



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

# Contribution à l'étude de l'abattage à l'explosif dans les massifs rocheux fissurés cas de la carrière de Kef Essnoun -DJEBEL ONK - Esquisse Théorique

Présenté et soutenu par

- Boukhobza Samira
- Hadri Brahim

Devant le jury:

		Grade	Etablissement
Président :	MERAH Chafia	M.C.A	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Encadreur :	BOUTERFIF Leila	M.A.A	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Examineurs :	SAADAOUI Salah	M.A.A	Université Larbi Tebessi - Tébessa

Promotion 2019-2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي  
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

الصفة : طالبة

السيد (ة): بوخبزة سميرة

و الصادرة بتاريخ: 15/07/2019

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 115072174

قسم: المناجم و جيوتقني

المسجل بمعهد: المناجم

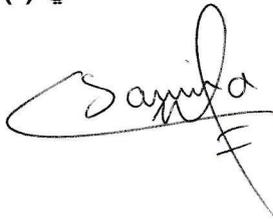
و المكلف بانجاز أعمال بحث: مذكرة ماستر، عنوانها :

Contribution à l'étude de l'abattage à l'explosif dans les massifs rocheux fissurés  
Cas de la carrière de Kef Essnoun - Djebel Onk -

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 23/09/2020

إمضاء المعني (ة)


بلدية المحيطة  
إلى أعضاء المجلس البلدي  
23 سبتمبر 2020  
تاريخ: 23 سبتمبر  
السيدة  
ب.ت. و أورد  
15  
عن رئيس المجلس الشعبي البلدي  
و يتفرغ من مهامه في الحالة المدنية  
إمضاء: بن قبيدة أحمد

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي – تبسة

تصريح شرفي  
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) : حضري ابراهيم الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 205810291 و الصادرة بتاريخ : 09/03/2020

المسجل بمعهد : المناجم قسم : المناجم والجيوتكنولوجيا

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Contribution à L'étude de l'abattage à l'explosifs dans les massifs rocheux Fissurés

cas de la Carrière de KEF ESSNOUNE – DJEBEL ONK

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية

المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ : 22/09/2020

إمضاء المعني (ة)





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Larbi Tebessi – Tébessa  
Institut des Mines  
Département des Mines et de Géotechnologie



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
جامعة العربي التبسي - تبسة  
معهد المناجم  
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا

Année universitaire : 2019-2020

Tébessa le :

### Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1- BOUKHOBZA Samira

2- HADRI Brahim

**Niveau:** Master 2

**Option :** Exploitation des mines

**Thème :** Contribution à l'étude de l'abattage à l'explosif dans les massifs rocheux fissurés cas de la carrière de Kef Essnoun -DJEBEL ONK –  
Esquisse théorique

**Nom et prénom de l'encadreur :** BOUTERFIF Leila

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre I: Caractérisation du massif rocheux	
Chapitre II: Classification géomécanique des massifs rocheux	
Chapitre III: Analyse de la théorie d'abattage des roches à l'explosif	
Chapitre IV: Effets de discontinuités sur le résultat de tir	



# REMERCIEMENTS

*Nous tenons à remercier avant tout Allah, le tout miséricordieux, qui grâce à lui nous sommes arrivées à ce stade.*

*Toute notre gratitude va vers notre encadreur : BOUTERFIF LEILA, pour son encouragement, sa patience et ses conseils précieux, ainsi que pour son suivi pas à pas de notre travail.*

*Nous remercions aussi l'ensemble des membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.*

*Nous remercions tous les enseignants et les enseignantes de l'Institut des mines, pour leur contribution dans notre formation.*

*Un grand merci pour le personnel technique du complexe minier de Djebel Onk en particulier Mr. Mohamed Ali, Mr. MAKHLOUF Brahim, Mr. BELGHIT Ali.*

*Nous tenons à remercier l'ensemble de nos enseignants et collègues de notre promotion de génie Minier.*

*Enfin, nous remercions aussi nos collègues qui nous ont supportés durant l'élaboration de ce modeste travail.*



**BOUKHOBZA Samira**

## REMERCIEMENTS

*Avant d'entamer notre étude, je tiens à exprimer notre reconnaissance à tous ceux qui m'ont permis de mener à bien ce travail.*

*Mes remerciements vont en premier lieu à **Dieu**, le tout puissant, à mes chers parents et je tiens à adresser toute ma gratitude à **M<sup>me</sup> Bouterfif Leila** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses précieux conseils qui m'ont aidé à mener à terme notre travail.*

*Nous remercions les **Membres du jury** d'avoir accepté d'examiner notre modeste travail en dépit de leurs occupations professionnelles et scientifiques, ainsi qu'à tous les enseignants de l'institut des mines, en particulier son Directeur, **Mr Aoulmi zoubir**, qui ont veillé efficacement à notre formation durant notre cursus.*

*Enfin, toute ma reconnaissance envers ma famille, en particulier mon épouse qui m'a insufflé l'énergie nécessaire pour achever mon travail, mes amis et mes collègues d'étude qui n'ont point lésiné à*  
*m'apporter leur soutien.*

*HADRI Brahim*



# DEDICACE

*Je tiens à dédier ce modeste travail à tous ceux qui m'ont entouré de près :*

*A mon père qui m'a guidé depuis mon enfance par ses conseils et ses sacrifices vers le bon chemin et la réussite et qui aurait été comblé de bonheur s'il était de ce monde que dieu l'abrite dans son immense paradis.*

*A ma mère pour sa tendresse et sa vaillance sur moi et sur ma réussite et qui continue à me servir d'exemple. Qu'elle trouve ici ma profonde reconnaissance.*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.*

*A mes chères sœurs: Khaira, Naima, Sara.*

*A Mon cher frère: Abdelkader.*

*A mon beau-frère: Ali, Khaled, Mohammed.*

*A mon neveu: Alaa, Louay, Taibe, abdelwedoud.*

*A mon encadreur : BOUTERFIF Leila*

*A mon professeur: AFER Maamar*

*Mes précieux amis (es): Chaimaa, Fouzia, Bouchera, Ikram, Batoul, Mnarka, Oumaima, Hadjer, Khadija, Amina, Asia, Sohila, Hiba, Amine, Mohammed Ilyas.*

*A mes collègues de l'université de TEBESSA*

*A toute la promotion génie minier 2020.*

*BOUKHOBZA Samira*

## **DEDICACE**

*Je voudrais enfin dédier mon mémoire à ma mère et mon père, à ma femme qui m'a donné l'énergie nécessaire pour terminer m'on travail, à mes beaux jumeaux OUAIL, LOUAI sans oublier le petit MASSI que j'embrasse très fort ainsi que mes frères et sœurs que j'adore. Une pensée à mes amis et tous mes camarades.*



*HADRI Brahim*



## Résumé

---

### Résumé

Dans les massifs rocheux fissurés, il est très difficile de réaliser des ouvrages sans avoir réalisé au préalable, une étude de sa fracturation et de son comportement mécanique et hydraulique.

La structure du massif rocheux est un paramètre très important selon les résultats des travaux de plusieurs chercheurs ; c'est le paramètre principal dont il faut tenir compte dans la caractérisation des massifs rocheux fissurés où il est question de discontinuités. Ces dernières ne sont pas distribuées de manière aléatoire, mais se groupent en général en un nombre restreint de familles, elles résultent de l'histoire géologique du massif rocheux.

Les discontinuités (microfissures, fissures, failles...) influent grandement sur la qualité des tirs (diminution des Hors Gabarits et blocs suspendus, atténuation de l'effet arrière, perte d'énergie de l'explosif...). En fonction de l'orientation des discontinuités, il sera aisé de choisir un sens d'exploitation approprié.

**Mots Clés :** massifs rocheux, discontinuités, plan de tir, explosif

## Abstract

---

### Abstract

In fissured rock massifs, it is very difficult to carry out structures without first having carried out a study of its fracturing and its mechanical and hydraulic behavior.

The structure of the rock mass is a very important parameter according to the results of the work of several researchers; this is the main parameter that must be taken into account in the characterization of fissured rock masses where there is a question of discontinuities. These are not distributed randomly, but are generally grouped into a small number of families, they result from the geological history of the rocky massif.

The discontinuities (microcracks, cracks, faults, etc.) greatly influence the quality of the blasting (reduction in Out-of-Gauges and suspended blocks, attenuation of the rear effect, loss of energy of the explosive, etc.). Depending on the orientation of the discontinuities, it will be easy to choose an appropriate direction of operation.

**Keywords:** rocky massifs, discontinuities, firing plan, explosive

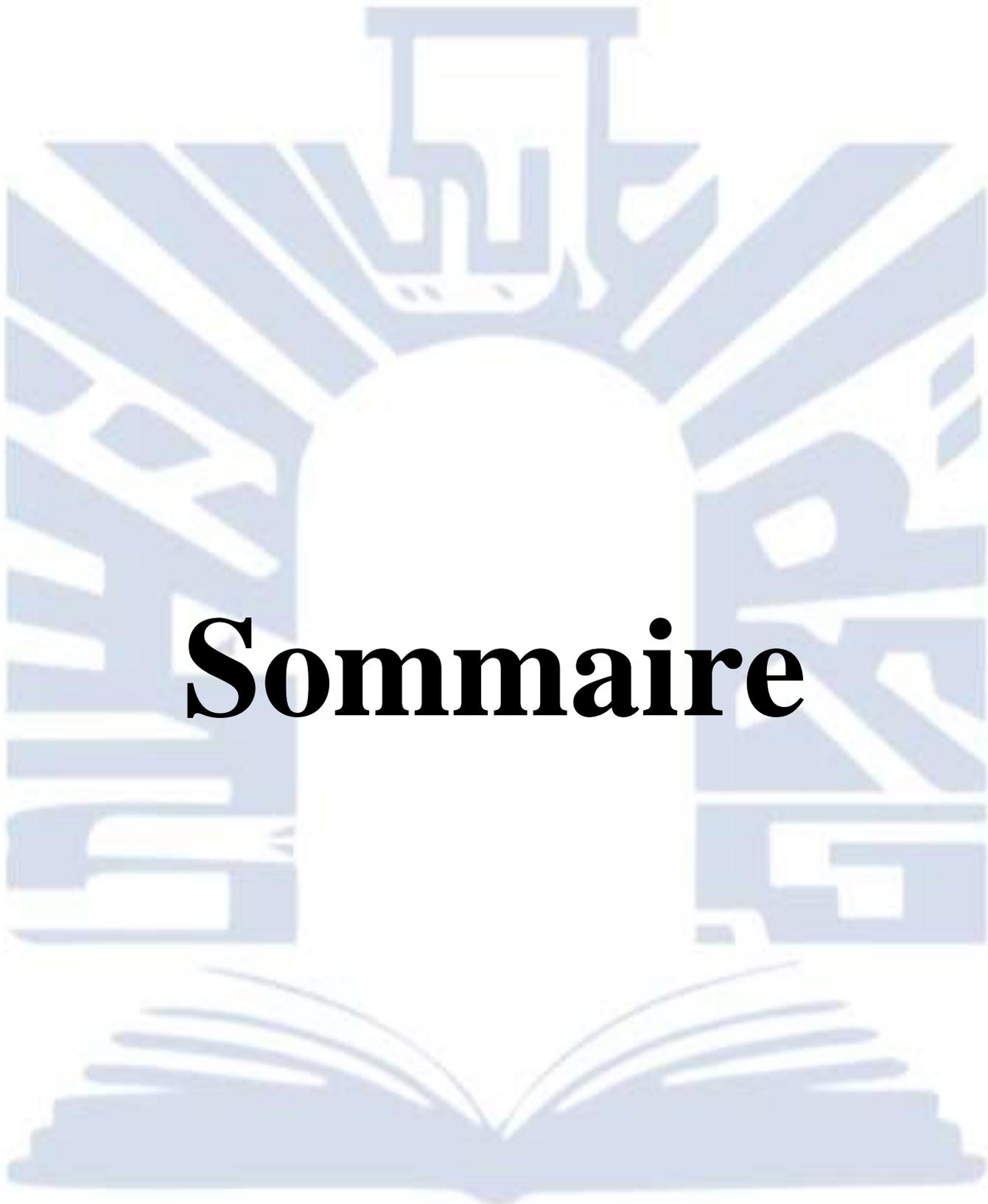
ملخص

في كتل الصخور المتصدعة ، من الصعب جداً تنفيذ الهياكل دون إجراء دراسة أولية لتكسيرها وسلوكها الميكانيكي والهيدروليكي.

تعتبر بنية الكتلة الصخرية مقياس مهم جداً وفقاً لنتائج عمل العديد من الباحثين ؛ هذا المقياس الرئيسي يجب أخذه بعين الاعتبار عند توصيف كتل الصخور المتصدعة حيث توجد مسألة الانقطاعات. هذه ليست موزعة بشكل عشوائي ، ولكن يتم تجميعها بشكل عام في عدد صغير من العائلات ، فهي ناتجة عن التاريخ الجيولوجي للكتلة الصخرية.

تؤثر الانقطاعات (الشقوق الصغيرة ، الشقوق ، الأعطال ، إلخ) بشكل كبير على جودة التفجير (تقليل الكتل خارج المقاييس والكتل المعلقة ، توهين التأثير الخلفي ، فقدان طاقة المتفجرات ، إلخ). اعتماداً على اتجاه الانقطاعات ، سيكون من السهل اختيار اتجاه مناسب لعملية الاستغلال.

**كلمات مفتاحية:** كتل صخرية ، انقطاعات ، خطة إطلاق نار ، متفجرات

The logo of Université Larbi Tébessi - Tébessa is centered in the background. It features a stylized sun with rays emanating from a central circle, topped by a graduation cap. Below the sun is an open book. The entire logo is rendered in a light blue color.

# Sommaire

جامعة العربي التبسي - تبسة  
Universite Larbi Tébessi - Tébessa

# Sommaire

---

<b>Remerciement</b>	
<b>Dédicaces</b>	
<b>Sommaire</b>	
<b>Liste de tableaux</b>	
<b>Liste de figures</b>	
<b>Notation</b>	
<b>Abréviation</b>	
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I:Caractérisation du massif rocheux</b>	
I. Introduction.....	3
II. Généralités sur les massifs rocheux.....	3
II.1 Matrice rocheuse.....	4
➤ Type géotechnique de la roche.....	5
II.2. Les propriétés physico-mécaniques des roches.....	5
A. Les propriétés physiques des roches.....	6
a. La porosité.....	6
b. Masses volumiques.....	6
c. La teneur en eau.....	7
d. Le degré de saturation.....	7
e. La dureté.....	7
f. Module de Young.....	8
g. L'abrasivité.....	9
h. L'altérabilité.....	10
B. Les propriétés mécaniques des roches.....	10
a) Les paramètres mécaniques de la résistance.....	10
• Résistance à la compression.....	10
• Résistance à la traction.....	11
• La résistance au cisaillement.....	13
II.3. Discontinuités.....	15
II.3.1 Types de discontinuités.....	16
II.3.2. Caractéristiques des discontinuités.....	18
a) Son orientation.....	18
b) Sa fréquence.....	18
c) Sa morphologie.....	18

# Sommaire

---

d) Ses propriétés mécaniques.....	18
II.3.3. Paramètres géométriques.....	18
A. Orientation.....	18
B. Extension.....	19
C. L'espace des joints et densité.....	20
D. Ouverture.....	21
E. Persistance.....	23
F. Rugosité.....	24
G. Nombre de familles de discontinuités.....	26
H. Le degré de fissuration des roches.....	26
II.3.4. Caractéristiques mécaniques d'une discontinuité.....	27
a) Cisaillement suivant un plan horizontal.....	27
b) Cisaillement sur un plan incliné.....	29
II.3.5 Comportement des discontinuités naturelles.....	29
A. La rugosité.....	29
A.1. Mesure de la rugosité des surfaces.....	31
A.2. Mesure de l'angle de frottement interne.....	32
B. Imbrication.....	32
II.3.6. Influence de l'eau interstitielle.....	34
a) Les pressions interstitielles.....	34
b) La présence de l'eau.....	34
c) La variation de l'angle de frottement résiduel $\varphi_r$ .....	35
II.3.7. La fréquence des discontinuités ( $\lambda$ ).....	35
II.3.8. La projection stéréographique des discontinuités.....	35
II.4. Représentation des orientations sur des diagrammes.....	36
III. Conclusion.....	37

## Chapitre II : Classification géomécanique des massifs rocheux

II.1 Introduction.....	38
II. Les buts des systèmes de classification des massifs rocheux.....	38
III. Les différents systèmes de classification des massifs rocheux.....	38
III.1 Système du RQD (Rock Quality Designation).....	39
A. Principe de calcul du RQD.....	39

# Sommaire

---

B. Classification de massifs rocheux par RQD.....	40
III.2 Système du RMR (Rock Mass Rating).....	40
A. Principe de calcul du RMR.....	41
B. Estimation des caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir du RMR.....	43
a) La cohésion.....	44
b) L'angle de frottement.....	44
c) Le module de Young.....	44
C. Limitations du système RMR.....	44
III.3 La méthode de N.Barton (Q-système).....	44
A. Généralités.....	44
IV. Conclusion.....	46

## Chapitre III: analyse de la théorie d'abattage des roches à l'explosif

I. Introduction.....	47
II. La théorie du travail à l'explosif.....	47
II.1. Types d'explosifs utilisés dans les carrières.....	48
II.2. Travail de l'explosif.....	49
II.3 Mécanisme de l'explosion.....	50
II.4. Abattage de la roche.....	52
II.5. Processus technique de tir.....	52
II.6. Mécanismes de la Fragmentation.....	54
II.6.1. Effet général des ondes de choc dans le massif rocheux.....	54
a) Zone de broyage.....	54
b) Zone de fissuration radiale.....	55
c) Zone sismique.....	56
II.6.2. Effet des ondes réfléchies.....	56
II.6.3. Fragmentation finale et mise en mouvement.....	57
6.3.1. Effet de la présence d'une face libre.....	57
6.3.2. Effet des gaz libérés: fragmentation finale.....	57
II.6.4. Autres théories de la fragmentation.....	57
6.4.1. Fragmentation due au cisaillement et à la collision des blocs pendant la projection.....	58
6.4.2. Rupture.....	58
6.4.3. Théorie de la comminution.....	58

# Sommaire

---

II.7 Paramètres liés aux Tirs.....	60
II.7.1 Données de base de la mise en œuvre d'un tir minier.....	60
II.7.2. Les paramètres géométriques.....	61
II.7.3. Les paramètres liés à l'énergie explosive.....	62
III. Conclusion.....	63

## **Chapitre IV: Effets de discontinuités sur le résultat de tir**

I. Influence du massif rocheux sur les tirs.....	64
I.1 Influence de la matrice rocheuse.....	64
I.2 Influence de l'hétérogénéité du massif.....	65
I.3 L'influence des discontinuités.....	69
I.3.1. Influence de la blocométrie du massif.....	70
I.3.2 Influence de l'orientation des discontinuités.....	71
II. Conclusion.....	75
<b>Conclusion général.....</b>	<b>76</b>

## **Bibliographie**

# Liste de tableau

Nombre de tableau	Titre de tableau	La page
<b>Chapitre I</b>		
Tableau I.1	Echelle de dureté de Mohs	08
Tableau I.2	Classification des roches en fonction de la résistance à la compression	11
Tableau I.3	Classification des roches en fonction de la résistance à la traction	13
Tableau I.4	Description de l'espacement des discontinuités	21
Tableau I.5	Description des discontinuités selon la mesure des ouvertures	22
Tableau I.6	Classification des discontinuités selon leur extension	23
Tableau I.7	Classification des discontinuités en fonction d'ID (d'après B.R.G.M.- Guide de prospection des matériaux de carrière).	26
<b>Chapitre II</b>		
Tableau II.1	Classification RQD du massif rocheux	40
Tableau II.2	Classification RMR (Bieniawski, 1989)	42
Tableau II.3	Classes et propriétés globales des massifs rocheux	43
Tableau II.4	Qualité du massif rocheux selon Barton	46
<b>Chapitre III</b>		
Tableau III.1	résume les caractéristiques des explosifs fabriqués en Algérie par l'ONEX	49
Tableau III.2	Paramètres de tir de mines	60
<b>Chapitre IV</b>		
Tableau IV.1	La matrice et son influence sur le tir	64
Tableau IV.2	Type d'hétérogénéités rencontrées dans un massif sédimentaire	67
Tableau IV.3	Les discontinuités et leur influence sur le tir	70
Tableau IV.4	Avantages et inconvénients des plans de tir à partir de la structure géologique du massif rocheux	72
Tableau IV.5	Hydrogéologie et influence des conditions hydrologiques sur le tir	75

## Liste de figure

Nombre de figure	Titre de figure	La page
<b>Chapitre I</b>		
Figure I.1	Structure géométrique d'un massif rocheux de calcaire au Nord du Liban	03
Figure I.2	Les différentes échelles d'un massif de la masse rocheuse	04
Figure I.3	Diagramme contrainte-déformation	09
Figure I.4	Dispositif expérimental.	11
Figure I.5	Schéma de la compression uni-axiale	11
Figure I.6	Essai de traction directe.	12
Figure I.7	Dispositif expérimental	13
Figure I.8	Schéma de la Traction indirecte	13
Figure I.9	Principe du Cisaillement directe	14
Figure I.10	Principe du cisaillement simple	14
Figure I.11	Principe de l'essai Triaxial	15
Figure I.12	Plis dans une strate montrant des diaclases (j	16
Figure I.13	Une Faille Normale	17
Figure I.14	Les failles	17
Figure I.15	Joint de stratification et joint tectonique	17
Figure I.16	Orientation d'un plan de discontinuité	19
Figure I.17	L'extension	20
Figure I.18	Mesure de l'espacement	21
Figure I.19	Fissure ouverte et fissure remplie	22
Figure I.20	Persistance de différents ensembles de fractures	23
Figure I.21	Caractéristiques des discontinuités dans un massif rocheux	24
Figure I.22	Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC)	25
Figure I.23	Courbes de résistance au cisaillement suivant un plan horizontal	28
Figure I.24	Schéma de Cisaillement suivant un plan incliné	29
Figure I.25	Influence de la rugosité sur les résistances résiduelle et de pics.	30
Figure I.26	Modèle de fissure à rugosité hétérogène	30
Figure I.27	Les mesures de Patton des angles de rugosité (i) pour le premier et le second ordre des projections sur les surfaces des roches rugueuse	32
Figure I.28	Modèles schématiques d'imbrication des blocs du massif rocheux	33
Figure I.29	Morphologie des épontes des discontinuités	34
Figure I.30	Mesure de la fréquence des discontinuités	35
Figure I.31	Représentation stéréographique	36
<b>Chapitre II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Une carotte	39
<b>Figure II.2</b>	Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR	41

## Liste de figure

<b>Chapitre III</b>		
<b>Figure III.1</b>	Propagation de l'onde de détonation	50
<b>Figure III.2</b>	Diagramme de Harries et Mercer	53
<b>Figure III.3</b>	Schéma du dispositif géométrique d'un tir	53
<b>Figure III.4</b>	Développement de la fissuration et de la fracturation, (phase 1 à 4)	55
<b>Figure III.5</b>	Schéma de la fragmentation par la rupture flexurale	58
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Figure IV.1</b>	Classification de l'aptitude d'un massif rocheux à être abattu en fonction de sa Blocométrie et de son impédance	65
<b>Figure IV.2</b>	Risques de projection liés à la présence de zones de faiblesse	67
<b>Figure IV.3</b>	Adaptation du chargement des trous de tir à l'hétérogénéité de compétence du massif rocheux	68
<b>Figure IV.4</b>	Blocs hors format gênant le chargement et le réemploi	69
<b>Figure IV.5</b>	Déviations de foration dues à la structure Géographique du massif : présence d'une famille de plans de discontinuité majeure	69
<b>Figure IV.6</b>	Adaptation du plan de tir à partir de la structure géologique du massif rocheux	71
<b>Figure IV.7</b>	Orientation des tirs et séquençement en fonction de la structure géologique du massif	73
<b>Figure IV.8</b>	Influence de la présence d'une discontinuité majeure sur la sortie du pied de tir	74

## Notation

---

### Notation

C : La cohésion;	[KN/m <sup>2</sup> ]
n : La porosité;	
ρs : masse volumique;	[g/cm <sup>3</sup> ]
Ms : la masse du matériau sec;	[g]
Vs : le volume des grains après broyage;	[Cm <sup>3</sup> ]
Vt : le volume de l'échantillon;	[Cm <sup>3</sup> ]
Mh : la masse naturelle;	[g]
MSat : la masse de l'échantillon saturée;	[g]
ρd : dépend de la porosité de la roche, par contre ρs ne dépend que de la minéralogie;	
w : La teneur en eau;	
Mw : est la masse d'eau;	
Mt : est la masse totale de l'échantillon;	
Ms : est la masse sèche des grains solides;	
Sr : Le degré de saturation;	
Vw: volume de l'eau dans l'échantillon;	[Cm <sup>3</sup> ]
Vv : volume des vides;	[Cm <sup>3</sup> ]
ID : Le degré de fissuration des roches;	
L : longueur de la partie étudiée du massif;	[m]
n : nombre de fissures sur la partie mesurée;	
E: Module de Young;	[KN/m <sup>2</sup> ]
σ : est la contrainte;	
RC: Résistance à la compression;	[kgf/cm <sup>2</sup> ]
F : effort (charge) maximale atteinte (juste avant la rupture);	
S : la surface de la section de l'éprouvette sur laquelle on applique l'effort F;	
Rt : Résistance à la traction;	[kgf/cm <sup>2</sup> ]
Pmax : valeur finale atteinte par l'effort appliqué;	
A0 : surface transversale;	
Fmax : la charge maximale appliquée;	
D et L : dimensions de l'éprouvette cylindrique;	
τ : est la résistance au cisaillement;	
σN: est la contrainte normale;	
Φ : L'angle de frottement interne.	

