèse

D'après notre étude nous proposons des corrections. Ces corrections s'effectuent par la modification sur les paramètres contrôlables qui influent directement sur la stabilité de terrain et la section d'ouvrages :

- Le plan de tir.
- Les placements des Retards.
- Les dispositions des trous.
- Changement de mode de trou de bouchon.
- Modifié les quantités d'explosif destiné à partir de chaque faciès.

Après appliquer ces corrections on peut obtenir :

- Une réduction des quantités d'explosif utilisé, qui est peut-être la principale cause d'éboulements dans la mine souterraine et l'effondrement à la surface, et perturbé la stabilité de terrain, aussi cette réduction a bénéficié pour l'entreprise.
- Une réduction des trous résultant une réduction de longueur totale forée et réduite la durée des travaux et accélérer le travail pour accéder au minerai, aussi de point de vue économique maximiser la durée de vie de marteau perforateur.
- Une création de deux surfaces libres, de bouchon et contour, et emprisonné la zone d'abattage entre les deux. Pour réduire la zone de déplacement des ondes et obtenir le maximum taux de fragmentation.
- Contrôler les limites d'abattage pour obtenir une bonne section d'ouvrage et éviter l'éboulement, le foudroyage et l'agrandir de section.
- Le maximum de longueur d'avancement des travaux.
- Le maximum de sécurité de travail avec l'explosif par création des surfaces libres.

*CONCLUSION*

### Conclusion

L'étude géologique a montré que le terrain de djebel Boukhadra est le résultat d'une évolution tectono-sédimentaire où les diapirs des évaporites jouent un rôle très important, La nature sédimentaire du terrain étudié fait qu'il existe une anisotropie très marquée liée à leur dépôt.

D'après la géomorphologie du gisement de fer hématique ( $Fe_2O_3$ ) de Boukhadra, on distingue quatre corps minéralisés de dimensions très variables (Corps principal, Corps Nord, Corps Médian, Corps Sud), et des petites veines. Le gisement de fer de Boukhadra à une forme d'Octopode et ses réserves sont répartis à trois axes (Axe principal, Axe Sud – Est, Axe Nord).

Suite à cette morphologie le gisement de fer de Boukhadra est exploité en mode à ciel ouvert pour le corps principal et en mode souterrain pour le corps Sud.

Des retards enregistrés dans les travaux de développement au niveau du souterrain à cause de la non réussite des travaux de creusements des galeries au jours marquée par :

- L'hétérogénéité des terrains traversés ;
- L'utilisation d'un même plan de tir pour toutes les formations ;
- Manque d'espaces libre pour les travaux d'abattage ;
- Excès d'ondes de vibrations au cours des tirs à l'explosif, qui peut engendrer des dislocations des blocs autour de la galerie ;
- Le soutènement est pratiquement absent.

L'implication de ces problèmes à un impact direct sur les réserves préparées ; ralentissant grandement l'avancement des travaux d'ouverture et de préparation.

Les résultats de l'étude géomécanique des différents faciès rencontrés dans les conditions de la mine souterraine de Boukhadra a montré qu'il existe sept couches géologiques ayant des caractéristiques différentes, cette étude a été basée sur la récolte des échantillons de chaque faciès, ainsi qu'une étude stéréographique des discontinuités des terrains traversés par notre galerie de base du niveau 1045 m.

La zone d'étude a été réalisée sur 100 m de longueur dont les faciès sont définis comme suit :

Conglomérats 30m ; Les grés 10m ; marne jaune 23m ; marne minéralisée 8m ; minerai de fer 15m ; marne grise 3m ; calcaires 10m.

- Les résistances à la compression de 4 Mpa de marne jaune à 90 Mpa de calcaire.
- L'étude stéréographique du massif rocheux de Boukhadra à montre que ce massif est formé par deux familles de discontinuités avec présences de discontinuités diffuses.

## Conclusion Générale

---

- Le système de classification RMR de base est de 55 à 74.
- Le Q système de 0.11 à 27.

D'après ces systèmes des classification RMR en classe le massif rocheux de Boukhadra comme étant un massif formé de roche de moyenne a bonne qualité.

D'après les résultats du Q système, on déduit que les couches du calcaire et de minerai de fer et de marne minéralisé ont une bonne qualité. En revanche, les autres couches de marnes et les grés et les conglomérats sont des très pauvres qualités.

L'ouvrage de niveau 1045m de la mine souterraine de Boukhadra nécessite un soutènement immédiat par cintre métallique parce que :

- Les formations rocheuses de massive est très hétérogènes et friables.
- Les galeries disposées dans la zone de broyage.

Le plan de tir actuel dans les conditions de la mine souterraine de Boukhadra est unique pour toutes les formations rocheuses, présentant un nombre de trous de 25 par section d'abattage, de 1.6 m longueur de trou et 30mm diamètre de trou, et quantité d'explosif de 21.5kg.