## Abréviation

---

### Abréviation

**FERPHOS** : Entreprise nationale du fer et du phosphate;

**SOMIPHOS**: Société des Mines de Phosphates;

**JRC**: Joint Roughness Coefficient;

**RMR**: Rock Mass Rating;

**RQD**: Rock Quality Designation;

**SMR**: Slope Mass Rating;

**SONAREM** : Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minières;

**ISRM**: International Society for Rock Mechanics;

**BRGM** : Bureau de recherches géologiques et minières;

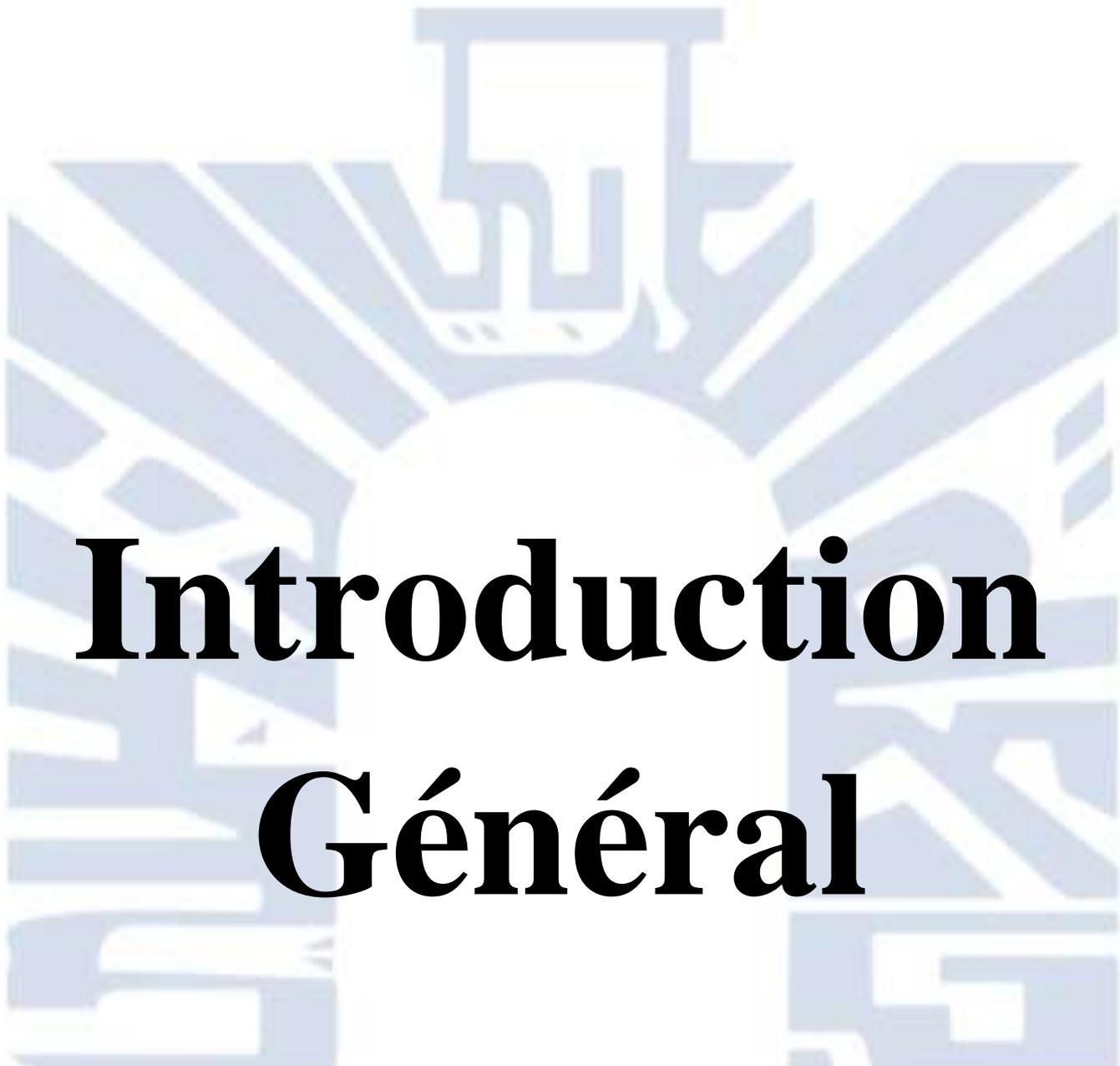
**S.D.O**: Société de Djebel Onk;

**SERMI**: Société Entretien Réparation Matériel Incendie;

**SOFREMINES**: Société Française D'études Minières;

**GSI**: Geological Strength Index;

**ONEX**: Office National Des Substances Explosives.



# **Introduction Général**



جامعة العربي التبسي - تبسة  
Universite Larbi Tebessi - Tebessa

### Introduction générale

Si l'on possède maintenant une assez bonne connaissance des mécanismes de la transmission de l'énergie explosive au massif rocheux, la quantification de cette transmission et l'influence des caractéristiques du massif sur celle-ci sont encore du domaine de la recherche scientifique. Il est clair que l'interaction du massif est primordiale.

Facilement fragmentable, il est nécessaire de préparer un plan de tir adéquat. C'est le cas quotidiennement dans les exploitations de roches ornementales. Par contre, il est très difficile d'abattre un massif de nature hétérogène, très fracturé ou karstifié, particulièrement si les discontinuités sont ouvertes (massif décomprimé). Non seulement le rendement du tir sera en deçà du niveau préconisé, mais les conditions opératoires deviendraient complexes : paramètres de la foration inadéquats, instabilité des parois des trous de tir, présence d'eau, difficultés de chargement de l'explosif, risques de rupture du circuit d'amorçage, effets arrières importants...

Plusieurs études ont montré et mis en exergue les effets importants des discontinuités naturelles sur les résultats des tirs miniers.

Dans les cas extrêmes, elles conditionnent même les résultats des tirs plus que les propriétés physico-mécaniques du massif ou de l'explosif - Belland (1966), Amdhane (1987).

Ces discontinuités peuvent intervenir selon leurs orientations, fréquences, continuité, matériaux de remplissage, épaisseur et caractéristiques mécaniques...

L'abattage des roches à l'explosif est le plus important maillon dans la chaîne technologique d'extraction des roches minières. La recherche systématique de tir des roches a fourni une bonne compréhension des nombreux facteurs qui influencent la fragmentation. Par conséquent, l'obtention d'un contrôle précis de ces facteurs est un défi constant. Il semble raisonnable de dire que la fragmentation à l'explosif est le résultat d'un problème couplé impliquant l'initiation et la propagation des fissures dans un milieu initialement intact et la formation de fragments isolés. La fragmentation joue un rôle important dans une grande variété de processus industriels dans laquelle on désire causer la fragmentation de la manière la plus efficace et la plus contrôlée.

Le premier chapitre traite essentiellement de la caractérisation des massifs rocheux.

## Introduction générale

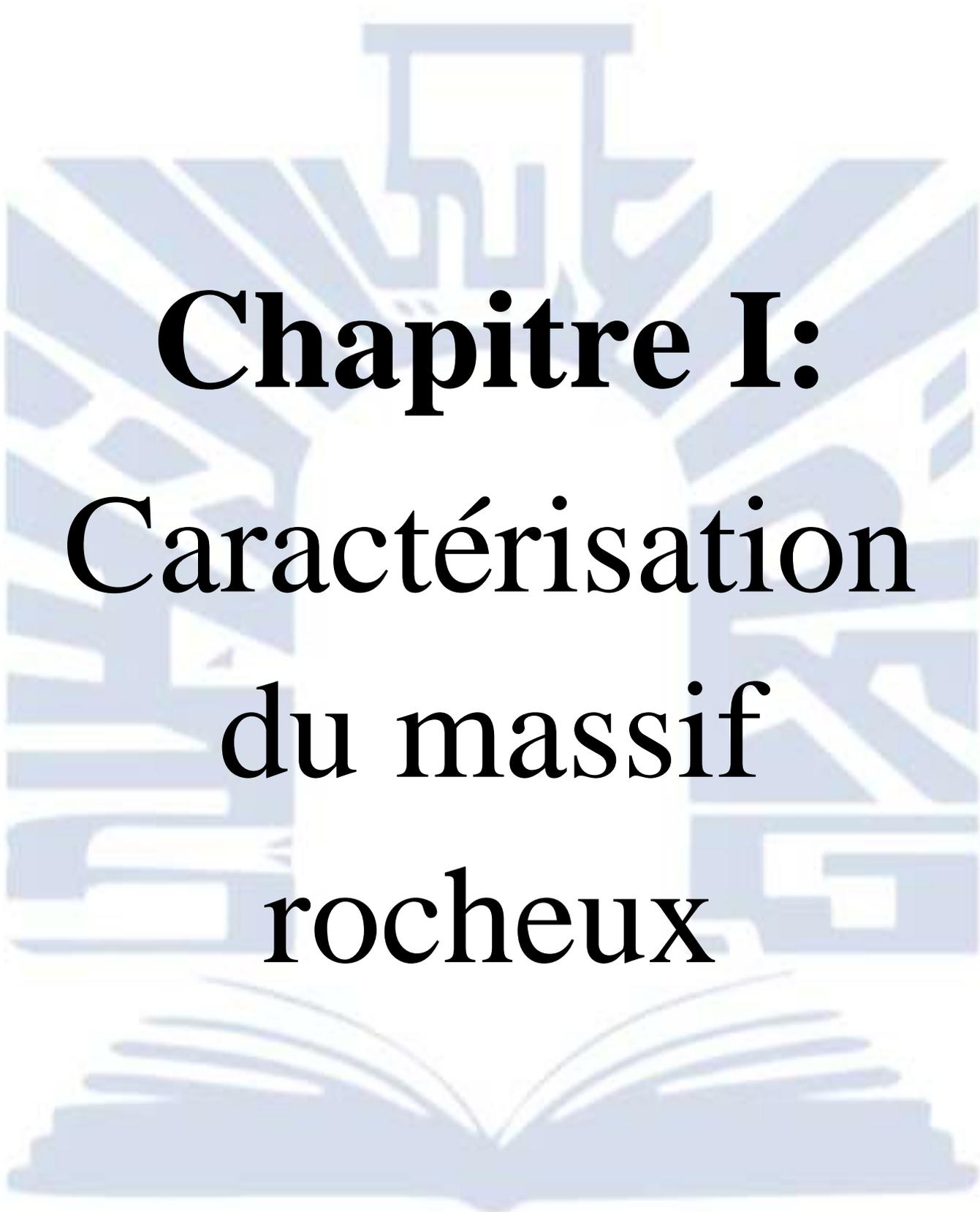
---

Dans le second chapitre, nous avons présenté plusieurs méthodes de classification empiriques des massifs rocheux. Nous retenons quelques remarques essentielles: L'utilité d'emploi des systèmes de classification est variable d'un problème à l'autre selon l'échelle de problème, les systèmes de classification empiriques (RMR, RQD, SMR...) sont fréquemment utilisés dans le calcul des ouvrages miniers. Le recours à ce type de classification doit être limité à la phase préliminaire de l'avant-projet (conception, étude de faisabilité ...).

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'abattage des roches à l'explosif et d'identifier les paramètres qui peuvent influencer l'opération de tir et indiquer la manière dont ces paramètres, pris isolément, pourraient affecter la fragmentation.

Dans le dernier chapitre, il est question de l'étude de l'influence des discontinuités naturelles sur l'abattage des roches à l'explosif.

Dans le travail que nous avons mené, nous avons initié une modeste expérimentation in situ afin de déterminer l'importance de l'influence des discontinuités et l'orientation des fissures sur le résultat final de l'abattage des roches. Pour des raisons exogènes et indépendantes de notre volonté, cette expérimentation n'a pu être menée à terme, il serait intéressant de la reprendre ultérieurement.



# **Chapitre I:**

# **Caractérisation**

# **du massif**

# **rocheux**

جامعة العربي التبسي - تبسة  
Universite Larbi Tebessi - Tebessa

## Chapitre I:Caractérisation du massif rocheux

### I. Introduction

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

### II. Généralités sur les massifs rocheux

Les massifs rocheux sont des milieux essentiellement discontinus. Ils consistent en un assemblage de matériaux rocheux, de même nature ou de natures différentes, divisées en blocs de formes plus ou moins variées par des discontinuités diverses.

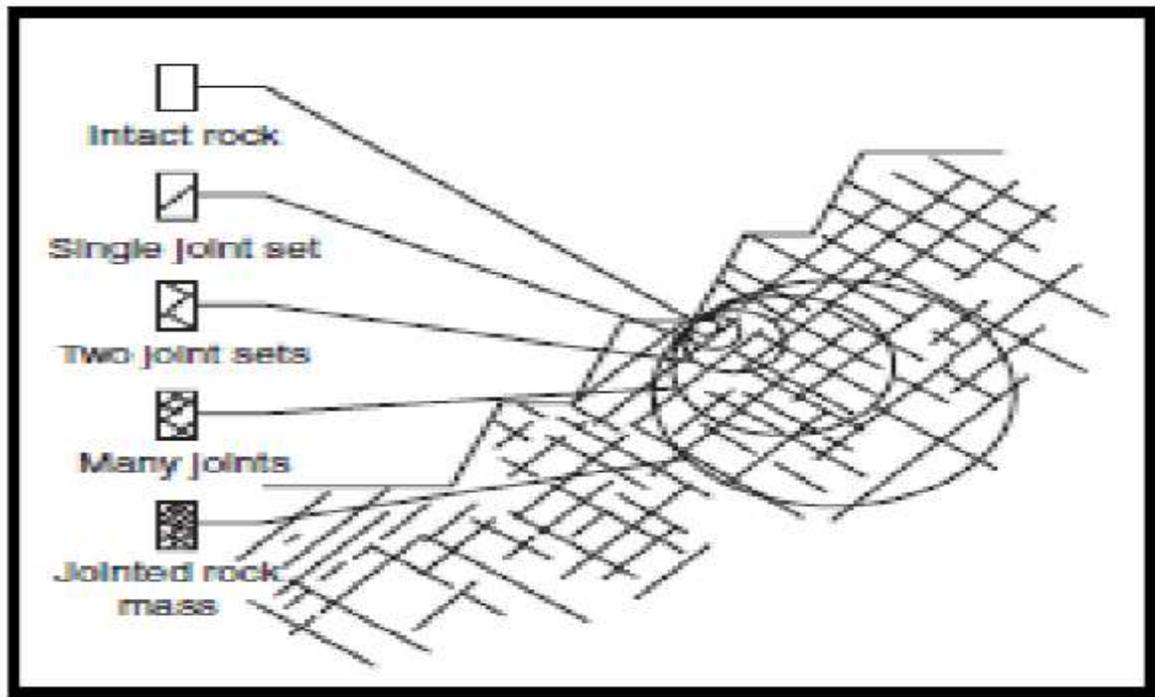
Les massifs rocheux peuvent être qualifiés de milieux discontinus, hétérogènes, anisotropes. Ces trois caractéristiques vont contrôler, séparément ou ensemble, leur comportement mécanique et hydraulique. Il convient donc, dès le stade initial des études, d'en obtenir la description la plus précise possible. Un massif rocheux est caractérisé par une matrice correspondant à l'assemblage des différents constituants minéraux et par un réseau de discontinuités lié à son histoire géologique. [17]



**Figure I.1.** Structure géométrique d'un massif rocheux de calcaire au Nord du Liban.

En règle générale, on considère que les massifs rocheux sont constitués de :

- ✓ **Roches intactes** : ce sont des blocs de roches ou d'un assemblage de minéraux non affectés par les discontinuités.
- ✓ **Une famille ou plus de discontinuités séparant les blocs de roches intactes.**  
Donc la description et la caractérisation des massifs rocheux nécessite de prendre en considération les propriétés de la roche intacte et celles des discontinuités.



**Figure I.2.** Les différentes échelles d'un massif de la masse rocheuse.

## II.1 Matrice rocheuse

La matrice rocheuse est définie comme un volume de roche intacte qui possède des propriétés homogènes et non coupée par des discontinuités. La matrice rocheuse fait ainsi référence aux blocs non-fracturés situés entre les discontinuités structurales. En fonction des caractéristiques du massif rocheux et de son histoire géologique, la taille de ces blocs peut varier de quelques millimètres à plusieurs mètres. [2]

- **Type géotechnique de la roche**

Le type de la roche est indiscutablement le paramètre le plus important, qui définit toutes les autres caractéristiques de la matrice et du massif. Les propriétés les plus importantes de la matrice rocheuse d'un point de vue de la stabilité des talus sont :

- ❖ La dureté de la roche, qui peut s'exprimer par le paramètre de résistance à la Compression simple de l'échantillon;
- ❖ Le caractère et le degré d'altération, de fracturation et la solubilité de la roche;
- ❖ L'aptitude au gonflement, la plasticité, etc. En fonction de ces paramètres, Fissenko (1965) propose de partager les roches en 5 classes :
  - Les roches dures, avec  $R_c$  (résistance à la compression)  $> 80$  MPa, peu altérables, non gonflantes : les roches magmatiques et métamorphiques et certains calcaires et grès, pas fracturés, pas ou peu altérés ;
  - Les roches semi dures, avec  $8 < R_c < 80$  MPa, fracturées, intensivement altérables, non gonflantes, non plastiques : roches magmatiques et métamorphiques altérées, grès argileux, schistes, argilites, pélites, marnes, conglomérats calcaires, calcaires détritiques, charbons ;
  - Les roches faibles (argileuses), avec  $R_c < 8$  MPa, gonflantes, plastiques, très fortement altérables : roches magmatiques et métamorphiques très fortement altérées ou complètement désintégrées, ainsi que les roches de la seconde classe altérées, toutes les argiles, loess, sables argileux, les limons, craies, certains alluvions et moraines ;
  - Les roches non cohérentes, sans cohésion, dont les angles de frottement et de talus naturel sont de  $28-38^\circ$ , non plastiques, non gonflantes : les zones caillouteuses au pied des talus des roches des deux premières classes, graviers et sables purs ;
  - Les vases, les tourbes, et les sols mouvants, avec une cohésion  $< 20$  KPa, le frottement interne absent en état saturé. [4]

## II.2. Les propriétés physico-mécaniques des roches

Les propriétés physico-mécaniques des roches et des sols sont une source capitale dans la compréhension de leur comportement dont la complexité est avérée, elles ont une grande

influence sur la stabilité des talus et des pentes. Parmi les propriétés physiques les plus importantes nous citerons :

- la masse volumique,
- la porosité,
- l'humidité
- la dureté...

Quant aux propriétés mécaniques, elles consistent en:

- la résistance à la compression,
- la résistance à la traction
- la résistance au cisaillement (l'angle de frottement interne et la cohésion)
- ...

## A. Les propriétés physiques des roches

### a. La porosité

La porosité  $n$  est, par définition, le rapport du volume des vides  $V_v$  de la roche au volume total  $V_t$

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (\text{I.1})$$

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

Les essais géotechniques au laboratoire militaire de Canada ont établi une classification des roches selon leur porosité comme suit :

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

### b. Masses volumiques

On appelle masse volumique d'un matériau  $\rho_s$  la masse de l'unité de volume de la roche (g/cm<sup>3</sup>). On définit, suivant l'état du matériau :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}; \rho_d = \frac{M_s}{V_t}; \rho_h = \frac{M_h}{V_t}; \rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{V_t} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

$M_s$ : la masse du matériau sec ; en grammes [g].

$V_s$ : le volume des grains après broyage ;  $\text{cm}^3$ .

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

$M_h$ : la masse naturelle ; [g].

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

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

### c. La teneur en eau

La teneur en eau  $w$  est le rapport de la masse d'eau ( $M_w$ ) à la masse du solide ( $M_s$ ).

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$M_w$ : masse d'eau.

$M_t$ : masse totale de l'échantillon.

$M_s$ : masse sèche des grains solides.

### d. Le degré de saturation

C'est le rapport du volume de l'eau contenue dans l'échantillon au volume des vides. [5]

$$S_r = (V_w / V_v) * 100 \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$V_w$ : volume de l'eau dans l'échantillon,  $\text{cm}^3$  ;

$V_v$  : volume des vides,  $\text{cm}^3$ .

### e. La dureté

La dureté d'un minéral est due à la structure du cristal lui-même : comment les atomes qui le forment, à l'échelle microscopique, sont organisés. Plus ces atomes sont liés fortement entre eux, plus le minéral sera dur. C'est donc une propriété propre au minéral, et

elle permet de le reconnaître. Certains minéraux peuvent changer de couleur, mais pas de dureté. La mesure de la dureté permet donc de reconnaître un minéral.

Le scientifique, Friedrich Mohs, a eu l'idée de choisir dix minéraux, et de les classer du plus tendre au plus dur ; ils sont numérotés de 1 à 10, et servent d'échelle : c'est ce que l'on appelle l'échelle de Mohs : [6]

**Tableau I.1:** Echelle de dureté de Mohs.

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

Il existe aussi des pointes de métal numérotées et créées spécialement pour cela : chacune a une dureté égale à un des minéraux de l'échelle de Mohs : ils sont très pratiques pour mesurer la dureté, surtout quand le scientifique travaille en exploration sur le terrain. Cette mesure de la dureté est essentiellement réservée aux pierres calcaires. La détermination de la largeur d'une rayure fournit pour chaque matériau une valeur chiffrée de la dureté. Ceci présente l'avantage de pouvoir mettre en relation les valeurs de dureté avec celles se rapportant à des caractéristiques physiques et mécaniques [7].

La caractéristique de dureté s'obtient par la mesure de la largeur d'une rayure faite sur la surface rectifiée d'un bloc de pierre.

La valeur obtenue est en relation avec la difficulté de taille et l'usure des instruments. La largeur des rayures varie en général de 0,1 mm pour les pierres les plus dures à 3,5 mm pour les plus tendres.

#### f. Module de Young

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

La loi d'élasticité est la loi de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (I.5)$$

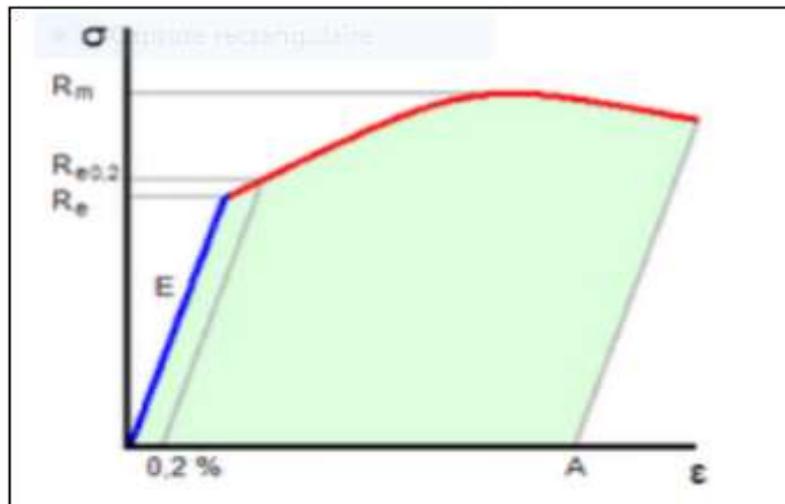


Figure I.3. Diagramme contrainte-déformation.

Avec :

- σ : est la contrainte (en unité de pression).
- E : est le module de Young (en unité de pression).
- ε : est l'allongement relatif, ou déformation (adimensionnel).

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

### g. L'abrasivité

L'abrasivité caractérise la capacité d'une roche à provoquer l'usure d'un outil tel que pièce de concasseur, taillant de forage, molette ou pic de machine foreuse. Cette propriété est importante pour les travaux d'exploitation des matériaux rocheux, en souterrain comme à ciel ouvert. Elle dépend à la fois de la teneur en minéraux durs (quartz notamment) et de la résistance de l'assemblage des grains (cohésion de la roche). [11]

### **h. L'altérabilité**

On appelle altérabilité la sensibilité d'une roche aux modifications du milieu environnant.

L'altération physico-chimique traduit la capacité de gonflement, de délitage ou de dissolution d'une roche. Divers essais existent pour quantifier l'altérabilité d'une roche ; aucun cependant ne s'est véritablement imposé.

En France, pour la réutilisation en terrassement des matériaux rocheux, il a été défini un coefficient de dégradabilité, fondé sur l'évolution granulométrique de granulats après des cycles d'immersion-séchage conventionnels : l'essai met bien en évidence le caractère évolutif des roches marneuses ou schisteuses. [11]

## **B. Les propriétés mécaniques des roches**

Les caractéristiques mécaniques des roches sont: la résistance à la compression, à la traction, à la flexion, au cisaillement, les déformations, l'élasticité, la plasticité, le module de Young (module d'élasticité), le coefficient de poisson, l'angle de frottement interne, la cohésion, la vitesse de propagation longitudinale et transversale...

### **a) Les paramètres mécaniques de la résistance**

- **Résistance à la compression**

Elle est déterminée lors des essais de compression simple. Dans cet essai, l'échantillon est pris sous la forme d'une carotte (éprouvette cylindrique), d'élancement  $L/D$  ( $L$  : hauteur,  $D$  : diamètre) compris entre 2 à 2,5 avec deux faces planes, lisses et parallèles obtenues par une rectification soignée [12].

L'échantillon est ensuite placé entre les plateaux d'une presse et la force axiale est augmentée jusqu'à la rupture de l'éprouvette. On appelle résistance à la compression (notée  $R_c$ ) la contrainte maximale supportée par l'échantillon avant la rupture lors d'un essai de compression. La valeur maximale  $F$  de la force permet de calculer la résistance en compression uni-axiale  $R_c$  de la roche :

$$R_c = F/S \text{ [en kgf/cm}^2\text{]} \quad (\text{I.6})$$

Avec:

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

**S** : surface de la section de l'éprouvette sur laquelle on applique l'effort F.



Figure I.4. Dispositif expérimental.

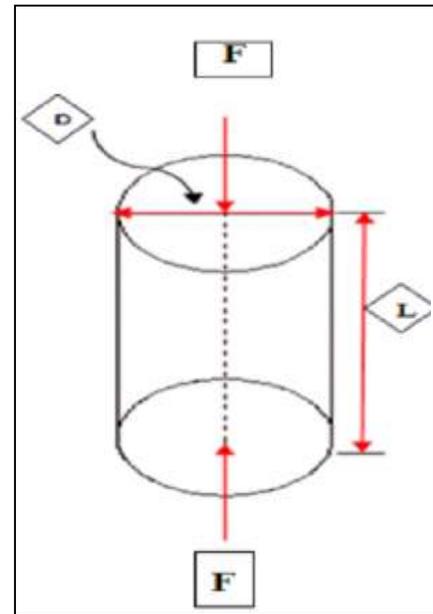


Figure I.5. Schéma de la compression uni-axiale.

Le tableau I.2 donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la compression proposée par la société internationale de mécanique des roches [12].

Tableau I.2: Classification des roches en fonction de la résistance à la compression.

Roches	Faiblement résistantes	Moyennes	Résistantes	Très Résistantes
$R_c$ (MPa)	< 5	20	60	>60

- **Résistance à la traction**

1. **Traction directe**

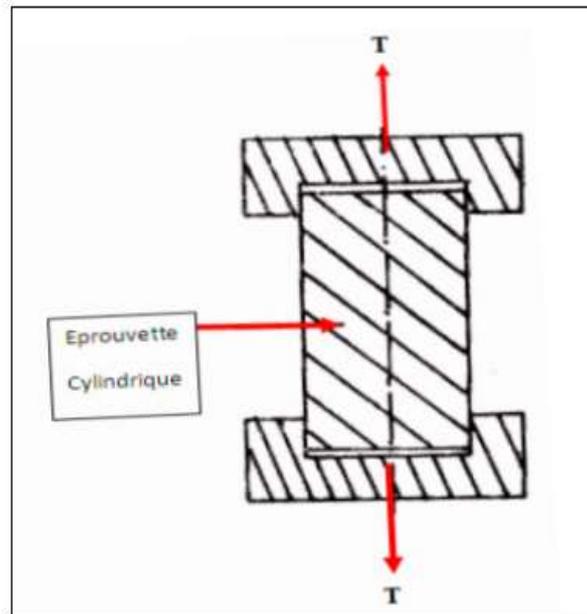
En soumettant une éprouvette cylindrique à une traction uni-axiale, la résistance à la traction simple est égale à la contrainte limite de traction qui produit la décohésion des échantillons des roches massives. [12]

$$R_t = P_{max} \times \frac{1}{A_0} \quad [\text{Kgf/ cm}^2] \quad (\text{I.7})$$

Avec:

$P_{\max}$  : Valeur finale atteinte par l'effort appliqué;

$A_0$  : surface transversale.



**Figure I.6.** Essai de traction directe.

## 2. Traction indirecte

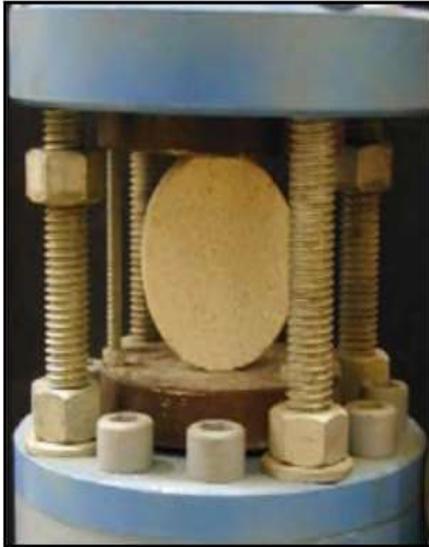
L'essai de résistance à la traction indirecte, dit aussi essai brésilien, est réalisé en comprimant entre les plateaux de la presse une éprouvette cylindrique le long de deux génératrices opposées. La rupture est obtenue par traction au centre de l'éprouvette. On évite ainsi les difficultés de collage des têtes nécessaires dans les essais de traction directe. Si  $F$  est l'effort fourni par la presse au moment de la rupture,  $D$  le diamètre de l'éprouvette et  $L$  sa hauteur, la résistance à la traction indirecte est donnée par la formule suivante [12]:

$$R_t = (2F_{\max}) / (\pi \cdot D \cdot L) \quad (\text{I.8})$$

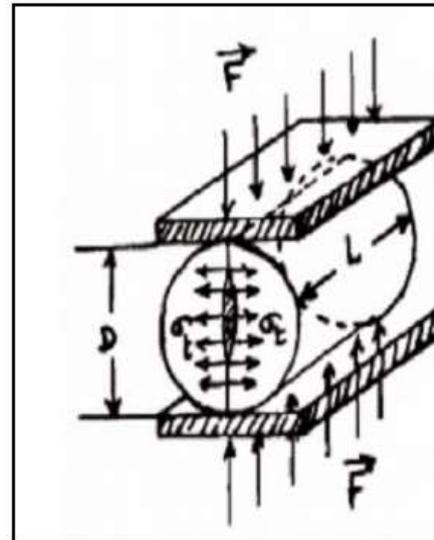
Avec:

$F_{\max}$  : la charge maximale appliquée;

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



**Figure I.7.** Dispositif expérimental.



**Figure I.8.** Schéma de la Traction indirecte.

Le tableau I.3 donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la traction proposée par la société internationale de mécanique des roches. [12]

**Tableau I.3:** Classification des roches en fonction de la résistance à la traction.

Roches	Faiblement	Moyennes	Résistantes	Très
$R_t$ (Mpa)	0.40	1.50	4.00	>20

### 3. La résistance au cisaillement

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

[13] On distingue :

- Cisaillement direct;
- Cisaillement simple;
- Cisaillement triaxial.

#### a. Cisaillement direct

En mécanique des sols, les premiers types d'essai sont historiquement les essais de cisaillement direct. L'appareillage nécessaire pour effectuer cet essai est la boîte de Casagrande. Le principe consiste à cisailer une éprouvette suivant un plan déterminé à

l'avance en exerçant un effort normal constant et un effort tangentiel croissant. Les contraintes appliquées sont totales au départ.

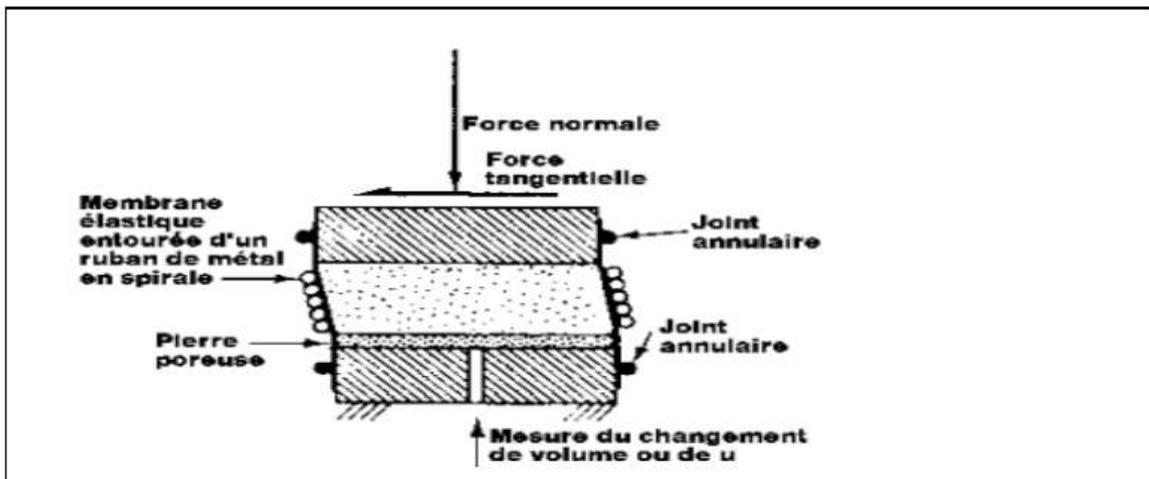


Figure I.9. Principe du Cisaillement directe.

### b. Cisaillement simple

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

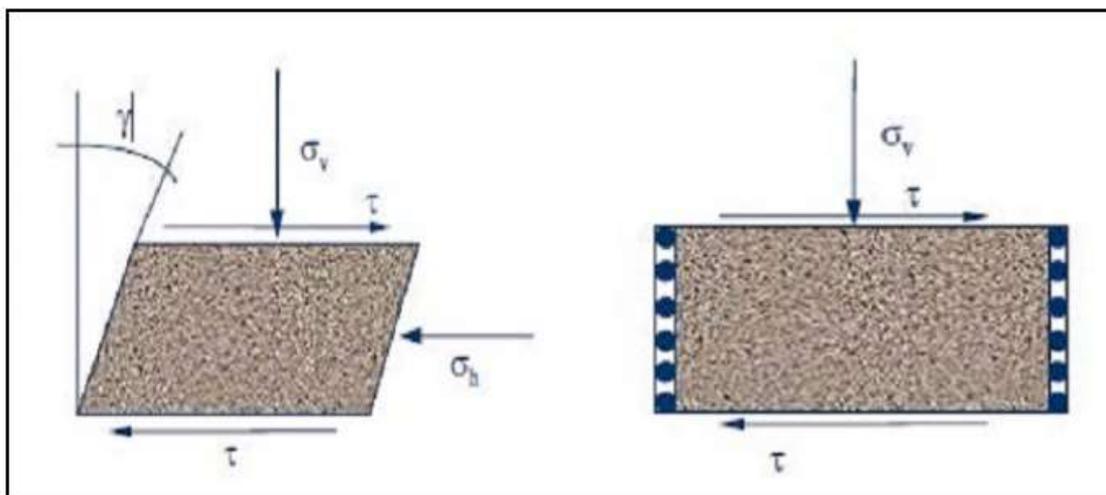


Figure I.10. Principe du cisaillement simple.

### c. Cisaillement triaxial

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

Il est réalisé en soumettant un échantillon cylindrique à une pression hydrostatique de confinement  $\sigma_c$  (contrainte dans la cellule). Une contrainte dévia-torique est appliquée verticalement.

Puisque aucune contrainte extérieure de cisaillement n'est appliquée, les contraintes horizontale et verticale sont des contraintes principales. [13]

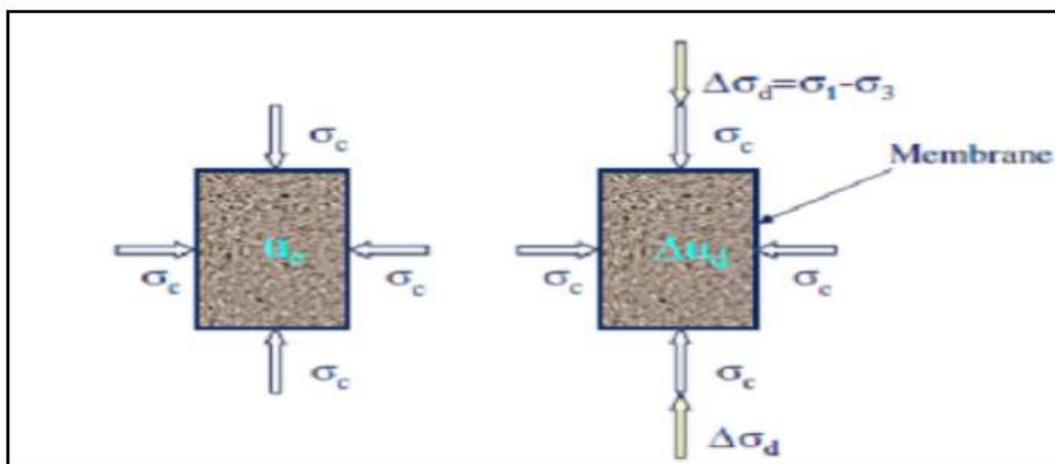


Figure I.11. Principe de l'essai Triaxial.

### II.3 Discontinuités

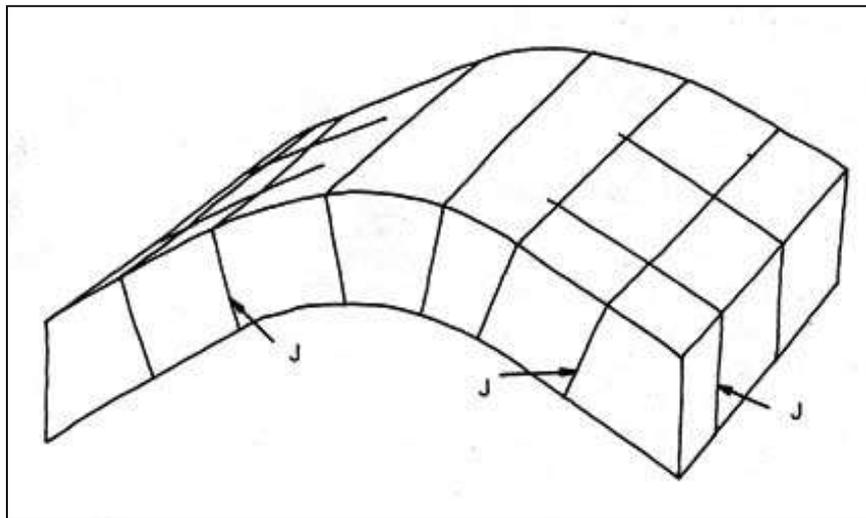
Le terme **discontinuité** est utilisé pour désigner toute surface qui interrompt physiquement la continuité d'une matrice rocheuse et de ses propriétés mécaniques, hydrauliques et thermiques. Cette surface est en général assimilable, sur une certaine étendue, à un plan.

Les discontinuités représentent des types de surfaces très variées dont l'identification géologique, depuis l'échelle millimétrique jusqu'à l'échelle kilométrique, apporte des informations importantes sur le nombre de leurs paramètres géométriques et mécaniques.

### II.3.1 Types de discontinuités

Les principales discontinuités dans les massifs rocheux se présentent sous les formes suivantes :

- **Les diaclases:** Elles correspondent à une rupture de type fragile. Elles peuvent être des plans liés à la diagenèse et au retrait de la roche pour certains ou d'origine tectonique pour d'autres. Quoi qu'il en soit, dans les roches stratifiées, les diaclases se présentent pratiquement toujours sous la forme de deux familles orthogonales entre elles et perpendiculaires aux plans de stratification. Les diaclases découpent ainsi des éléments parallélépipédiques facilitant les chutes de blocs;



**Figure I.12.** Plis dans une strate montrant des diaclases (j).

- **Les failles (fractures) :** Se sont des surfaces de rupture générées par les effets de cisaillement issus des contraintes de compression (failles inverses ou normales selon l'orientation des contraintes principales) ou par traction.

Le déplacement des lèvres de part et d'autre du plan de la rupture (le rejet) peut avoir une amplitude nulle ou atteindre plusieurs kilomètres. Les plans de failles sont souvent marqués par des stries indiquant le sens du mouvement;

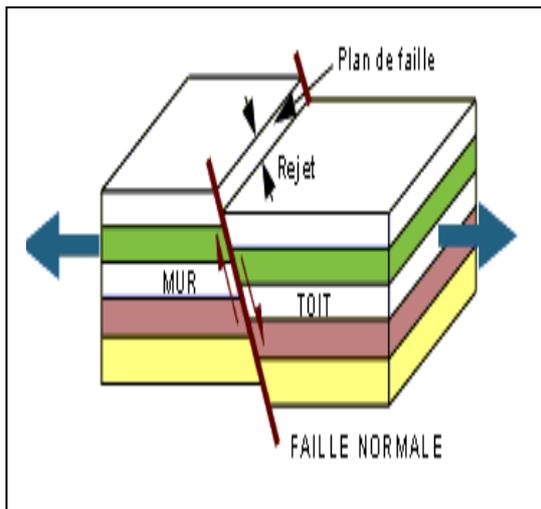


Figure I.13. Une Faille Normale.

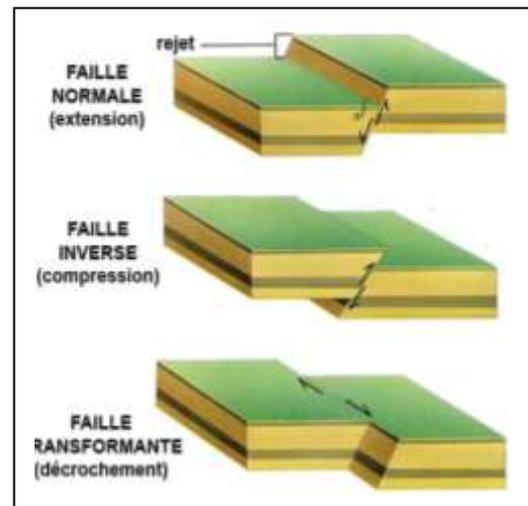


Figure I.14. Les failles.