Le résultat de la réalisation de ce plan à tout l'ouvrage de 100m :

- Nombre des trous 1563 trous.
- Longueur de forages : 2500m
- Duré de la réalisation d'ouvrage : 179.5h
- Quantité d'explosif : 1344kg
- Nombre de poste : 24 postes
- Absence des trous de bouchons

Les plans de tir que nous avons proposé se différent d'un facies l'autre, dans notre étude aussi pour les mêmes paramètres (section longueur et diamètre des trous), même mode et méthode d'exploitation :

Pour les calcaires :

- Nombre des trous 33 trous.
- Longueur de forages : 53m
- Duré de la réalisation d'avancement : 2.47h
- Quantité d'explosif : 28.75kg
- Trous de bouchons : 6 trous

Pour le minerai de fer :

- Nombre des trous 25 trous.
- Longueur de forages : 40m
- Duré de la réalisation d'avancement : 1.87h
- Quantité d'explosif : 22kg
- Trous de bouchons : 4 trous

Pour les grès :

- Nombre des trous 20 trous.
- Longueur de forages : 32m
- Duré de la réalisation d'avancement : 1.5h
- Quantité d'explosif : 16kg
- Trous de bouchons : 4 trous

Pour les marnes jaunes :

- Nombre des trous 12 trous.
- Longueur de forages : 19.2 m
- Duré de la réalisation d'avancement : 0.9h
- Quantité d'explosif : 10kg
- Trous de bouchons : 2 trous

Pour les marnes minéralisées :

- Nombre des trous 16 trous.
- Longueur de forages : 25.6m
- Duré de la réalisation d'avancement : 1.2h
- Quantité d'explosif : 13kg
- Trous de bouchons : 3 trous

Pour les conglomérats :

- Nombre des trous 16 trous.
- Longueur de forages : 25.6m
- Duré de la réalisation d'avancement : 1.2h
- Quantité d'explosif : 13kg
- Trous de bouchons : 3 trous

## Conclusion Général

---

Les résultats obtenus pour les différents plans de tir dans les faciès rencontrés le long de la galerie 100m de niveau 1045m :

Pour les 30m de conglomérats :

- Nombre des trous 300 trous.
- Longueur de forages : 480m
- Duré de la réalisation d'avancement : 34.5h
- Quantité d'explosif : 244kg
- Trous de bouchons : 56 trous

Pour les 10m de grès :

- Nombre des trous 125 trous.
- Longueur de forages : 200m
- Duré de la réalisation d'avancement : 14.34h
- Quantité d'explosif : 100kg
- Trous de bouchons : 23 trous

Pour les 17m de marne jaune :

- Nombre des trous 127 trous.
- Longueur de forages : 204m
- Duré de la réalisation d'avancement : 14.65h
- Quantité d'explosif : 106kg
- Trous de bouchons : 24 trous

Pour les 8m de marne minéralisée :

- Nombre des trous 80 trous.
- Longueur de forages : 128m
- Duré de la réalisation d'avancement : 9.16h
- Quantité d'explosif : 65kg
- Trous de bouchons : 15 trous

Pour les 4m de fer :

- Nombre des trous 63 trous.
- Longueur de forages : 100m
- Duré de la réalisation d'avancement : 7.12h
- Quantité d'explosif : 55kg
- Trous de bouchons : 12 trous

## Conclusion Général

---

Pour les 8m de marne jaune :

- Nombre des trous 60 trous.
- Longueur de forages : 96m
- Duré de la réalisation d'avancement : 6.9h
- Quantité d'explosif : 50kg
- Trous de bouchons : 11 trous

Pour les 13m de fer :

- Nombre des trous 203 trous.
- Longueur de forages : 325m
- Duré de la réalisation d'avancement : 23.3h
- Quantité d'explosif : 179kg
- Trous de bouchons : 38 trous

Pour les 10m de calcaire :

- Nombre des trous 206 trous.
- Longueur de forages : 330m
- Duré de la réalisation d'avancement : 23.7h
- Quantité d'explosif : 180kg
- Trous de bouchons : 39 trous

Le résultat obtenu pour tous les faciès rencontrés le long de la galerie 100m de niveau 1045m :

- Nombre des trous 1164 trous.
- Trous de bouchons : 218 trous
- Longueur de forages : 1863m
- Duré de la réalisation d'ouvrage : 133.7h
- Quantité d'explosif : 979kg
- Nombre de poste : 18 postes

La différence entre la réalisation de plan de tir actuel de la mine souterraine de Boukhadra et nos plans de tirs :

- Une différence de 400 trous foré.
- En mettre le trou de bouchons en V
- Une différence de 640m dans la longueur totale des trous forés.
- Une différence de 365kg de quantité d'explosif utilisé

## Conclusion Général

---

- Une différence de 42.5h de travaux de forage
- Le temps de chargement de trous aussi diminué par 3.3 heures.
- Une différence de 6 postes de travail.