- **Joints de stratification** : Ils marquent une discontinuité dans le phénomène de sédimentation des formations sédimentaires. Ils présentent une forte extension et souvent une faible ondulation. [3] Ils sont plus ou moins réguliers séparant les strates. Ils créent une interface de deux matériaux rocheux et ces derniers peuvent être soulignés comme de minces dépôts argileux ou schisteux favorisant le glissement.

Les joints de stratifications caractérisés par un plan de rupture préférentiel dans les roches sédimentaires et glissement bancs sur bancs;

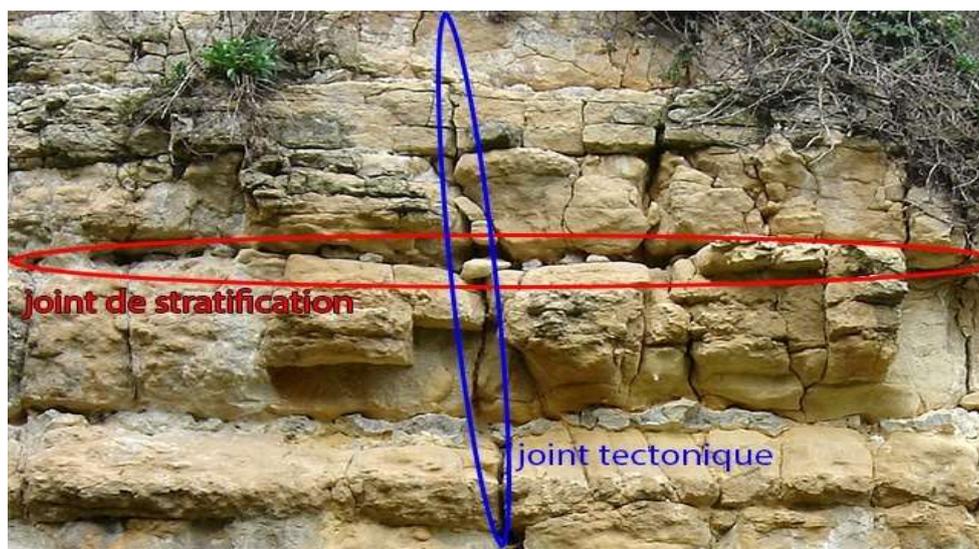


Figure I.15. Joint de stratification et joint tectonique.

- **La schistosité:** est une structure tectonique planaire. Il s'agit d'une déformation tectonique ductile, postérieurement à leur genèse, sous l'action de contraintes tectoniques. C'est une structure qui résulte d'un aplatissement qui correspond à une déformation continue homogène.

### II.3.2. Caractéristiques des discontinuités

Une famille de discontinuités est caractérisée par:

- a) Son orientation :** elle est définie par celle du plan à laquelle elle est assimilée ;
- b) Sa fréquence :** elle est inverse à l'espacement moyen entre deux discontinuités de la même famille et sa continuité.

Ces deux caractéristiques permettent de définir un bloc élémentaire permettant d'apprécier les dimensions des blocs susceptibles de s'ébouler.

- c) Sa morphologie:** rugosité, altération, remplissage... ;
- d) Ses propriétés mécaniques:** L'angle de frottement, la dureté des épontes...

### II.3.3. Paramètres géométriques

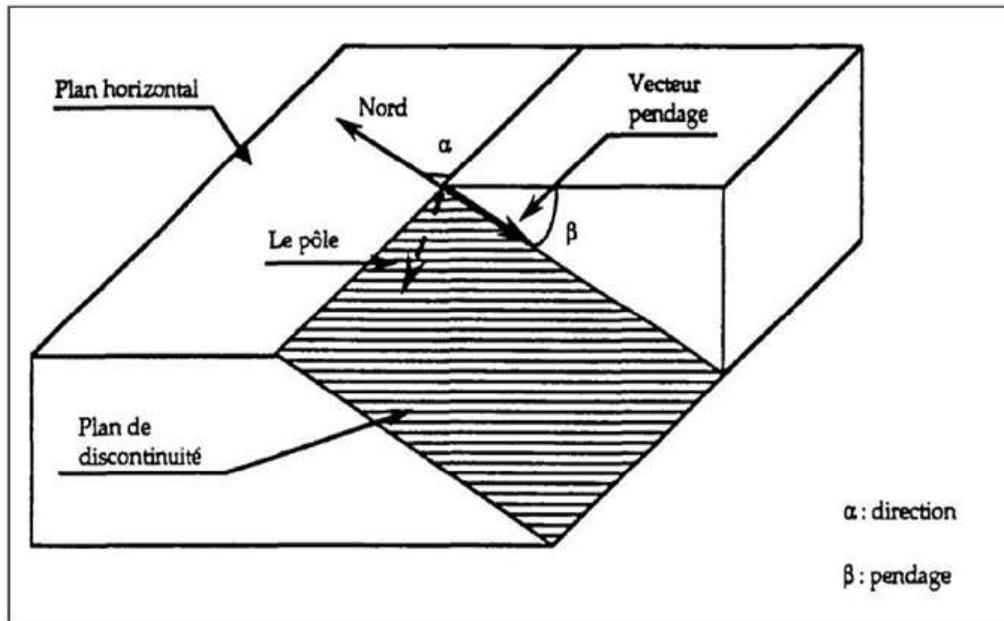
Beaucoup de discontinuités sont le résultat d'une ou plusieurs actions mécaniques que le massif a subi au cours de son histoire tectonique. A chacune de ces actions, on peut associer une ou plusieurs familles de discontinuités.

L'étude statistique fait apparaître généralement les familles de discontinuités qui existent dans le massif. Parfois, il est cependant nécessaire de renoncer à représenter le système de discontinuités par un ensemble de familles directionnelles. Les discontinuités sont toujours assimilées à des surfaces planes. On définit pour une discontinuité ou une famille de discontinuités les paramètres géométriques suivants :

#### A. Orientation

La position du plan de discontinuité est décrite par son orientation dans l'espace muni d'un repère ayant un axe parallèle au nord magnétique (Figure I.16).

L'orientation est représentée par la direction de la ligne d'intersection du plan de discontinuité et du plan horizontal, et par le sens et l'angle de pendage de la ligne de plus grande pente. [3]



**Figure I.16.** Orientation d'un plan de discontinuité. [3]

On représente aussi une discontinuité par :

- **le vecteur pendage** : Qui matérialise la ligne de plus grande pente du plan de discontinuité. Il est défini par l'azimut de sa trace sur le plan horizontal et son pendage.
- **le vecteur perpendiculaire au plan de discontinuité** : La projection stéréographique des discontinuités sur un canevas, permet de faire un classement des discontinuités en familles directionnelles. Une étude statistique permet d'identifier les familles et de dégager une loi de distribution des discontinuités au sein de chaque famille. L'orientation et le pendage peuvent être traités comme une seule variable (vecteur) ou séparément.

## B. Extension

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

L'extension peut être estimée à partir de la distribution de la longueur de trace de la discontinuité. [3]

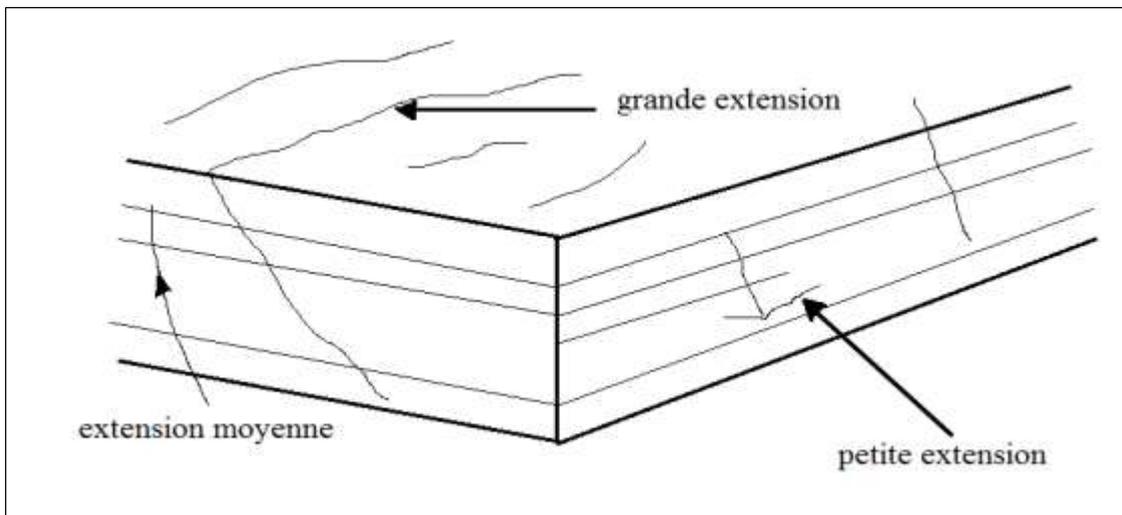


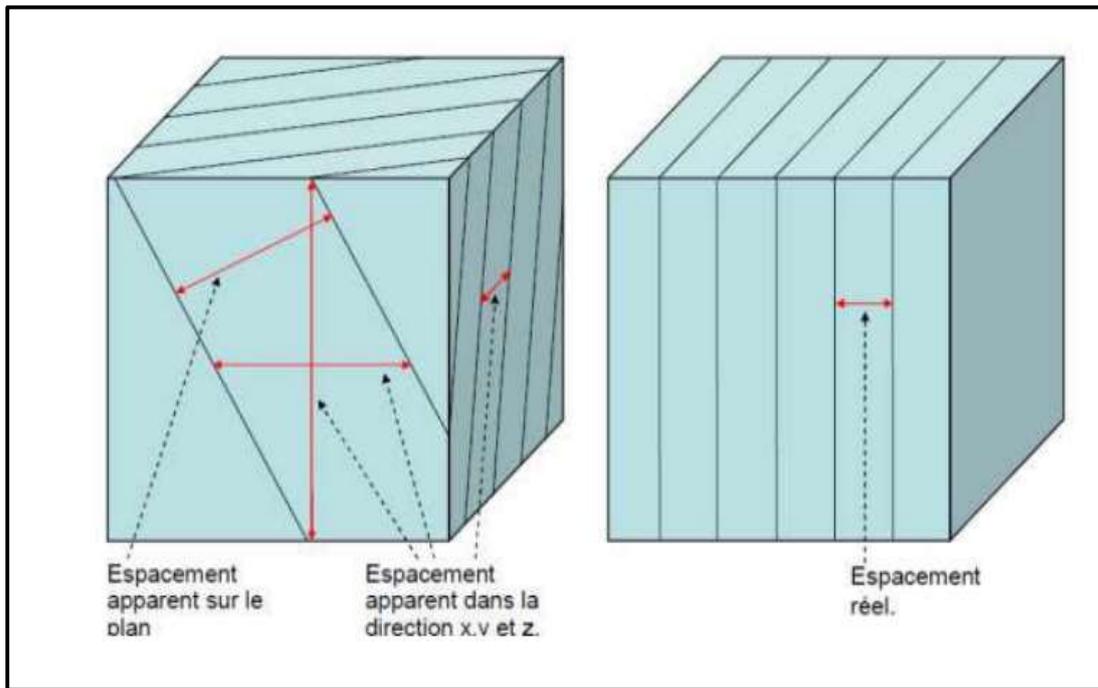
Figure I.17. L'extension.

### C. L'espace des joints et densité

L'espace représente la distance perpendiculaire entre les joints de telle façon à obtenir le véritable écart entre les plans. On mesure souvent l'espace apparent et on mesure l'espace des joints qui varie selon les différentes faces et directions de mesure. Cet espace contrôle la taille des blocs individuels et le mode de rupture et l'écoulement. La densité définit le nombre de discontinuités, d'une même famille, par unité de volume ou de surface ou de longueur.

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

Ces paramètres sont essentiels car ils donnent une idée de la fracturation moyenne du massif et de la continuité in situ du massif. [3]



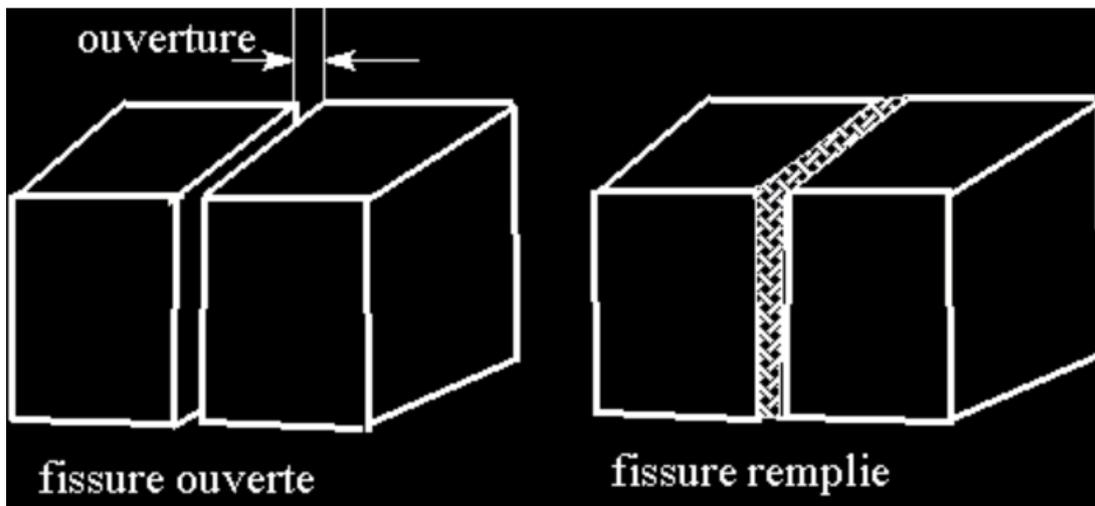
**Figure I.18.** Mesure de l'espace. [15]

**Tableau I.4:** Description de l'espace des discontinuités.

Espace des discontinuités (m)	Description
<0.02	Espace extrêmement étroit
0.02-0.06	Espace très étroit
0.06-0.2	Espace étroit
0.2-0.6	Espace modéré
0.6-2	Espace large
2-6	Espace très large
>6	Espace extrêmement large

#### D. Ouverture

C'est la distance qui sépare les deux lèvres d'une discontinuité. Elle est très difficile à évaluer à cause du remplissage de la discontinuité et de sa rugosité, elle est déterminante pour l'écoulement et le comportement mécanique des fissures. [3]



**Figure I.19.** Fissure ouverte et fissure remplie.

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

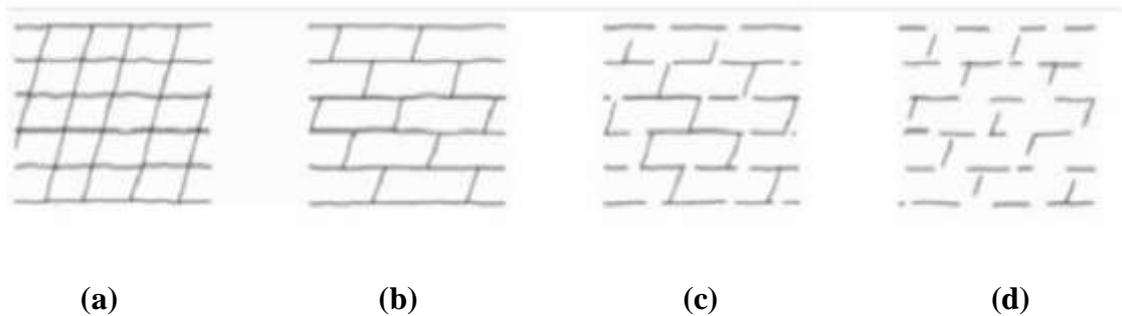
- **Matériaux tendres** : qui peuvent être rayés à l'ongle ou essuyés à la main (argile, sable);
- **Matériaux durs** : qui ne peuvent être rayés à l'ongle (minéraux comme la calcite, le quartz, ...).

**Tableau I.5:** Description des discontinuités selon la mesure des ouvertures.

Ouverture	Dispositif	Description	Dispositif
< 0.1 millimètre		Très étroit	Dispositif fermé
0.1 – 0.25 millimètre		Étroit	
0.25 – 0.5 millimètre		Partiellement ouvert	
0.5 – 2.5 millimètres		ouvert	Dispositif espacé
2.5 – 10 millimètres		Largement ouvert	
1 – 10 centimètres		Très largement ouvert	Dispositif ouvert
10 – 100 centimètres		Extrêmement ouvert	
>1 mètre		Caverneux	

### E. Persistance

C'est la mesure de la longueur continue ou de la surface d'une discontinuité. La longueur des traces des discontinuités est la seule quantification possible de la dimension des discontinuités sur le terrain.



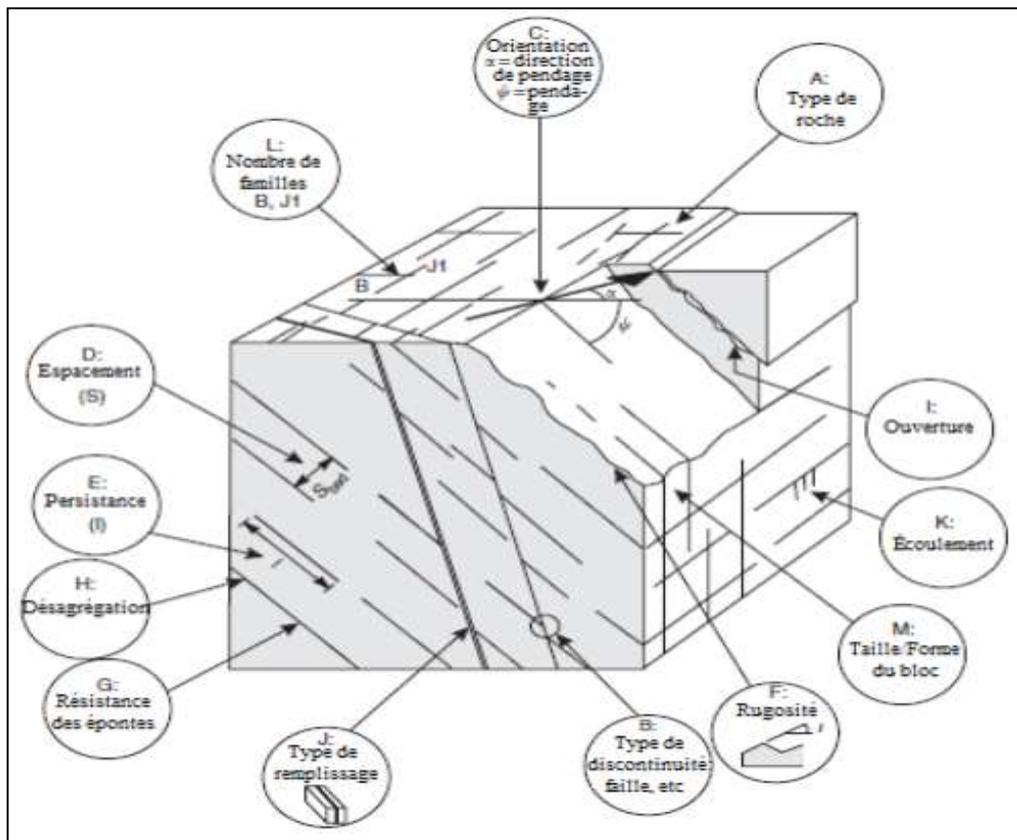
**Figure I.20.** Persistance de différents ensembles de fractures.

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

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

**Tableau I.6:** Classification des discontinuités selon leur extension.

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



**Figure I.21.** Caractéristiques des discontinuités dans un massif rocheux; traduit de Wyllie et Mah (2004). [16]

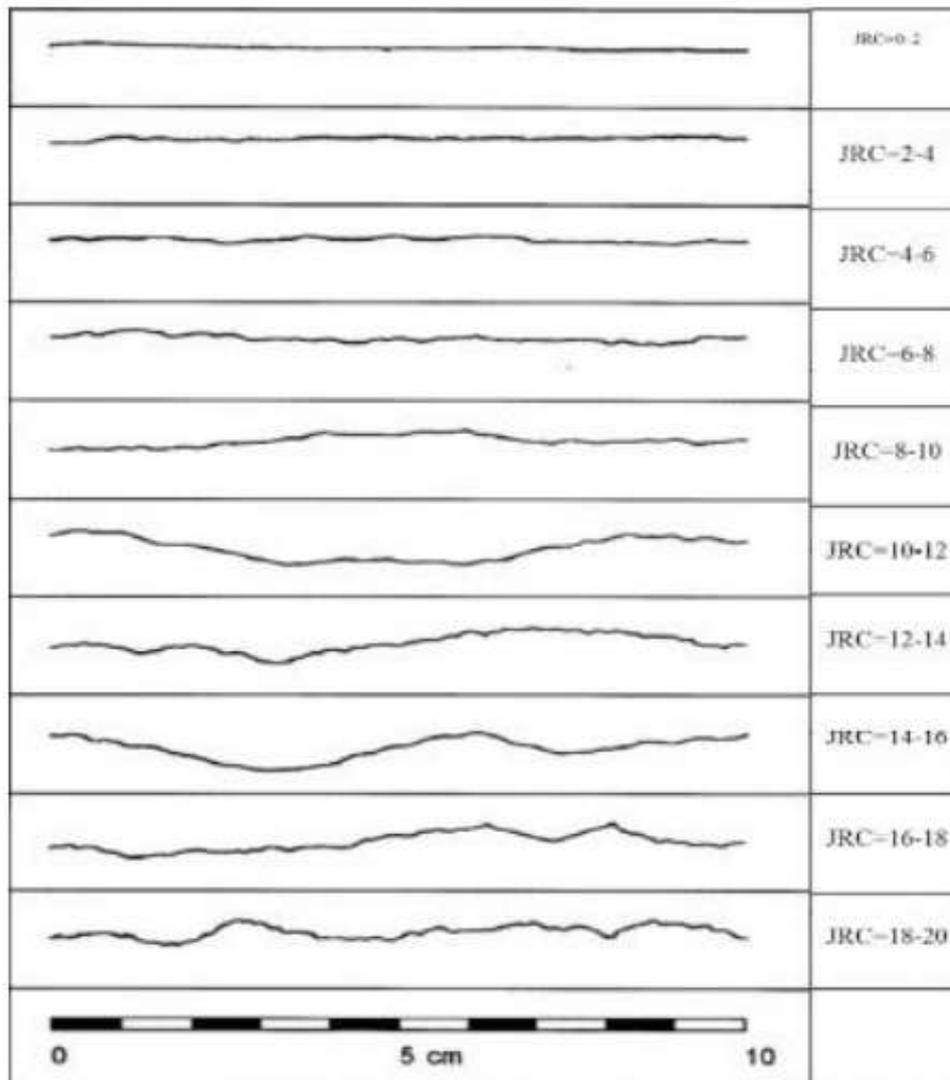
## F. Rugosité

La rugosité d'une surface de discontinuité est souvent un élément important en matière de résistance au cisaillement, en particulier là où la discontinuité est sans déplacement et imbriquée. La rugosité devient moins importante lorsque la discontinuité est remplie. Il convient d'utiliser les termes suivants :

- ✓ **Très rugueuse** : la surface est très rugueuse et présente d'importantes aspérités visuelles, semblables à du gravier fin ou de calibre moyen;
- ✓ **Rugueuse** : lorsqu'on frôle du doigt la surface, celle-ci est rugueuse comme du papier de verre à gros grains. Les aspérités peuvent être visuelles;
- ✓ **Légèrement rugueuse** : la surface est rugueuse comme du papier de verre à grain plus fins. Les aspérités ne sont pas visibles à l'œil nu;

- ✓ **Lisse** : la surface est plutôt lisse, comme du papier;
- ✓ **Miroir de faille** : la surface est très lisse, voire polie, et présente une striation due à un déplacement en cisaillement.

Un coefficient de rugosité du joint (JRC) peut être adapté : il va de 0, pour une surface plane et lisse, à 20 pour une surface très rugueuse (Voir Figure. I.13).



**Figure I.22.** Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC).

### G. Nombre de familles de discontinuités

Organisation des discontinuités en familles directionnelles Les discontinuités d'un massif rocheux n'ont pas une orientation arbitraire, mais sont souvent organisées en familles dont le nombre est lié aux phénomènes géologiques et mécaniques qui se sont produits lors de la formation puis de l'histoire tectonique du massif. L'étude de la répartition d'une population de discontinuités en familles directionnelles se fait sur la base du traitement des paramètres azimut et pendage, mais d'autres paramètres géométriques, tels que l'extension et l'ouverture, peuvent également être pris en compte.

### H. Le degré de fissuration des roches

Les fissures ou les discontinuités sont la clef du comportement des roches et des massifs rocheux. On peut les définir comme des vides plats dont le rapport de l'épaisseur à la longueur est de l'ordre de  $10^{-3}$ . Sous l'effet des charges, ces fissures se referment progressivement, donc avec un changement de géométrie et, comme pour les sols, avec une non-linéarité entre efforts et déformations, du moins tant que les fissures ne sont pas complètement fermées, ce qui se produit à des pressions variables selon les roches et leur état de fissuration, mais qui peut être de l'ordre de 25 à 50 Mpa pour un calcaire (soit la pression géostatique correspondant à une profondeur de 1000 à 2000 m) [8]. La présence des fissures a une importance considérable (à l'échelle du joint de grains). L'indice de fissuration  $ID$  est égal à la distance moyenne entre les fissures :

$$ID = \frac{L}{n} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

**L** : longueur de la partie étudiée du massif en mètre. [m]

**n** : nombre de fissures sur la partie mesurée.

**Le tableau I.7:** Classification des discontinuités en fonction d'ID (d'après B.R.G.M.- Guide de prospection des matériaux de carrière). [9]

Classe	Intervalle moyen en [m]	Densité des discontinuités
ID1	>200	Très faible
ID2	60 à 200	Faible
ID3	20 à 60	Moyenne
ID4	6 à 20	Forte
ID5	< 6	Très forte

### II.3.4. Caractéristiques mécaniques d'une discontinuité [17]

Le comportement mécanique d'une discontinuité est très complexe en comparaison avec celui de la roche intacte. Une fissure ne présente aucune résistance en traction et sa résistance au cisaillement est très faible. Ses caractéristiques mécaniques dépendent de la rugosité de ses surfaces de son ouverture et des matériaux de remplissage éventuels (quartz, calcite, argile,...). Le comportement au cisaillement des discontinuités des roches est un phénomène complexe qui traduit l'influence de nombreux paramètres.

L'appréciation de la résistance au cisaillement des discontinuités et la détermination de la marge de sécurité par rapport à la rupture sont des questions essentielles pour l'étude des problèmes de stabilité. Parmi les principaux paramètres qui influent sur le comportement au cisaillement des discontinuités, on peut citer :

- Les caractéristiques géométriques des surfaces en contact (rugosité, irrégularité) ;

La nature des épontes et leur degré d'altération ;

- L'épaisseur et la nature du matériau de remplissage ;
- Le niveau des contraintes normales au moment du cisaillement ;
- Le niveau des contraintes normales préexistantes ;
- La présence d'eau dans la discontinuité ou la teneur en eau du matériau de remplissage ;
- L'amplitude du déplacement tangentiel et l'existence éventuelle de mouvements antérieurs suivant la même discontinuité ;
- L'orientation du cisaillement.

#### a) Cisaillement suivant un plan horizontal

Considérons le cas d'une surface de rupture parfaitement horizontale qui ne renferme ni ondulations ni rugosité. On applique pour chaque spécimen d'un ensemble d'échantillons, une contrainte normale  $\sigma$  de part et d'autre du plan de discontinuités et une contrainte de cisaillement  $\tau$  qui entraîne un déplacement  $u$  mesuré, (figure I.23, a)

Pour des petits déplacements, le spécimen possède une élasticité et la contrainte de cisaillement augmente linéairement en fonction du déplacement, Une fois les forces de résistance surmontées, la courbe devient non linéaire et atteint son sommet qui correspond

à la valeur maximale de la contrainte au cisaillement. Ensuite l'effort de cisaillement provoque des nouveaux mouvements de déplacement puis il diminue rapidement et se maintient à une valeur constante qui constitue la contrainte au cisaillement résiduelle (voir figure I.23, b).

Si les valeurs maximales de résistance obtenues des tests de charriage pour des valeurs de  $\sigma$  normale sont jointes, elles formeront la courbe suivante qui sera approximativement linéaire, la pente est égale à l'angle de frottement interne  $\varphi$  et la projection sur l'axe des ordonnées, nous donne la valeur de la force de cohésion (figure I.23, c).

La limite au cisaillement est définie par la formule suivante:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi \tag{I.10}$$

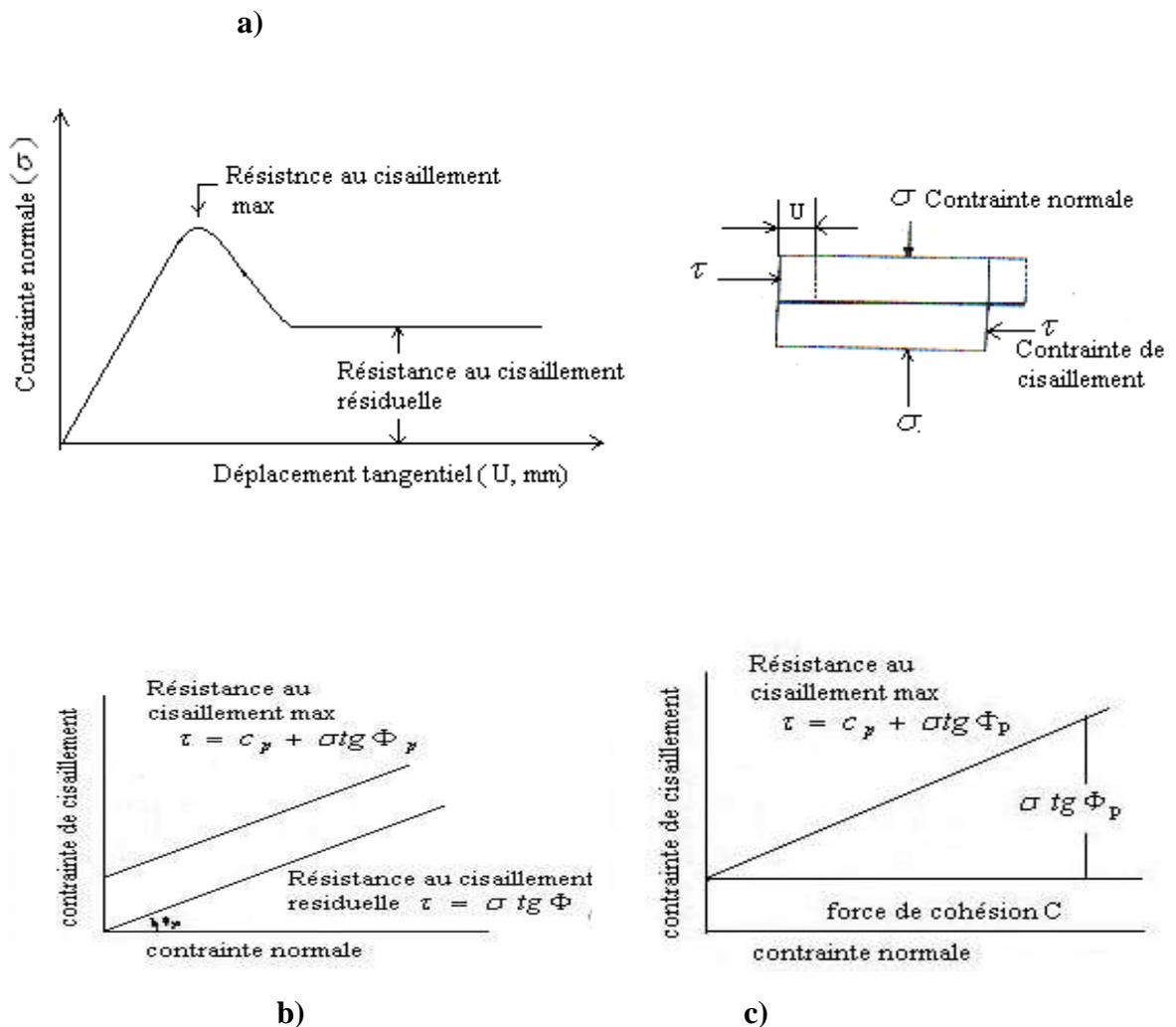


Figure I.23. Courbes de résistance au cisaillement suivant un plan horizontal.

### b) Cisaillement sur un plan incliné

Nous allons considérer maintenant le cas où la surface de discontinuités est inclinée suivant un angle  $i$  par rapport à la direction de la contrainte de cisaillement (figure I.24)

Dans ce cas, la contrainte de cisaillement et la contrainte normale agissent sur la surface de glissement suivant les équations suivantes :

$$\tau_i = \tau \cos^2 i - \sigma_n \sin i \cos i \quad (\text{I.11})$$

$$\sigma_i = \sigma \cos^2 i + \sigma_n \sin i \cos i \quad (\text{I.12})$$

L'on suppose la cohésion nulle, la résistance au cisaillement sera égale à :

$$\tau_i = \sigma_i \operatorname{tg} \phi \quad (\text{I.13})$$

En substituant les équations (I.10) et (I.11) dans l'équation (I.12) on aura la relation qui détermine  $\tau$  en fonction de  $\sigma_n$  et la somme des angles  $(\phi + i)$ , cette dernière est dite angle de frottement interne effectif :

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}(\phi + i) \quad (\text{I.14})$$

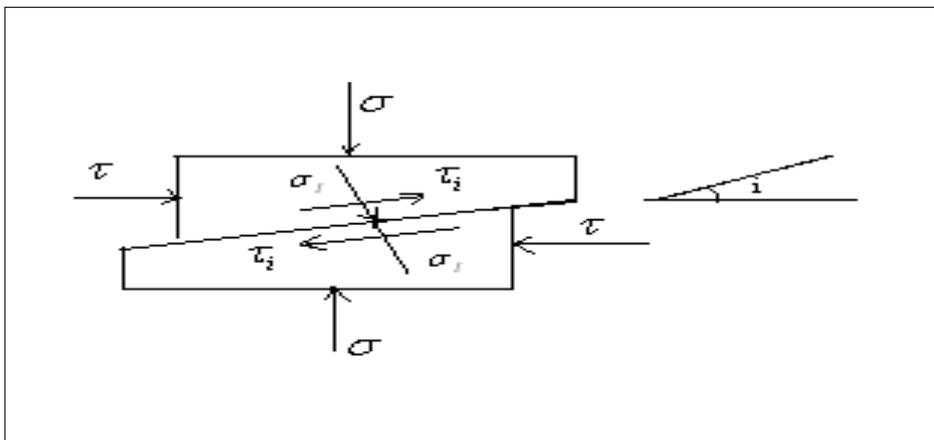


Figure I.24. Schéma de Cisaillement suivant un plan incliné.

### II.3.5 Comportement des discontinuités naturelles

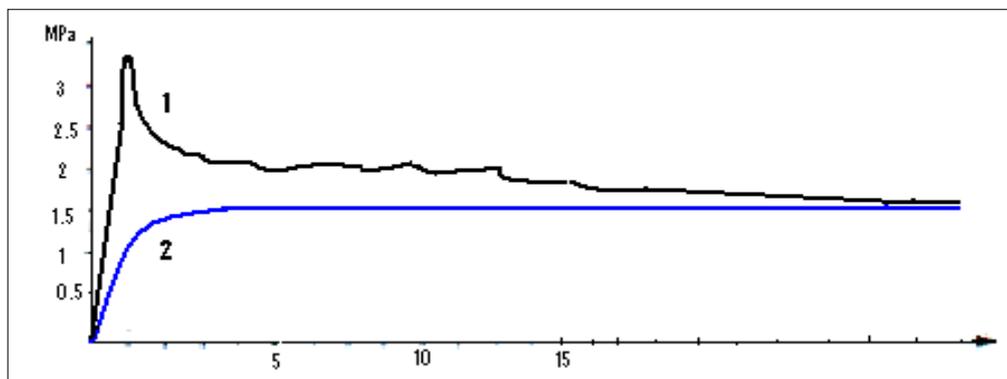
#### A. La rugosité

Des essais de laboratoire effectués sur des discontinuités créées artificiellement et comportant des rugosités différentes dans des roches identiques ne montrent pas de

différence significative de l'angle de frottement résiduel après un déplacement tangentiel relatif important des épontes. Sur la (Figure I.25) sont montrés les résultats d'essais de cisaillement en laboratoire effectués sur des échantillons de roches identiques comportant des discontinuités régulières obtenues par sciage et des discontinuités à forte rugosité (fissures de traction).

L'évolution vers la résistance résiduelle résulte à la fois d'un processus d'abrasion et de polissage qui détermine une évolution de la rugosité des épontes au cours du cisaillement.

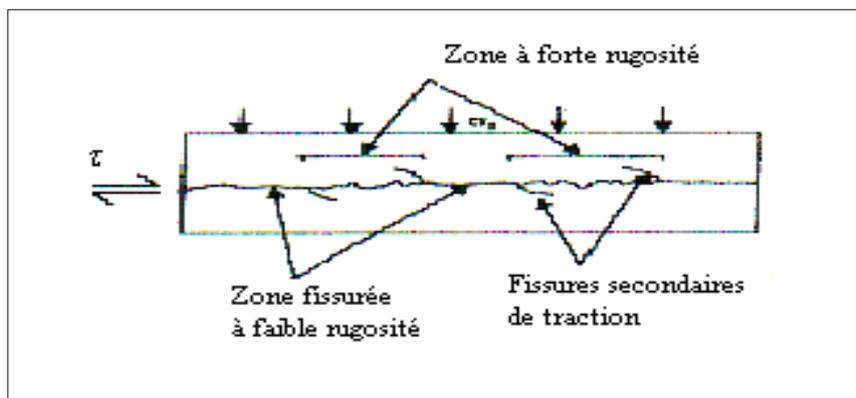
$\delta_a$  mm



**Figure I.25.** Influence de la rugosité sur les résistances résiduelle et de pics.

- 1-discontinuités régulières (surface sciée);
- 2-discontinuités à forte rugosité (fissures de traction).

Dans le cas d'une discontinuité naturelle présentant une hétérogénéité de rugosité, un modèle comportant une succession de zones de forte rugosité et de zones de faible rugosité est montré sur la (Figure I.26). On remarque que la rupture des ponts de matière d'une fissure discontinue conduit à une fissure de rugosité hétérogène



**Figure I.26.** Modèle de fissure à rugosité hétérogène.

Le dépassement de la résistance au cisaillement des zones de plus faible rugosité entraîne un report des efforts sur les zones de plus forte rugosité, intervient ensuite la dilatation entraînant l'affaiblissement progressif du terrain dans le sens du cisaillement. La résistance au cisaillement passe par un maximum et décroît ensuite jusqu'à la résistance résiduelle des épontes.

Patton a démontré la signification pratique de cette relation par des mesures des valeurs moyennes de l'angle ( $i$ ) à partir des traces ou profil de la surface d'engrènement.

Patton a trouvé que l'inclinaison de la trace d'engrènement est approximativement égale à la somme de la moyenne de l'angle ( $i$ ) et l'angle de base du frottement interne, déterminé à l'aide du diagramme de Mohr, et il a trouvé que plus la surface d'engrènement est rugueuse plus la pente est raide.

Ainsi un aspect très important durant le cisaillement dans le domaine des discontinuités par rapport à la direction de la contrainte du cisaillement  $\tau$  est le fait que n'importe quel déplacement de cisaillement ( $u$ ) est accompagné d'un déplacement normal ( $U$ ) comme représente dans la figure I.24.

Le cas d'un spécimen comportant plusieurs engrènements l'aspect expliqué ultérieurement impliquerait que le volume du spécimen se dilaterait. Cette dilatation joue un rôle important dans le comportement durant le cisaillement des surfaces des roches.

### A.1. Mesure de la rugosité des surfaces

Comme nous avons vu, la détermination de l'angle ( $i$ ) peut être réalisée à partir des projections (profils) des surfaces d'engrènement. Ces projections sont en nombre de deux :

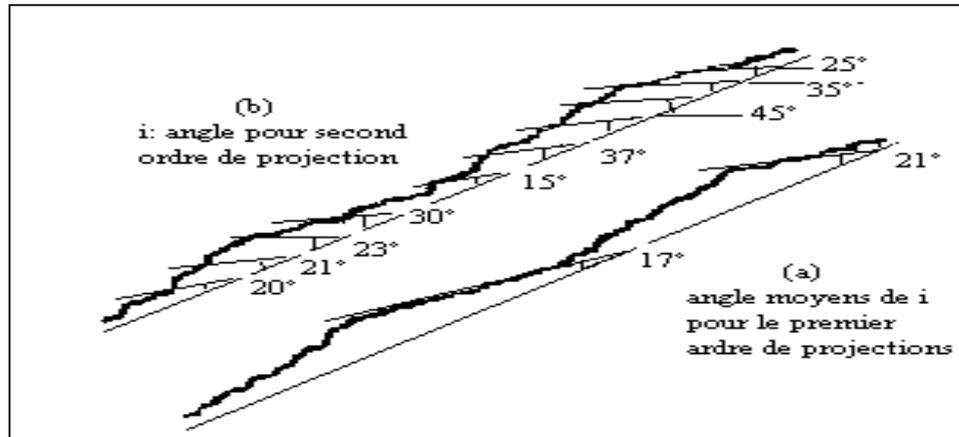
Projection de premier ordre qui est la projection de toute une ondulation régulière soit elle ou pas (figure I.27, a)

Projection de deuxième ordre représentant l'engrènement des ondulations elles-mêmes (figure I.27, b).

Cependant il n'est pas pratique de mesurer que les projections du premier ordre, c'est-à-dire  $i_{(\text{moyen})}$  par rapport à la direction des surfaces d'engrènement

## A.2. Mesure de l'angle de frottement interne

L'angle de frottement interne ( $\Phi$ ) est déterminé à l'aide du diagramme de Mohr construit à partir des résistances de la roche à la compression et à la traction.

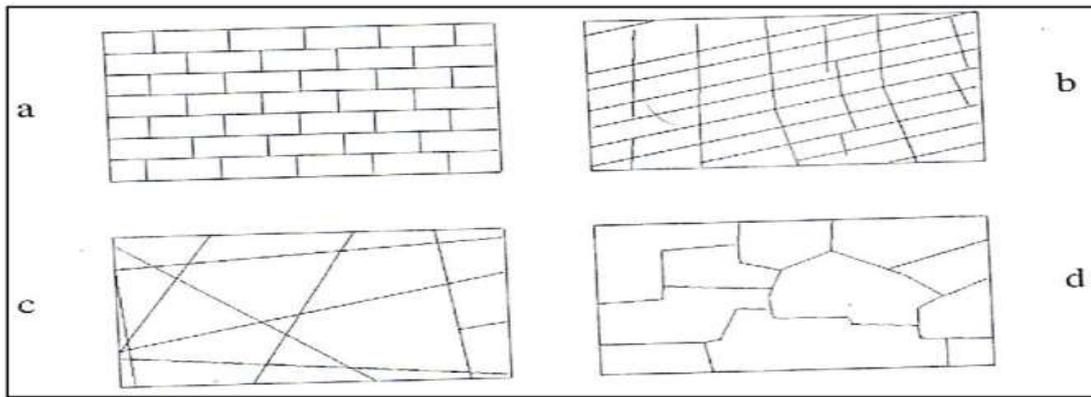


**Figure I.27.** Les mesures de Patton des angles de rugosité ( $i$ ) pour le premier et le second ordre des projections sur les surfaces des roches rugueuses.

## B. Imbrication

La maçonnerie de pierres de tailles (ou de briques ou de parpaings) comporte des assises comparables aux couches des roches sédimentaires diaclases, mais d'une couche à la suivante le maçon prend soin de décaler les joints perpendiculaires, pour obtenir une meilleure stabilité (par la liaison entre les blocs voisins d'une même assise). C'est une première forme d'imbrication (le mot vient des tuiles romaines d'un toit qui se recouvrent en partie).

Plus généralement l'imbrication d'un assemblage de blocs élémentaires, tant en maçonnerie que dans le massif rocheux, tient à ce que les formes des blocs sont étroitement complémentaires. Lorsque les joints d'une famille sont décalés, les deux formes d'imbrication s'additionnent. Les maçonneries des incas exploitent une imbrication plus poussée encore à trois dimensions, qui assure une résistance exceptionnelle aux séismes; (Figure I.28.).



**Figure I.28.** Modèles schématiques d'imbrication des blocs du massif rocheux, (CFMR-MMR, 2000)

- a. pierre de taille ou brique;
- b. affleurement de calcaires diaclases;
- c. affleurement de granite diaclasé,
- d. maçonnerie inca (la pierre aux douze angles Cuzco).

Elle cause les courbes de cisaillement des discontinuités naturelles dans les roches présentent un pic de résistance d'autant plus marqué que les aspérités sont plus développées et bien imbriquées (figure I .28).

L'imbrication des aspérités accroît la simultanéité des cisaillements qui se développent au niveau des aspérités et entraînent une augmentation de la résistance apparente de l'échantillon. Toute cause tendant à réduire la complémentarité des deux surfaces en contact entraîne une réduction de la résistance du pic. Le développement relatif des épontes provoqué par une extérieurement (ébranlement, pression interstitielle,...) entraîne une réduction du degré d'imbrication des aspérités et une réduction corrélative de la résistance de pic, ceci souligne l'influence défavorable sur la résistance au cisaillement de tout déplacement relatif des épontes. La mobilisation de la résistance de pic nécessite généralement un faible déplacement tangentiel (de l'ordre du millimètre à quelques centimètres). Ce déplacement est d'autant plus faible que la rugosité des épontes est plus importante et que les aspérités sont plus imbriquées. Par ailleurs, il semble que le déplacement tangentiel correspondant à la résistance de pic soit sensible à l'effet d'échelle et augmente avec la dimension des discontinuités.