*Référence  
bibliographiques*

## BIBLIOGRAPHIE

---

### Référence bibliographiques :

[1] : Google Earth.

[2] : GADRI Larbi, et al ; Document De Recherche. « Study of fractured rock masses deformation in Boukhadra (Tebessa) underground mine empirical and numerical approach (N-E Algeria) ». Journal of Geology and Mining Research Vol. **4(2)**, March 2012, pp. **23-34**.

[3] : Arcelor Mittal D.E.D BK ; Rapport Géologique de la mine de Boukhadra, Division Etudes et Développement, Année 2014, pp.07.

[4] : GADRI Larbi, Thèse De Doctorat. « Etude de la déformation et de la rupture des massifs fissurés par la méthode des éléments finis (cas de la mine souterraine de Boukhadra) ». Université Larbi Tébessi – Tébessa (Algérie), Année 2012, pp. **82**.

[5] : AOUADI Ouarda, BELKHOUS Choukri, Mémoire Du Master II. « Contribution à l'étude géologique des minéralisations ferrières du massif de Djebel Boukhadra (Tébessa) ». Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene –Alger (Algérie), Année 2011.

[6] : MANCHAR Nabil, Thèse De Magistère « Etude comparative de deux gisements de fer en contextes géologiques distincts. Le gisement de sidi marouf (petite kabylie, jijel) et de boukhadra (monts du mellegue, Tébessa) Algérie nord orientale ». Université Mentouri – Constantine – (Algérie), Année 2007, pp. **80-89**.

[7] : BOUAZA Fatma et BOUDIAR Taki-eddine, Mémoire Du Master II. « Optimisation des paramètres d'exploitation de la 4ème phase de la mine souterraine de Boukhadra ». Université Larbi Tébessi – Tébessa (Algérie), Année 2016, pp. **04-07**.

[8] : BOUVARD, COLOMBET et ESTEULLE, Livre. « OUVRAGES SOUTERAINS ». École Nationale des Ponts et Chaussées – Paris (France), Année 1992, pp. **17**.

[9] : Nour Rahouadja KERBATI, Thèse De Doctorat. « Diagnostic de la stabilité d'anciennes exploitations souterraines et utilisation du remblayage comme un support des terrains adjacents, (Cas de la mine de fer de Boukhadra) ». Université Badji Mokhtar – ANNABA (Algérie), Année 2020.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [10] : Adel Djellali, et al ; Document De Recherche. « Evaluation of Cement-Stabilized Mine Tailings as Pavement Foundation Materials ». Geotech Geol Eng, Année 2019, pp.03.
- [11] : Noor Rahouadja Kerbati, et al ; Document De Recherche. « Graphical and Numerical Methods for Stability Analysis in Surrounding Rock of Underground Excavations, Example of Boukhadra Iron Mine N.E Algeria ». Geotech Geol Eng, Année 2020, pp. 21-50.
- [12] : BEN YUCEF ALI Ahmed et MANSOURI Amir, Mémoire Du Master II. « Proposition d'une méthode d'exploitation à ciel ouvert pour les réserves programmées en souterrain du gisement de fer de boukhadra ». Université Larbi Tébessi – Tébessa (Algérie), Année 2016.
- [13] : B.BOKY, Livre. « EXPLOITATION DES MINES ». U.R.S.S. (M o s c o u), Année 1968, pp. 1
- [14] : FREDJ M, Cours Exploitation Souterraine. « Technologie d'exploitations des mines ». Université Abderrahmane Mira – Bejaia (Algérie).
- [15] : livre. « VOCABILAIRE DE MINE SOUTERRAINE ». pp. 15-16.
- [16] : SERAJ, « Brochure de cour Master 1 souterraine » pp 1 – 20.
- [17] : ILUNGA YANO Yannick, Livre. « CREUSEMENT DES GALERIES (Creusement conventionnel des galeries) ». Université de Kolwezi (Congo), Décembre 2019.
- [18] : WALDMANN René, Livre. « L'HISTOIRE DES TUNNELS ». École polytechnique de l'université Lyon-I (Polytech Lyon) – Lyon (France), Septembre 2004.
- [19] : AMARA Idir, Mémoire Du Master II. «Etude de comportement d'un tronçon du tunnel d'Ait Yahia Moussa ». Université Mouloud Mammeri – Tizi Ouzou (Algérie), Année 2018.
- [20] : R.F. TYLECOTE, Livre. « The Early History of Metallurgy in Europe », Longman, London and New York, 2<sup>nd</sup> Edition. Année 1987, pp 329.
- [21] : J. ESPEROU, L.P. ROQUES, et P. AMBERT, « L'outillage des mineurs historiques de Cabrières » ; Les Broyeurs, Colloque en Hommage à J. Arnal, Saint Mathieu de Trévier, Archéologie en Languedoc no 15, Année 1992, pp. 67-76.