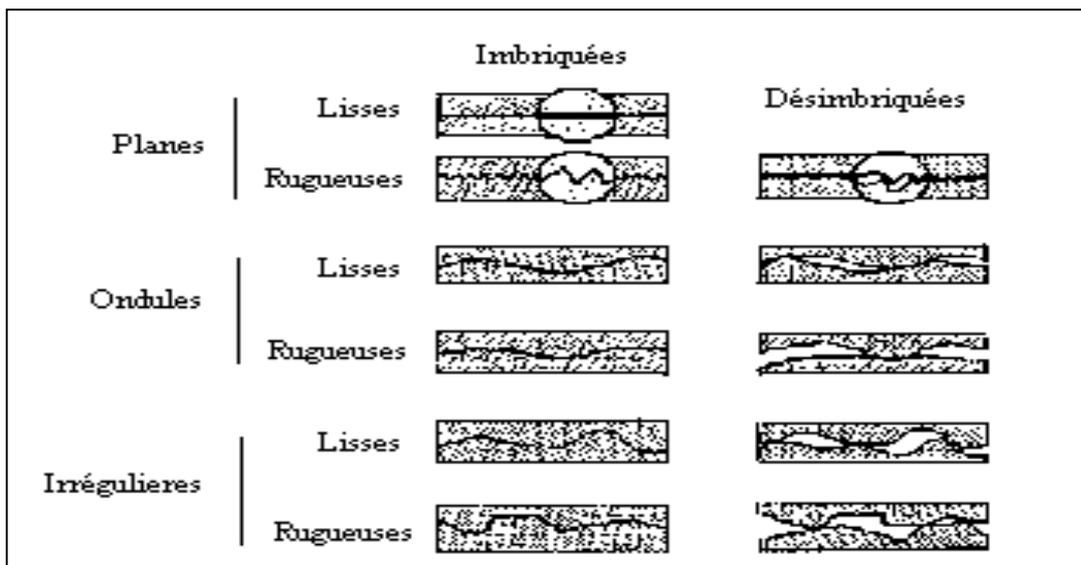


Figure I.29. Morphologie des épontes des discontinuités.

### II.3.6. Influence de l'eau interstitielle

Une des caractéristiques les plus importantes de la surface de la terre est l'abondance de l'eau, tant sous forme liquide, que solide ou gazeuse. La circulation de cette eau dans les massifs rocheux est liée essentiellement à l'existence des discontinuités qui constituent des cheminements préférentiels. La présence d'eau dans les discontinuités entraîne une réduction de leur résistance au cisaillement. Trois facteurs semblent avoir un rôle :

#### a) Les pressions interstitielles

Elles provoquent l'ouverture rapide des fissures de la roche d'une part et modifient la distribution des contraintes normales sur les plans des fissures d'une autre part. Toute augmentation de la pression interstitielle diminue les contraintes effectives.

$$\sigma'_n = \sigma_n - p_w \quad (\text{I.15})$$

Les valeurs des efforts tangentiels restant inchangées, l'obliquité des contraintes qui s'exercent sur les discontinuités se trouve augmentée par l'introduction des pressions interstitielles. Les pressions interstitielles peuvent affecter la stabilité des massifs rocheux.

#### b) La présence de l'eau

Dans les roches entraîne d'une manière générale une réduction de leurs caractéristiques mécaniques, en particulier la résistance au cisaillement des discontinuités décroît avec la résistance à la compression simple  $\sigma_c$  du matériau formant les épontes.

### c) La variation de l'angle de frottement résiduel $\varphi_r$

Pour les roches fragiles : il semble que l'on observe que faible réduction de l'angle de frottement résiduel dans le cas des discontinuités très irrégulières par contre les surface lisses présentant une faible rugosité montrent une tendance inverse.

### II.3.7. La fréquence des discontinuités ( $\lambda$ )

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

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

$$x = L/N.$$

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

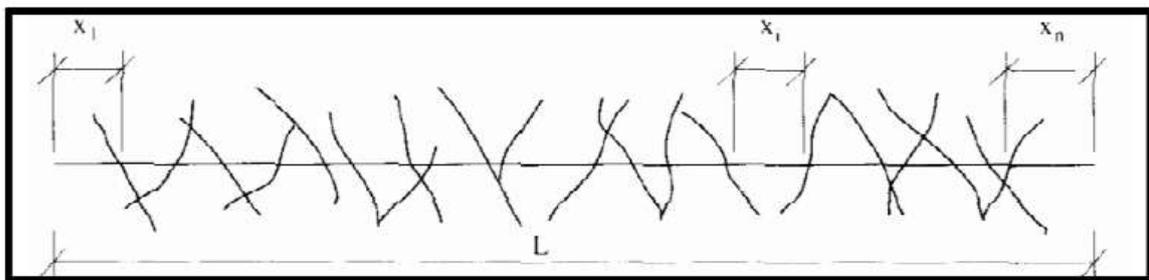


Figure I.30. Mesure de la fréquence des discontinuités.

### II.3.8. La projection stéréographique des discontinuités

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

Cette projection possède toutefois des défauts, elle dilate ou comprime les angles selon l'orientation. L'analyse de la projection stéréographique permet de déterminer le nombre de familles de fractures ainsi que l'orientation des pôles moyens de chaque famille

de discontinuités identifiée. Une fois que les fractures sont regroupées en familles, les valeurs moyennes de pendage et de direction de pendage et leurs fonctions de densité probabiliste peuvent être déterminées.

#### II.4. Représentation des orientations sur des diagrammes

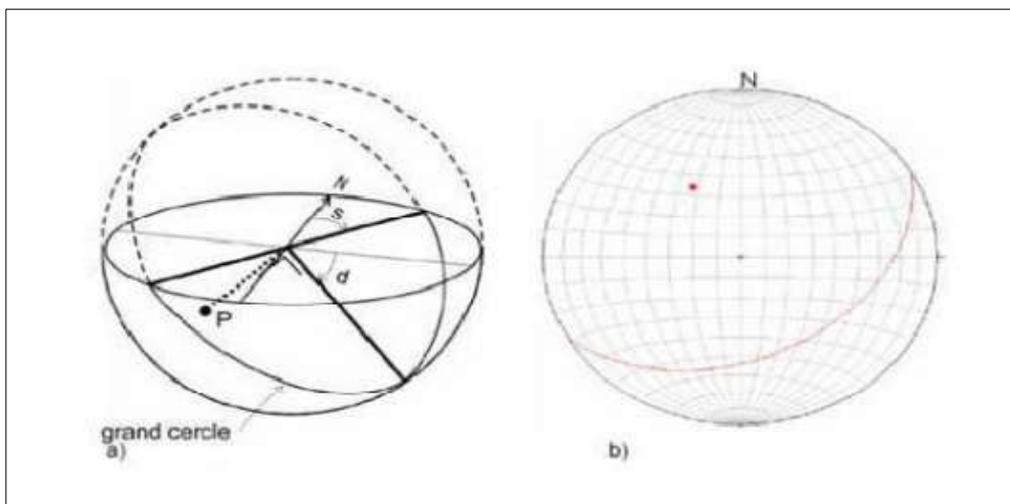
On considère une sphère dont un diamètre du plan équatorial est la direction du plan considéré et l'autre diamètre est orienté Nord - Sud.

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

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

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

Sur le plan équatorial figurent les projections des grands cercles et des petits cercles tracés sur l'hémisphère inférieur.



**Figure I.31.** Représentation stéréographique.

**a) :** direction (S), pendage (d), grand cercle et pôle (P) ;

**b) :** canevas de Schmidt.

### **III. Conclusion**

La description est donc essentiellement structurale, elle porte sur les modes d'assemblage des blocs séparées par les discontinuités incluant tous les fissures, fractures, joints, diaclases, failles...

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



# **Chapitre II:**

**Classification**

**géomécanique des**

**massifs rocheux**

جامعة العربي التبسي - تبسة

Universite Larbi Tebessi - Tebessa

**Chapitre II: Classification géomécanique des massifs rocheux****I. Introduction**

La caractérisation du massif rocheux s'effectue habituellement à l'aide de systèmes de classification géomécanique. Ces derniers sont des méthodes empiriques qui utilisent différentes propriétés afin d'attribuer au massif rocheux une valeur de qualité. Plusieurs systèmes de classification ont été développés.

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

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

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

**III. Les différents systèmes de classification des massifs rocheux**

Des méthodes empiriques, basées sur une classification géotechnique du rocher, ont été mise au point et servent aux recommandations du soutènement :

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

### III.1 Système du RQD (Rock Quality Designation)

Le Rock Quality Designation index (RQD) a été développé par (Deer, D, 1967) dans le but d'obtenir une estimation quantitative de la qualité du massif rocheux à partir de carottes de forage.

#### A. Principe de calcul du RQD

Basé sur un procédé qualitatif, le RQD est défini comme le pourcentage des parties intactes de plus de 100 mm de longueur par rapport à la longueur totale des carottes extraites du forage. Ce paramètre est défini comme suit:

$$RQD = \frac{\sum \text{longueur des carottes } >10 \text{ cm}}{\text{longueur total des carottes extraites}} \times 100 \quad \text{II.1}$$

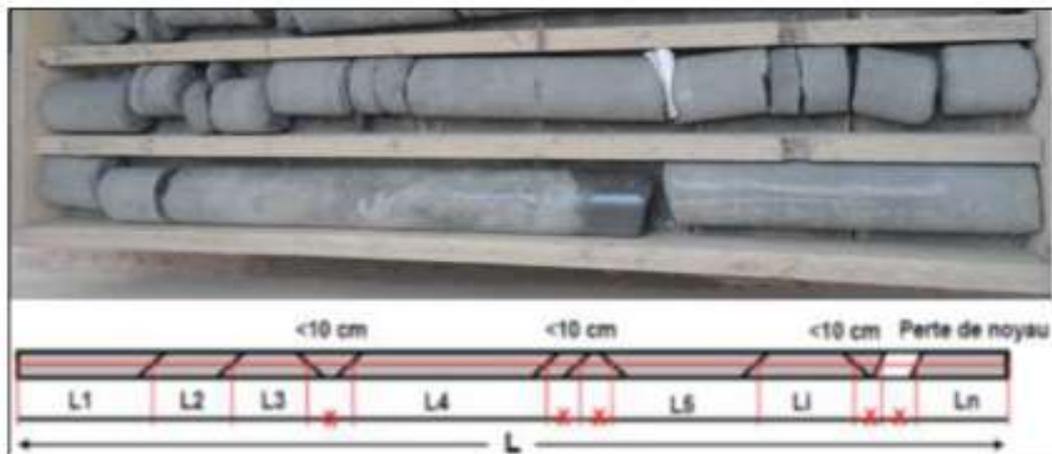


Figure II.1. Une carotte.

Les diamètres des carottes doivent être de 54,7 mm. A suggéré que lorsque les carottes ne sont pas disponible mais les discontinuités sont visibles à la surface d'exposition des gradins, le RQD peut être estimé à partir du nombre de discontinuités par unité de volume. La relation suggérée pour des masses rocheuses contenant de l'argile libre est :

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

Où

$J_v$ : est le nombre de joints de fissures par  $m^3$ .

Si  $J_v$  est inférieur à 4,5 on utilise  $RQD=100\%$ . Dans ce cas les fissures induites par le tir ne sont pas comptabilisées.

Le RQD est supposé représenter la qualité de la masse rocheuse in-situ. [19]

### B. Classification de massifs rocheux par RQD

La relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif peut être établie selon la proposition de Deer en 1988. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci dessous.

**Tableau II.1:** Classification RQD du massif rocheux.

Classes	RQD %	Qualité du massif rocheux
RQD <sub>1</sub>	90 – 100 %	Excellente
RQD <sub>2</sub>	75 – 90 %	Bonne
RQD <sub>3</sub>	50 – 75 %	Moyenne
RQD <sub>4</sub>	25 – 50 %	Mauvaise
RQD <sub>5</sub>	0 – 25 %	Très mauvaise

### III.2 Système du RMR (Rock Mass Rating)

Bieniawski a publié en 1976 les détails d'une classification des masses rocheuses intitulées Geomechanics Classification or the **Rock Mass Rating (RMR)** system. Depuis la version originale, certaines modifications ont été apportées. Désormais, plusieurs variantes de la classification de Bieniawski sont disponibles. Les versions 1976 et 1989 sont les plus couramment utilisées.

Cette version est choisie simplement du fait que tous les changements apportés pour améliorer ce système n'ont généralement affecté que le poids des coefficients des différents paramètres géologiques. Les relations empiriques basées sur les études de cas initiales, sont restées quasi inchangées. Donc, utiliser une version plus récente, d'après une nouvelle pondération des coefficients, pourra produire de multiples confusions et de graves erreurs de désigne empirique. [20]

En reprenant la version 1976 du système de classification, La somme de ces coefficients détermine la valeur du RMR, qui peut varier entre 0 et 100.

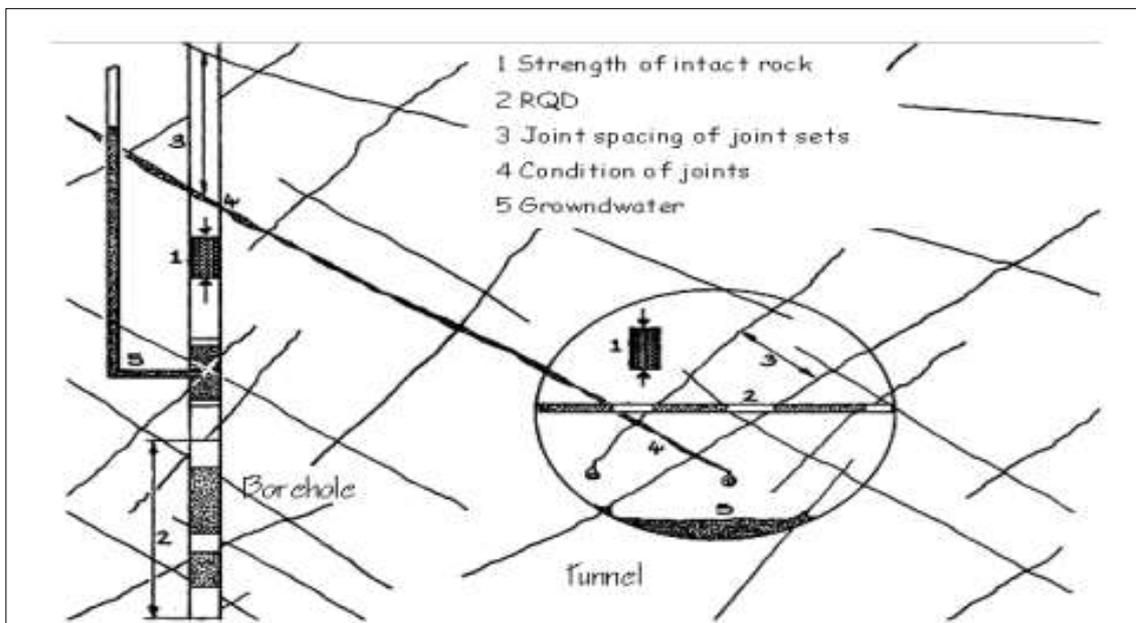
### A. Principe de calcul du RMR

Le RMR est comptabilisé sur la base de cinq paramètres, le sixième étant un paramètre d'ajustement. Chaque paramètre est introduit dans le system comme note. La somme des notes donne la note RMR finale.

Se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants:

- A1 : Résistance en compression uniaxiale de la roche intacte;
- A2 : RQD(Rock Quality Designation Index);
- A3 : Espacement moyen des discontinuités;
- A4 : Condition des discontinuités (ouverture, persistance, rugosité...);
- A5 : Les conditions hydrogéologiques du massif rocheux ;
- A6 : Orientation des discontinuités par rapport aux directions représentatives du problème traité.

Ces paramètres sont illustrés sur la figure IV.1.



**Figure II.2.** Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR. [21]

Les notes A1, A2 et A5 correspondant aux paramètres établies pour l'ensemble du massif rocheux, alors que A3, A4 et A6 sont évaluées pour chaque famille de discontinuités.

Le calcul se base sur la sommation des divers paramètres afin de produire une cote finale du RMR de base est compris entre 8 et 100 points.

$$\text{RMR de base} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 \quad \text{II.3}$$

Bieniawski (1978) suggère un paramètre de réduction tenant compte de l'orientation du tunnel par rapport à l'indication du pendage. Le paramètre A6 est négatif afin de réduire la qualité du massif rocheux. La classification doit tenir compte de l'influence de conditions externes applicables à l'ingénierie :

$$\text{RMR modifié} = \text{RMR de base} + A6 \quad \text{II.4}$$

**Tableau II.2:** Classification RMR (Bieniawski, 1989).

Paramètres		Coefficients							
1	Résistance de la roche (MPa)	Indice de Franklin (MPa)	> 10	4-10	2-4	1-4	Indice Franklin Non utilisable (MPa)		
		Résistance à la compression (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	note		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
	Note		20	17	13	8	3		
3	Espacement des joints		>2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m		
	Note		20	15	10	8	5		
4	Nature des joints		Surfaces très rugueuses non continue Eponte en contact Eponte non altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Eponte non altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Eponte altérées	Surfaces lustrées ou remplissage < 5mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	Remplissage joints mou>5 mm ou joints ouverts>5 mm joints continus		
	Note		30	25	20	10	0		
5	Venues d'eau	Débit sur 10 m	Aucune venue d'eau	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		

	<b>Pression d'eau contrainte principale</b>	<b>0</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0,1 -0,2</b>	<b>0,2- 0,5</b>	<b>&gt;0,5</b>
	<b>Hydrogéologie</b>	<b>Complètement sec</b>	<b>Humide</b>	<b>Suintements (eau interstitielle)</b>	<b>Pression d'eau modérée</b>	<b>Problèmes sérieux de venues d'eau</b>
	<b>Note</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>0</b>
<b>6</b>	<b>direction des discontinuités</b>	<b>0</b>	<b>-5</b>	<b>-25</b>	<b>-50</b>	<b>-60</b>
	<b>Note</b>	<b>Très favorable</b>	<b>favorable</b>	<b>Bonne</b>	<b>défavorable</b>	<b>Très défavorable</b>

Bieniawski présente une classification et description pour le massif rocheux selon l'indice RMR final. Cette classification comprend 5 groupes d'intervalle de 20 points par classe dont la description rocheuse variant entre roches de très faible qualité à très bonnes roches.

**Tableau II.3:** Classes et propriétés globales des massifs rocheux.

Note globale	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20
Classe du massif rocheux	I	II	III	IV	V
Description du massif rocheux	très bon rocher	bon rocher	rocher moyen	rocher médiocre	rocher très médiocre
Cohésion Cm (KPa)	>400	300 à 400	200 à 300	100 à 200	<100
Angle de frottement interne $\varphi_m(^{\circ})$	>45	35 à 45	25 à 35	15 à 25	<15

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

Le RMR permet aussi d'estimer des paramètres mécaniques des massifs rocheux tels que la cohésion et l'angle de frottement. Comme on peut estimer le temps de soutien moyen d'une excavation avant l'application du soutènement. Plusieurs auteurs ont proposé des relations entre ces paramètres et la valeur du RMR.

Il existe des corrélations qui permettent d'estimer la cohésion, l'angle de frottement ainsi que le module de Young [22]:

**a) La cohésion:**

$$C_{eq} \text{ (kPa)} = 5 \text{ RMR} \quad \text{II.5}$$

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

$$\varphi \text{ (}^\circ\text{)} = 0.5 \text{ RMR} + 8.3 \pm 7.2 \quad \text{II.6}$$

**c) Le module de Young :**

$$E_{eq} \text{ (GPa)} = 10(\text{RMR}-10) \setminus 40 \quad \text{II.7}$$

**C. Limitations du système RMR**

Dans le domaine minier, le paramètre de l'orientation des discontinuités (A6) est ignoré, le système conservé redevient le RMR de base. Cette correction est apportée principalement pour ignorer les conditions environnementales résultant en une classification dépendante du massif rocheux uniquement. [23]

Ce système a réussi à identifier des paramètres géologiques quasi universels permettant d'enregistrer rapidement et simplement toute expérience d'excavations dans la masse rocheuse. De la sorte, l'application du système de classification RMR s'étend avec succès à la conception de fondation, de stabilité de talus, l'évaluation du décapage, ainsi que de nombreuses applications minières. [24]

**III.3 La méthode de N.Barton (Q-système)**

**A. Généralités**

La classification NGI (Norwegian Geotechnical Institute) est introduite par Barton et al. en 1974. Elle est définie par l'indice de qualité du massif rocheux Q, qui tient compte :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad \text{II.8}$$

➤ De l'indice du degré de fracturation et de la grosseur des blocs qui constituent le massif, exprimé par le rapport **RQD/Jn** (Jn : nombre de famille de discontinuités);[25]

➤ De la résistance au cisaillement des discontinuités exprimée par le rapport **Jr/Ja**  
(Jr : paramètre de rugosité des joints, Ja : paramètre d'altération des joints);

➤ Du facteur relatif à des contraintes actives exprimé par le rapport **Jw/SRF**  
(Jw : paramètre hydraulique, SRF : paramètre de réduction relatif aux contraintes).

Barton & Al donnent les commentaires suivants, qui permettent d'expliquer le regroupement des paramètres par paire:

- Le premier rapport (RQD/Jn) représente la structure du massif rocheux et est une mesure de la taille moyenne des blocs rocheux;
- Le second rapport (Jr/Ja) représente la résistance au cisaillement entre les blocs. Il est directement proportionnel à la rugosité des faces des joints (élément favorable pour la stabilité du tunnel car il en résulte une forte dilatance lors du cisaillement) et inversement proportionnel à l'épaisseur du joint (élément pouvant être extrêmement défavorable car un remplissage en argile sera caractérisé par un angle de frottement très faible);
- Le troisième rapport (Jw/SRF) reprend deux paramètres de contraintes. Jw est une mesure des pressions d'eaux qui agissent bien entendu à l'encontre de la résistance au cisaillement des joints, suite à une réduction de la contrainte normale effective; et SRF est une mesure :
  - ✓ du poids des terrains à soutenir lorsque le tunnel est creusé dans un massif présentant des discontinuités;
  - ✓ du champ des contraintes préexistantes dans le cas d'une roche saine;
  - ✓ de la charge induite par le fluage de roches plastiques.

Ce dernier rapport, difficile à évaluer, apparaît donc comme un facteur empirique décrivant les "contraintes actives" dans le massif rocheux.