## BIBLIOGRAPHIE

---

[22] : C. DUBOIS, « L'ouverture par le feu dans les mines : Histoire, archéologie et expérimentations = Fire setting in mines : history, archaeology, perimentations » ; Revue d'archéométrie no 20, Année 1996, pp. 33-46 (1 p.1/4), ISSN 0399-1237.

[23] : Lewis Wickes Hine (1874-1940), Photographie. « Child coal miners (1908).jpg ». Library of Congress Prints and Photographs Division, Records of the National Child Labor Committee, 1 septembre 1908.

[24] : J. COBDEN, Photographie. « The White Slaves of England ». Hurrier Cobden (1853).jpg, 1 janvier 1853.

[25] : Livre. « Dossier pilote des tunnels génie civil - section 4 : procédés de creusement et de soutènement ». Centre d'études des tunnels – France, Juillet 1998.

[26] : BOUSBIA Nawel, Thèse De Doctorat. « Interaction entre ouvrages souterrains ». Université de 20 août 1955 – Skikda (Algérie), Année 2016.

[27] : LATRECHE Aicha et KHALFI Asma, Mémoire Du Master II. « Etude de l'influence des lois de comportement et de la surcharge sur l'interaction sol-tunnel pour différents types de terrain encaissant ». Université Badji Mokhtar – Annaba (Algérie), Année 2019.

[28] : ABDERRAHMANE Amina et BENSALAH Amina, Mémoire Du Master II. « Influence du creusement d'un tunnel sur le comportement du sol sous les fondations d'une construction en surface ». Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen (Algérie), Année 2016.

[29] : DJELLOUL Chafia, Thèse De Doctorat. « Comportement du sol lors du creusement de tunnels cas du tunnel T4 d'El-Harouche Skikda ». Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd – Batna (Algérie), Année 2020.

[30] : François MARTIN et Adrien SAÏTTA, Livre. « Mécanique des Roches et Travaux Souterrains ». Centre d'Études des Tunnels – Paris (France), Novembre 2005, pp. 17.

[31] : BOUKHALFA Adel, Thèse De Magistère. « Analyse des paramètres de coupe (Abattage mécanique) ». Université Badji Mokhtar – Annaba (Algérie), Année 2011.

[32] : SERRANO Carlos José Zavala, Mémoire Du Master II. « Conception d'excavation de la galerie principale d'accès a la mine "REINA DEL CISNE", district minier de PORTOVELO

## BIBLIOGRAPHIE

---

- ZARUMA, CANTON ZARUMA, province d'EL ORO ». Université Centrale de l'équateur – Quito. (Équateur), Juin 2014.

[33] : ZHAO Jian, Course Lectures mécanique des roches, 2<sup>ème</sup> partie. «Mécanique et propriétés des massifs rocheux». Laboratoire de Mécanique des Roches – LMR. 2008.

[34] : Sylvie POMMIER, Livre. « Mécanique des matériaux ». Université Paris - Saclay –Paris (France).

[35] : LEMRABET Abdelkrim, TAYEBI Abdallah, Mémoire Du Master II. « Approche comparative de deux gisements de fer Boukhadra et Rouina : Contexte géologique et Méthodes d'exploitation ». Université Abderrahmane Mira – Bejaia (Algérie). Année 2015.

[36] : Ahmed KHANFOUSSI, Salih YANES, Mémoire Du Master II. « Stabilité les parois des excavations souterraines au niveau de la mine de Boukhadra – Tébessa ». Université Larbi Tébessi – Tébessa (Algérie). Année 2017.

[37] : La DAD de Boukhadra.

[38] : MAADADI Bilel et TALI Oussama, Mémoire Du Master II. « Creusement et soutènement des excavations souterraines. (Cas de mine de Boukhadra-Tébessa) ».

[39] : CHAKHRIT Ismail, Mémoire Du Master II. « Optimisation des paramètres d'abattage à l'explosif pour améliorer les résultats de tir « la mine de ain mimoun a khenchela ». Université Badji Mokhtar –Annaba (Algérie). Septembre 2020, pp..

[40] : BENACHI Nidhal, Mémoire Du Master II. « Conception d'un plan de tir pour la mine d'ain mimoun filon 4 niveau 1730 M». Université Badji Mokhtar –Annaba (Algérie). Juillet 2019, pp. 21-28.

[41] : Livre. « TRAVAUX A L'EXPLOSIF – CPT – OPTION 1 TRAVAUX SOUTERRAINS». Octobre 2012, pp. 21-28.

[42] : Mr. GADRI Larbi. Master 1, « Cours de Géotechnique minière ».