L'indice Q peut varier de 0.001 à 1000. La qualité du massif sera regroupée en 9 classes. Chaque classe correspond à une qualité de massif rocheux (tableau ci-dessous). Les classes des indices se représentent sur une échelle logarithmique. [26]

Tableau II.4: Qualité du massif rocheux selon Barton.

Valeurs	Qualité du massif
400 – 1000	Exceptionnellement bonne
100 – 400	Extrêmement bonne
40 – 100	Très bonne
10 – 40	Bonne
4 – 10	Moyenne
1 – 4	Mauvaise
0,1 – 1	Très mauvaise
0,01 – 0,1	Extrêmement mauvaise
0,001 – 0,01	Exceptionnellement mauvaise

Contrairement à la classification de Bieniawski, le Q-system a connu très peu de modifications depuis sa publication.

Les seuls changements ont eu lieu au niveau du paramètre SRF avec un changement de valeur dans le cas de roches compétentes et sous de très fortes contraintes.

La classification attribue une échelle de la qualité du massif rocheux allant de 0,001 à 1000. Lorsque le rapport  $J_w/SRF = 1$ , l'indice de qualité du massif rocheux est exprimé par Q'.

#### IV. Conclusion

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

# Chapitre III:

Analyse de la théorie  
d'abattage des roches à  
l'explosif

جامعة العربي التبسي - تبسة  
Universite Larbi Tebessi - Tebessa

---

## Chapitre III: analyse de la théorie d'abattage des roches à l'explosif

### I. Introduction

L'abattage à l'explosif est aujourd'hui la technique la plus simple et la plus répandue dans les carrières de roches massives, elle permet de fragmenter des volumes importants de roche pour la reprise et le traitement des matériaux abattus. Tout en amont, la première étape du processus, l'abattage à l'explosif constitue un élément clé de la chaîne ; c'est le premier élément du processus industriel, et en particulier le premier élément de la chaîne de réduction granulométrique.

La quantification de la transmission de l'énergie d'explosive et l'influence des caractéristiques du massif sur le tir, sont encore du domaine de la recherche scientifique ou l'interaction du massif rocheux est primordiale pour schématiser un massif homogène, ne présente pas des difficultés spéciale pour la fragmentation. Par contre, il est très difficile d'abattre un massif de nature hétérogène très fracturé, particulièrement, si les discontinuités sont ouvertes, non seulement le rendement du tir sera mauvais, mais les conditions opératoires seront rendues complexes : mauvaise précision de la foration, non stabilité des parois des trous de tir, difficultés de chargement de l'explosif, effets arrières importants, etc.

Il n'est pas possible de faire un inventaire exhaustif de l'influence de chaque élément du massif sur le tir en général, la première sera de résumer dans les tableaux joints les principaux types d'influence en fonction des éléments du massif, et aussi les principales méthodes utilisables pour caractériser l'élément décrit.

### II. La théorie du travail à l'explosif

Un explosif est un corps simple ou un mélange de corps susceptible de se décomposer en un temps très court sous l'influence de la chaleur ou d'une action mécanique particulière en produisant une grande quantité de gaz porté à haute température.

Les explosifs industriels sont en général constitués par un comburant (oxydant), un combustible (réducteur) et divers autres produits pour leur conférer des propriétés particulières et qui peuvent se décomposer selon trois modes:

1. combustion simple;
2. déflagration;
3. détonation.

Le mode de décomposition dépend essentiellement de :

- La nature de l'explosif et sa sensibilité à l'amorçage;
- Son confinement.

Un explosif peu sensible non confiné peut se décomposer sous la forme d'une combustion simple. Si le confinement augmente, le régime de décomposition sera la déflagration ou la détonation.

En fonction de la vitesse de transformation de la matière on distingue :

- Les explosifs déflagrants : leur vitesse de décomposition est relativement lente (quelques centaines de mètres par seconde);
- Les explosifs détonants : leur décomposition est rapide (2000 à 8000 m/s) produisant ainsi une onde de choc.

Les explosifs sont classés aussi d'après leur sensibilité on trouve :

- Les explosifs primaires : très sensible et peuvent être amorcés par une flamme ou un faible choc;
- Les explosifs secondaires : relativement moins sensibles. Leur détonation ne peut être amorcée facilement que par la détonation d'un autre explosif.

## II.1. Types d'explosifs utilisés dans les carrières

On distingue quatre types d'explosifs:

➤ **Les dynamites:** Les dynamites contiennent de 10 à 90 % de nitroglycéroglycol (NGL), mélange de nitroglycérine et dinitroglycol, composant qui assure la qualité antigel de la dynamite. La nitroglycérine est très sensible au choc et à la friction et sont à manipuler avec des gants pour limiter l'effet toxique de la nitroglycérine.

➤ **Les explosifs nitrates:** Les explosifs nitrates sont à base d'ammonium 80% environ et d'un explosif pur (TNT, pentrite).

➤ **Les émulsions:** Les émulsions sont des mélanges de deux liquides : du nitrate d'ammonium en solution aqueuse emprisonnées dans une matrice liquide à base d'huile, l'ensemble étant stabilisé par des tensioactifs.

➤ **Les nitrates fuels (ANFO):** Les nitrates fuels sont constitués de nitrate d'ammonium 94% en grain et d'huiles minérales en général du fuel domestique 6%.

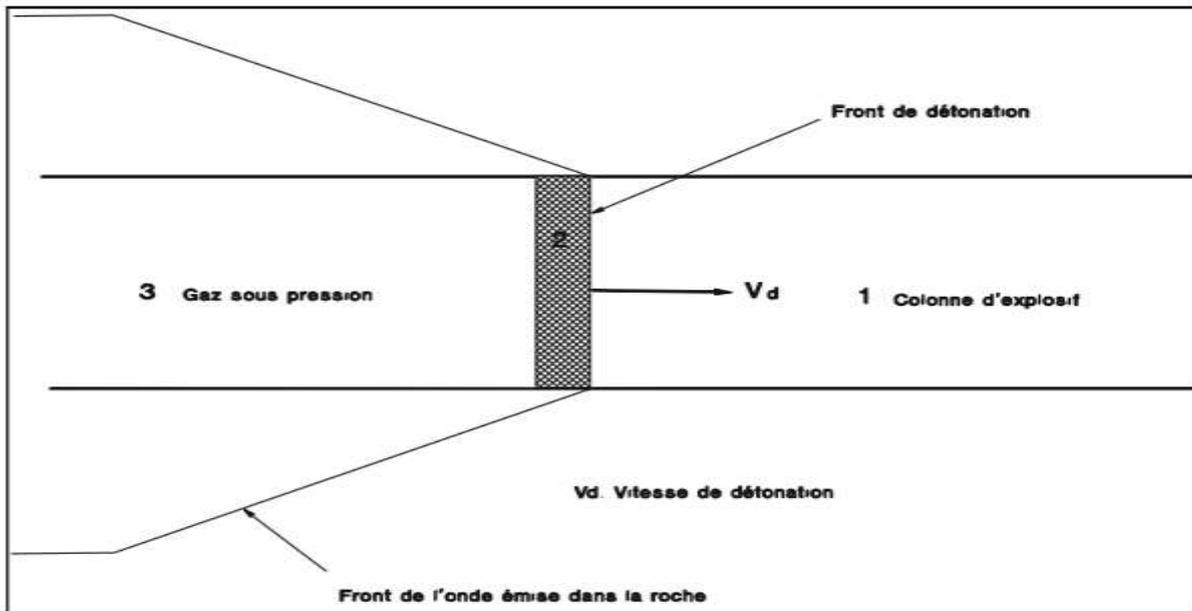
**Le tableau III.1:** résume les caractéristiques des explosifs fabriqués en Algérie par l'ONEX.

Désignations	Densité g/cm <sup>3</sup>	Vitesse de Détonation m/s	Résistance à l'eau	Domaine d'utilisation
<b>Dynamites</b>	1,4 – 1,5	4000 – 6000	Excellent	Roches dures et humides
<b>Nitrates</b>	1,0 – 1,15	4000 – 6000	Médiocre	Roches de dureté moyennes peu humide
<b>Nitrate fuels</b>	0,9	3000 – 4000	Faible	Roches de dureté moyennes et tendres
<b>Emulsions</b>	1,2 – 1,5	4000 – 5000	Excellent	Roches dures et humides

## II.2. Travail de l'explosif

Une explosion est un phénomène au cours duquel des gaz sous pression sont engendrés et libérés en un temps extrêmement court. Ce phénomène se produit lorsqu'un explosif subit une détonation. Dans ce cas, une onde de choc se propage à travers l'explosif accompagné par une réaction chimique exothermique, libérant ainsi une grande quantité de gaz à haute pression et température.

La détonation se propage dans l'explosif avec une vitesse supérieure à celle du son. Initialement l'explosif se trouve dans les conditions de température, pression et onde de détonation volume massique  $T_0$ ,  $P_0$ ,  $V_0$ . A la fin de réaction, les produits de réaction sont aux conditions  $T_1$ ,  $V_1$ . Dans la zone Z3. Les gaz de décomposition se détendent et participent aux effets mécaniques de l'explosion.



**Figure III.1.** Propagation de l'onde de détonation.

Zone 1: l'explosif avant réaction;

Zone 2 : zone de réaction chimique ;

Zone 3 : zone des produits de réaction.

L'énergie libérée par un explosif au cours de la détonation prend deux formes: une énergie de choc véhiculée par une onde de contrainte [27] et transmis à la roche environnante, et une énergie de gaz, qui se manifeste sous la forme d'une haute pression et de température du gaz.

### II.3 Mécanisme de l'explosion

Les explosifs sont utilisés depuis des siècles pour abattre la roche. Cependant, il n'existe pas encore de théorie fondamentale dans le domaine. La manière dont la détonation d'un explosif participe à la fragmentation de la roche n'est pas encore parfaitement connue, mais a été étudiée et décrite en détail.

Le principe de l'explosion repose sur la transformation d'une énergie chimique potentielle en énergie mécanique communiquée au milieu extérieur.

Un explosif est un mélange de substances chimiques peu stables, qui, par un apport d'énergie (thermique ou mécanique par exemple) est susceptible de se décomposer rapidement. Les substances explosives, selon leur régime de décomposition, ont des comportements différents : combustion, déflagration, détonation. Les puissances dégagées vont varier en fonction du type de décomposition. La détonation est le régime de décomposition le plus rapide : la puissance transmise au moment de la détonation sera donc la

plus importante. C'est le mécanisme qui va ainsi générer les effets mécaniques les plus importants, c'est donc ce qui est le plus souvent recherché dans l'utilisation des explosifs.

La détonation est une réaction chimique exothermique qui se propage dans l'explosif, couplée à une onde de choc. Ces deux phénomènes conduisent à une vitesse de détonation stable, en général de 2000 m/s à 7000 m/s pour les explosifs civils. L'énergie dégagée par la décomposition de l'explosif auto-entretient le phénomène.

Cette réaction chimique exothermique dégage des gaz, principalement du CO<sub>2</sub>, de l'H<sub>2</sub>O et des NO<sub>x</sub>, libérés à des températures allant de 1000°C à 400 0°C et des pressions comprises entre 1000 et 25000 MPa.

Le phénomène ainsi présenté correspond au régime stable de la détonation. En pratique, les caractéristiques de l'onde de détonation sont liées aux caractéristiques de l'explosif (composition chimique, densité...) mais aussi à la géométrie et au confinement utilisés. Ainsi, en pratique, un confinement important ou un gros diamètre de cartouche va permettre de se rapprocher de la détonation idéale. Plus le diamètre et le confinement sont faibles, plus les pertes latérales vont réduire la vitesse de détonation. Il existe ainsi un diamètre minimal (diamètre critique) en dessous duquel l'énergie latérale dissipée devient trop importante : il ne reste plus suffisamment d'énergie pour que la propagation de la zone de réaction s'auto-entretienne et le phénomène de détonation s'arrête.

L'énergie dégagée par un explosif au cours d'une détonation se manifeste sous deux formes :

1. une énergie de choc véhiculée par une onde de choc (c'est-à-dire une onde mécanique de contrainte) et transmise dans le milieu connexe;

2. une énergie de gaz qui s'exprime sous la forme d'un gaz dans des conditions de très hautes température et pression. Dans les caractéristiques d'un explosif sont donc présentées les données d'énergie de choc, énergie de gaz et énergie totale libérée ; cette dernière varie entre 2 et 5 MJ/kg d'explosif. En réalité, il est peut-être plus parlant et plus significatif de regarder la puissance libérée, car le phénomène de détonation se produit pendant des temps très courts (de l'ordre de la milliseconde). Les puissances libérées par des explosifs civils atteignent quelques gigawatts.

#### II.4. Abattage de la roche

Le processus de la fracturation à l'explosif repose sur l'action combinée de l'onde de choc et des gaz d'explosion. La détonation n'est pas un phénomène instantané, mais les deux étapes qui la constituent ont des durées très différentes : le phénomène de l'onde de choc est très court par rapport à l'action des gaz. Bien que ces phénomènes ne soient pas totalement indépendants, on peut présenter leur action par deux phases successives.

▪ **Une phase dynamique**, durant laquelle on peut distinguer différents phénomènes, relatifs à différentes zones du massif rocheux :

✓ l'onde de choc génère, tout d'abord, dans un régime que l'on peut supposer hydrodynamique, une onde de compression, qui va engendrer des contraintes supérieures à la résistance en compression de la roche. Cet état de contrainte va donc broyer la roche en fines particules, dans une zone autour du trou désignée par « zone de broyage ». La décroissance de ces contraintes est cependant très rapide : à courte distance (3 à 5 fois le rayon de la cartouche  $r_c$ ), les contraintes sont inférieures à la résistance en compression ;

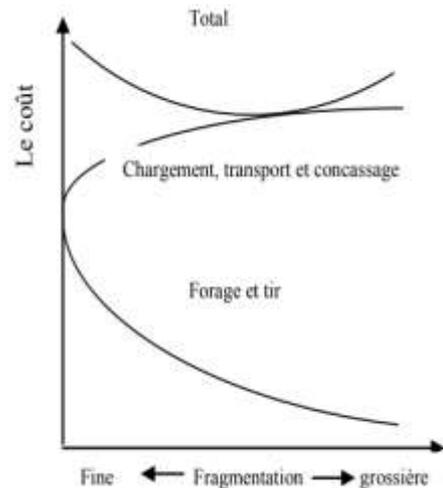
✓ On observe ensuite la création de fissures radiales : l'onde de choc perd en intensité, mais les contraintes tangentielles qu'elle crée sont encore suffisantes pour fracturer la roche via des contraintes tangentielles de traction. Malgré une décroissance en  $1/r^3$  dans la zone de broyage et en  $1/r^2$  par la suite, les contraintes demeurent supérieures à la résistance en traction de la roche, dans une zone appelée zone transitoire (entre 20 et 50  $r_c$ ). Au delà de cette zone, aucune fissuration microscopique marquante n'apparaît: c'est la zone sismique. L'onde contribue à affaiblir le massif, sans pour autant mettre en cause sa structure globale par des pré-fissurations.

#### II.5. Processus technique de tir

L'exploitation minière est un processus de destruction contrôlé de la masse rocheuse nous permettant l'extraction du minerai. En face des spécialistes des mines des exigences se posent, d'un côté fournir de grandes quantités de roche bien fragmentée pour le processus de traitement et de l'autre côté minimiser le coût suivant le débitage secondaire des hors gabarit obtenus. Un compromis raisonnable entre ces deux exigences incompatibles ne peut être accompli que sur la base d'une compréhension très poussée des facteurs qui contrôlent la fragmentation des roches.

Harries et Mercer [28] ont établi un diagramme indiquant les objectifs économiques à respecter lors de la fragmentation des roches. Le contrôle de la granulométrie du tas de roche abattus peut être obtenu par la variation des paramètres suivants:

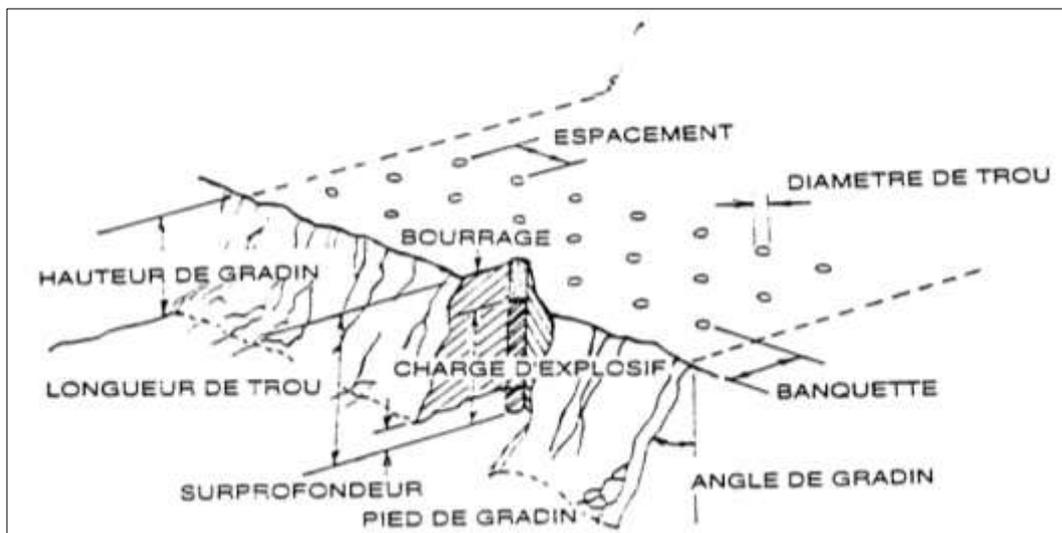
- 1-type, poids et répartition de l'explosif
- 2- diamètre du trou
- 3-la ligne de moindre résistance
- 4-espacement entre les trous
- 5-l'excès de forage
- 6-l'inclinaison du trou
- 7-le bourrage
- 8- la méthode d'initiation de la mise à feu de l'explosif
- 9- délais entre les trous consécutifs (microretard).



**Figure III.2.** Diagramme de Harries et Mercer.

Les paramètres de 2 à 9 sont définis dans la figure .3.

De toute façon nous devons étudier l'influence énumérer précédemment sur l'efficacité du tir et le coût des travaux suivant le débitage secondaire.



**Figure III.3.** Schéma du dispositif géométrique d'un tir.

## II.6. Mécanismes de la Fragmentation

La détonation de la charge transmet au massif des contraintes pouvant engendrer des déformations transitoires ou bien irréversibles.

### II.6.1. Effet général des ondes de choc dans le massif rocheux

La détonation d'une charge s'accompagne de déformations dans le massif selon trois zones distinctes

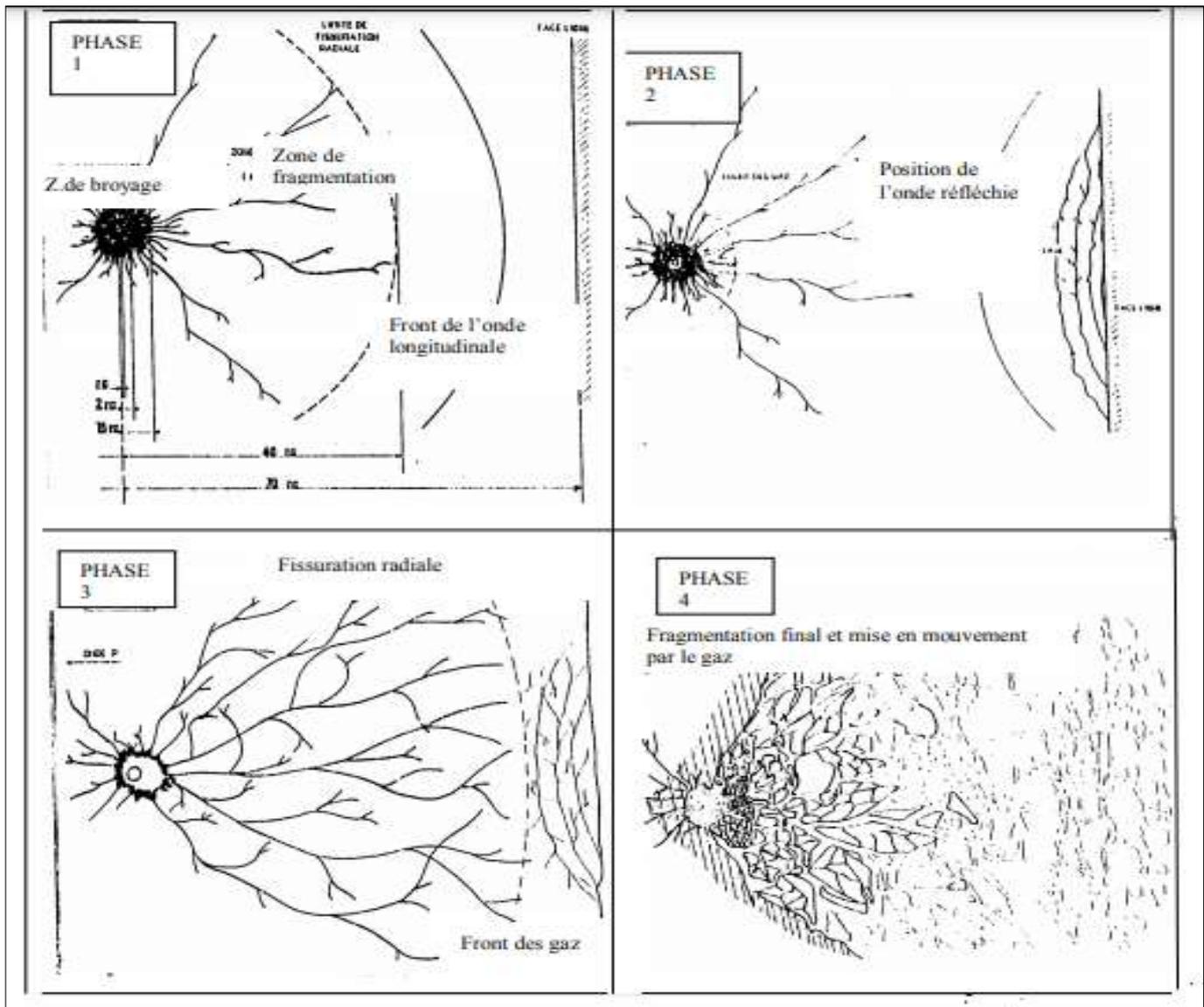
- la zone de broyage ;
- la zone de fissuration radiale;
- la zone sismique.

#### a) Zone de broyage

Les contraintes de compression subies à proximité de la paroi du trou dans les premiers temps de la propagation généralement excèdent la résistance à la compression de la roche. Tout se passe comme si cette zone était soumise à un régime hydrodynamique. (Figure III.4 phase 1).

La décroissance des contraintes est toutefois très rapide de sorte que. De 3 à 5  $r_c$  (rayon de la charge, elles reviennent en deçà de la résistance à la compression de la roche.

L'épaisseur de la zone de broyage dépend essentiellement de la pression maximale à la paroi du trou et des propriétés dynamique de la roche. Les roches cristallines à porosité faible offrent une résistance plus importante au broyage que les roches tendres et /ou poreuses [29]. La pression à la paroi du trou dépend de la densité de l'explosif. Par conséquent, l'épaisseur de la zone broyée peut être modifiée en variant la densité du chargement.



**Figure III.4.** Développement de la fissuration et de la fracturation, (phase 1 à 4).

### b) Zone de fissuration radiale

Dans cette zone (figure III.4 phase 2), la roche subit, en plus de la contrainte de compression, une contrainte tangentielle en traction ; Des fissures radiales se développent autour de la cavité jusqu'à ce que la contrainte tangentielle devienne inférieure à la résistance dynamique en traction de la roche. Ceci peut couvrir des distances comprises entre 20 et 50rc.

Toutefois, le mécanisme de la propagation de ces fissures n'est pas aussi clair. [30], d'après des essais au laboratoire des tirs (sur modèle physique) et en utilisant la méthode photographique, a conclu que ces fissures sont initiées et propagées à partir des fractures

préexistantes dans le massif rocheux. Cela peut indiquer que les contraintes résiduelles jouent un rôle important dans la propagation de ces fissures.

### c) Zone sismique

Dans cette zone, aucune fissuration marquante n'apparaît et le massif rocheux suit un modèle classique de comportement élastique.

## II.6.2. Effet des ondes réfléchies

Dans le cas précédent, nous avons supposé le massif infini. En fait, les tirs sont généralement réalisés près d'une face libre qui contient une discontinuité importante. En effet, dès qu'elle rencontre une discontinuité, l'onde de contrainte émise se scinde en une onde transmise et une onde réfléchie.

La répartition entre l'énergie transmise et l'énergie réfléchie dépend du rapport des impédances des matériaux d'une part et d'autre part de la discontinuité.

Dans le cas de l'interface roche/ air pris dans cet ordre, la réflexion est presque totale, [31]. L'onde de compression (longitudinal) se réfléchit en une onde de traction et elle peut conduire à des contraintes excédant la résistance à la traction de la roche. Cela se produit, lorsque la distance entre la source et la discontinuité est faible. Une fissuration parallèle au plan d'onde apparaît alors. Ce phénomène est appelé écaillage (phénomène illustré par le test de la barre d'**hopkinson**, figure III.4 phase 2 et 3).

La présence de nombreuses discontinuités dans le massif (micro fissures) induit deux effets sur l'onde qui se propage:

1. Affaiblissement du maximum de contraintes;
2. Diminution des fréquences associées aux ondes de contraintes (phénomènes vibratoires).

Les ondes réfléchies jouent deux rôles:

- ✓ Modification de l'orientation des fissures radiales;
- ✓ Initiation de nouvelles fissures. Ainsi une nouvelle fissuration perpendiculaire à l'écaillage apparaît au voisinage de la surface libre.

### II.6.3. Fragmentation finale et mise en mouvement

Si l'onde émise et l'onde réfléchie sur la surface libre, ont pu pré fissuré ou, affaiblis suffisamment le massif entre cette surface libre et le diamètre du trou, les gaz emprisonnés va pouvoir poursuivre leur propagation et leur action. Ils s'infiltreront dans les fissures, complétant éventuellement la fissuration et mettent les blocs formés en mouvement.

#### 6.3.1. Effet de la présence d'une face libre

Lorsque l'onde de choc rencontre une discontinuité, elle se scinde en une onde transmise et une onde réfléchie. La répartition entre l'énergie transmise et l'énergie réfléchie dépend du rapport des impédances des matériaux de part et d'autre de la discontinuité. Dans le cas de l'interface roche/air. La réflexion est presque total [32] .L'onde de compression se réfléchit alors en une onde de traction qui est responsable de la formation d'une fissuration parallèle au plan d'onde ; Ce phénomène bien connu est appelé écaillage (Figure III.4 phase 2 et 3).

#### 6.3.2. Effet des gaz libérés: fragmentation finale

La fissuration générée par l'onde émise et l'onde réfléchie permet aux gaz libérés de poursuivre leur propagation et d'affaiblir davantage le massif ; Ils filtrent dans les fissures, prolongeant éventuellement la fissuration et mettent en mouvement les blocs obtenus. (Figure III.4 phase 4).

Jaeger et Cook (1979) prétendent que les gaz libérés [33] sont le facteur principal de la fragmentation. La génération de la fissuration radiale ne peut pas être le résultat de l'onde de choc émise, selon eux, car la vitesse de la propagation des ondes est bien plus élevée que la vitesse de la propagation de ces fissures. C'est alors la pression quasi-statique créés par les gaz libérés qui engendre des contraintes compressives radiales et des tractions tangentielles, lesquelles génèrent ces fissures. Elles sont par la suite prolongées par les gaz sous pression responsables de la fragmentation finale.

### II.6.4. Autres théories de la fragmentation

- Fragmentation due au cisaillement et à la collision des blocs pendant la projection;
- Rupture flexurale;
- Théorie de la comminution.

### 6.4.1. Fragmentation due au cisaillement et à la collision des blocs pendant la projection

Hagan et Just ont avancé que le cisaillement pouvait agir comme un autre mode de fragmentation. Cela se produit, selon eux, lorsque le gaz entraîne un autre mouvement relatif le long de discontinuités d'orientation favorable (fente de Riedel).

La collision des blocs pendant leur projection peut aussi produire de la fragmentation. Les mêmes auteurs prétendent que ce phénomène peut être contrôlé par une bonne séquence d'initiation et des microretards appropriés entre les trous.

### 6.4.2. Rupture

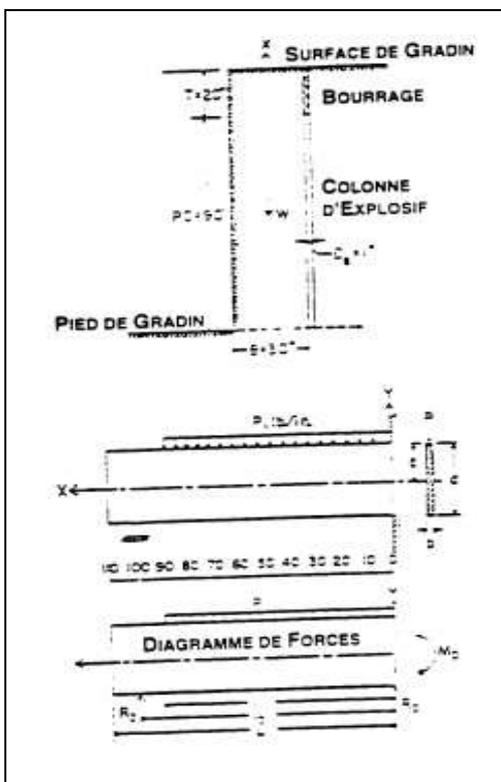


Figure III.5. Schéma de la fragmentation par la rupture flexurale. [34]

Ce modèle assimile le volume à abattre par un trou chargé à une poutre cantilever ayant une forme de parallépipède (Figure III.5). Une face représente la face libre et la face opposée est délimitée par des fissures sous pression. Les deux côtés par ailleurs sont délimités par des joints.

perpendiculaires à la face libre. Le est fixé tandis que la partie supérieure a une liberté de mouvement. L'épaisseur de la poutre est égale à la banquette. La pression à la paroi du trou est simulée elle par une charge de force répartie le long de la colonne de la charge. La fragmentation s'accomplit alors par le fléchissement du segment de gradin (poutre) sous l'action de la force qui se produit pendant la détonation de la charge. pied de poutre

### 6.4.3. Théorie de la comminution

Contrairement à ce qui a été exposé ci-dessus, la théorie de la comminution ne propose pas de mécanismes particuliers pour la fragmentation. Elle se contente de relier le changement de taille des particules (donc le processus de la fragmentation) à l'énergie dépensée.

Les lois de comminution les plus utilisées sont celles de Kick (1885). Ces lois peuvent être exprimées plus généralement par une relation empirique qui n'a pas de bases théoriques mais qui peut être démontrée expérimentalement [35]:

Ou

$$dE = -C \frac{dx}{x^m} \quad \text{III.1}$$

$dE$ : l'énergie nécessaire par unité de poids dans un certain processus de comminution pour fragmenter une particule ayant une taille  $x$  à la taille  $(x-dx)$ .

La loi de Rittenger indique que l'énergie de réduction de taille d'un solide est proportionnelle à la surface spécifique par unité de masse. Mathématiquement, elle peut s'écrire :

$$E = K(s_2 - s_1) \quad \text{III.2}$$

Ou

$E$  : énergie dépensée par volume spécifique;

$s_1$  : surface spécifique initiale;

$s_2$  : surface spécifique finale ;

$K$  : constante.

La loi de Kick postule que cette énergie est proportionnelle au changement de la taille des particules, ainsi :

$$E = k \left( \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad \text{III.3}$$

Ou

$x_1$  et  $x_2$ : sont la taille initiale et la taille finale des particules;

$K$ : est une constante.

Les validations expérimentales de la loi de Kick ne sont pas significatives. Cependant, il paraît que la loi s'applique surtout aux processus de la mise en forme des produits métalliques tels du découpage ou pressage. D'un autre côté, la loi de Rittenger a été validée dans le cas des essais de concassage par chutes de poids.

En 1952, Bond proposa la troisième loi de comminution qui s'écrit:

$$W = 10W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad \text{III.4}$$

Ici,

W: est l'énergie dépensée en **KWh/tonne** de roche;

$F_{80}$  et  $P_{80}$ : sont la taille initiale et finale respectivement à 80% de passants des particules, exprimées en microns ( $\mu$ );

$W_i$ : est l'indice de travail, qui représente l'énergie nécessaire à fragmenter un solide supposé infini en une granulométrie dont 80% passent à 100  $\mu$ .

Néanmoins, il est généralement admis que la loi de Bond n'est valable que dans le broyage des particules fines, comme dans le cas de la récupération du minerai.

## II.7 Paramètres liés aux Tirs

### II.7.1 Données de base de la mise en œuvre d'un tir minier

La discussion ci-dessus donne une idée de la complexité liée à l'exécution d'un tir dans les massifs rocheux. Toutefois, nous pouvons classer les variables et les paramètres qui interviennent selon que ces paramètres sont contrôlables ou non comme indiqués dans le tableau III.2.

**Tableau III.2** : Paramètres de tir de mines.

Contrôlables	Incontrôlables ou difficilement contrôlables
<p><b>paramètres géométriques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diamètre du trou</li> <li>- Longueur de foration</li> <li>- Sur profondeur de foration</li> <li>- Inclinaison du trou</li> <li>- Longueur de bourrage</li> <li>- Matériel de bourrage</li> <li>- Hauteur de talus</li> <li>- Géométrie de maille</li> <li>- Rapport            espacement/banquette (rapport de maille)</li> </ul>	<p><b>Paramètres du massif en place</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Géologie</li> <li>- Résistance et propriétés de matériaux</li> <li>- Discontinuité préexistantes dans le massif</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Configuration globale de la géométrie du tir</li> <li>- Direction de tir</li> <li>- Nombre de faces libres</li> <li>- Taille de volée</li> </ul>	
<p><b>Paramètres liés à l'énergie explosive</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- type d'explosif utilisé</li> <li>- énergie (choc, gaz)</li> <li>- configuration de chargement</li> <li>- méthode de chargement</li> <li>- type d'amorçage</li> <li>- séquence d'initiation</li> </ul>	<p><b>paramètre hydrologique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- eau (quelquefois maîtrisable)</li> </ul> <p><b>Autres</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps</li> </ul>

### II.7.2. Les paramètres géométriques

Les paramètres géométriques déterminent la répartition de la charge dans l'espace. Ceci concerne les caractéristiques du trou de tir telles que son diamètre, sa longueur et son inclinaison ainsi que la disposition des trous dans le gradin.

Le diamètre de trou doit être choisi en fonction des objectifs du tir et des conditions de l'abattage. Un diamètre de charge plus grand a pour conséquence une vitesse de détonation plus élevée dans le cas de l'amorçage latéral et donc plus stable. Ceci favorise un meilleur rendement de l'énergie qui aide à la fragmentation du massif. Cependant, cela peut conduire aussi à une distribution moins efficace de la charge, due à une longueur de bourrage assez importante. En outre, dans le cas où le massif est assez fracturé, une grande maille, conséquence d'un diamètre plus grand, n'arrivera pas à effectuer la fragmentation désirée.

La longueur et l'inclinaison du trou de tir déterminent la distribution de l'énergie dans le volume à abattre. La distribution idéale de la charge est difficile à obtenir pour les trous longs. D'un autre côté, les trous inclinés, spécifiquement dans la première rangée et lorsque le front est incliné, assurent une meilleure distribution de la charge, une sorte de pied plus rapide et plus facile [36] et une nette diminution des effets arrières [37].

La disposition des trous dans l'espace règle la taille de banquette et le rapport de maille, deux paramètres ayant une forte influence sur les résultats du tir.

La banquette est la distance entre la première rangée de trous et la face libre (Figure III.3). Elle détermine alors en grande partie le volume de rocher à abattre par l'énergie explosive contenue dans la rangée. Cette énergie doit être suffisamment grande pour que les contraintes qu'elle engendre puissent fracturer le volume à abattre, que les gaz générés puissent propager les fractures ainsi créées et enfin déplacer les blocs fragmentés vers la fosse.

L'espacement entre les trous, d'un autre côté, s'exprime par rapport à la banquette. En général, un espacement égal à 1,25 fois la banquette donne de bons résultats. [38] avance qu'une bonne fragmentation peut être obtenue en variant l'espacement entre  $2B$  et  $8B$  ( $B$  est la banquette) sans pour autant augmenter la charge ou l'énergie spécifique.

La disposition de maille doit être telle que la distribution latérale de l'énergie dans le massif soit optimale. Les expériences ont montré que cela peut être obtenu dans le cas d'une maille irrégulière plutôt que celui d'une maille carrée.

### **II.7.3. Les paramètres liés à l'énergie explosive**

Ces paramètres déterminent l'intensité et le type d'énergie utilisée et la distribution de l'énergie dans le temps. Généralement, on choisit le type d'explosif en fonction de la nature du massif. Les roches dures peu fracturées nécessitent des explosifs ayant de fortes densités et des vitesses de détonation élevées. Ici, un explosif de forte brisance est indispensable pour créer de nouvelles surfaces pendant la fragmentation. Par contre dans les massifs fracturés, où les blocs du tas abattu sont délimités en grande partie par des discontinuités préexistantes (peu de création de nouvelles surfaces pendant l'abattage), un explosif de faible densité ayant une vitesse de détonation moins importante serait plus efficace. Dans ce cas, et surtout lorsque les fractures sont ouvertes, il faut prendre en compte la perméabilité au gaz du massif rocheux comme un paramètre essentiel.

Selon le type d'explosif utilisé, l'énergie libérée peut être principalement celle de l'onde de choc ou des gaz. Cette répartition peut être mesurée expérimentalement en piscine. Pour cela, on y fait exploser une charge connue d'explosif à analyser. La détonation génère alors une onde de choc et un volume de gaz qui sont enregistrés par des capteurs dans le fluide.

L'énergie de choc se calcule par la relation pression-temps comme suit :

$$E_C = \frac{4\pi}{d_u \cdot C_u} R^2 \int P(t)^2 dt \quad (\text{III.5})$$

Ou

P(t) : est l'enregistrement de la pression en fonction de temps;

R : est la distance charge-capteur;

du: est la masse volumique du milieu, dans ce cas l'eau;

Cu: est la vitesse du son dans l'eau.

L'énergie des gaz est liée à la durée de la première oscillation de la bulle des gaz dans le fluide.

$$T = K_1 E^{1/3} + c \left( K_1 E^{1/3} \right) \quad (\text{III.6})$$

Ou l'énergie des gaz E est calculée par régression linéaire en fonction du temps T.

### III. Conclusion

L'élaboration d'un plan de tir adéquat doit s'effectuer sur la base de la prise en compte des différents facteurs en fonction de leurs parts d'influence sur le traitement parfait du massif. Cet indice représente la qualité de fragmentation des roches dans le tas abattu à l'explosif et influence les rendements de tous les processus ultérieurs.

# Chapitre IV:

Effets de discontinuités  
sur le résultat de tir

جامعة العربي التبسي - تبسة  
Universite Larbi Tebessi - Tebessa

## Chapitre IV: Effets de discontinuités sur le résultat de tir

### I. Influence du massif rocheux sur les tirs

#### I.1 Influence de la matrice rocheuse

Globalement les caractéristiques de la roche influent beaucoup sur :

- les performances de la foration ;
- la transmission de l'énergie explosive au massif rocheux et la fragmentation de celui-ci.

Une classification de la facilité d'un massif à être fragmenté par le tir à été proposé par (Muller. B, 1997) sur la base de la mesure de son impédance (vitesse x densités) et de la taille moyenne des blocs du massif in situ où blocométrie (figure IV.1), le premier paramètre est fonction de la matrice, le second paramètre est fonction de la densité de discontinuités.

La nature de la matrice peut, dans des cas assez rares, poser des problèmes pour le bon fonctionnement d'un tir. (Tableau IV.1)

**Tableau IV.1:** La matrice et son influence sur le tir.

Elément	Mesure / Analyse	Influence sur le tir
<b>Nature</b>		
Texture et composition minéralogique	Analyse géologique et minéralogique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choix de la méthode de foration et usure de l'équipement</li> <li>• Transmission de l'énergie explosive</li> </ul>
Micro fracturation	Ultrasons (indice de continuité)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficacité de la foration</li> <li>• Fragmentation et micro-fragmentation des blocs</li> </ul>
Altération, présence d'hétérogénéités	Diagraphies et méthodes géophysiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficultés de foration</li> <li>• Stabilité du trou de tir</li> <li>• Adaptation du plan de tir</li> <li>• Risques de projection, granulométrie inadéquate, etc.</li> <li>• Venues d'eau</li> <li>• Taux d'avancement variables (travaux souterrains en particulier)</li> </ul>

Propriétés physiques et mécaniques		
Densité (1.5- 3),	Mesure au laboratoire	Transmission de l'énergie explosive au massif
porosité (0 - 30 %)	Mesure au laboratoire	Présence d'eau, propagation des fissures créées par le tir
Propriétés sismiques (vitesse des ondes longitudinales et transversales)	mesure au laboratoire ou in situ	<ul style="list-style-type: none"> <li>Type d'explosifs appropriés (rapport d'impédance)</li> <li>Propagation des vibrations (atténuation et filtrage fréquentiel)</li> </ul>
Propriétés mécaniques : résistance (traction et compression), module de Young et coefficient de poisson	Essai mécanique en laboratoire	Facilité de foration et de fragmentation de la roche
Propriétés abrasives	Laboratoire (indice LCPC)	Usure des outils de foration

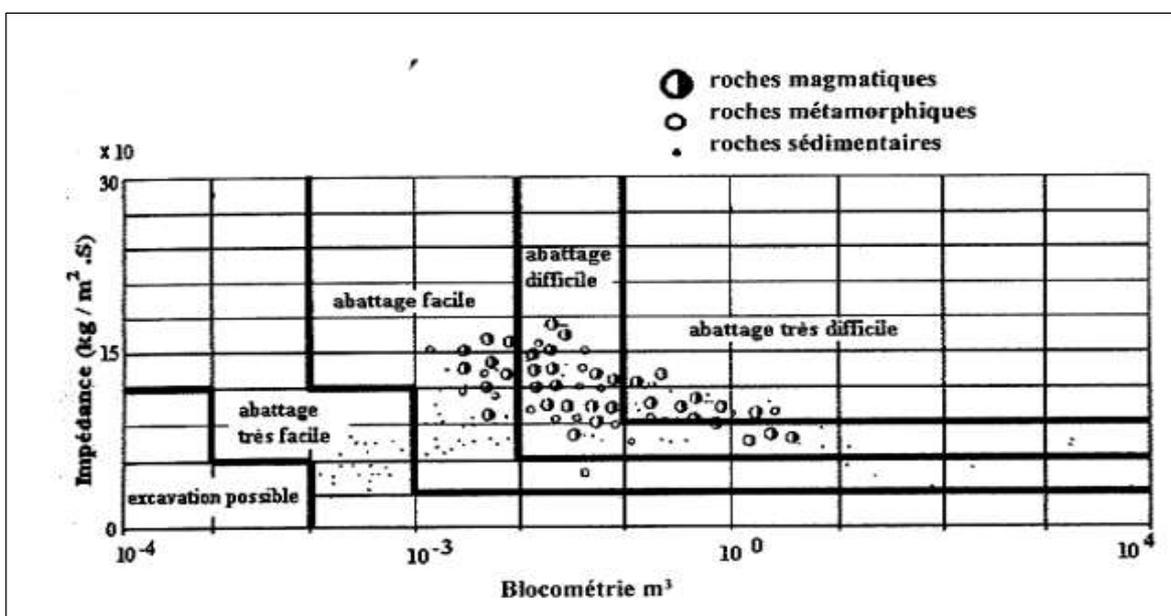


Figure IV.1. Classification de l'aptitude d'un massif rocheux à être abattu en fonction de sa Blocométrie et de son impédance [39].

### I.2 Influence de l'hétérogénéité du massif

La principale caractéristique d'un massif rocheux est d'être hétérogène, ce qui vient compliquer la conception et la réalisation d'un tir, cette hétérogénéité affecte la structure du massif en fonction de la présence des discontinuités, en effet plus de la présence de

discontinuités, la continuité de la matrice peut être affecté par la présence d'hétérogénéités d'origine syngénétique ou post génétique. (Tableau IV.2).

De même, les hétérogénéités ou les variations latérales ou en profondeur de la nature de la roche vont aussi perturber le bon fonctionnement du tir, si elles n'ont pas été prise en compte dans sa conception. Notamment, la transmission de l'énergie explosive sera fonction des contrastes de propriétés induites par la présence et le volume respectif de roches de natures différentes.

Un changement de nature de roche, par exemple, passage de schistes à des micaschistes ou des gneiss et inversement, va correspondre à une différence de dureté qui va affecter la vitesse d'avancement du creusement, et il faut alors adapter le plan de tir à cette nouvelle situation, on peut avoir à passer de tirs en pleine section à des tirs sur une partie de la section.

Lorsqu' une zone de faiblesse, voire de vides est détectée dans un forage, la charge de colonne devra être interrompue par un bourrage intermédiaire au niveau de cette discontinuités, afin que l'énergie explosive soit libérée dans les zones massives et ne s'échappe pas, sans travailler dans la discontinuité, en provoquant des projections aériennes dangereuses, c'est en particulier le cas dans les zones karstiques pour les massifs calcaires, (figure IV.2).

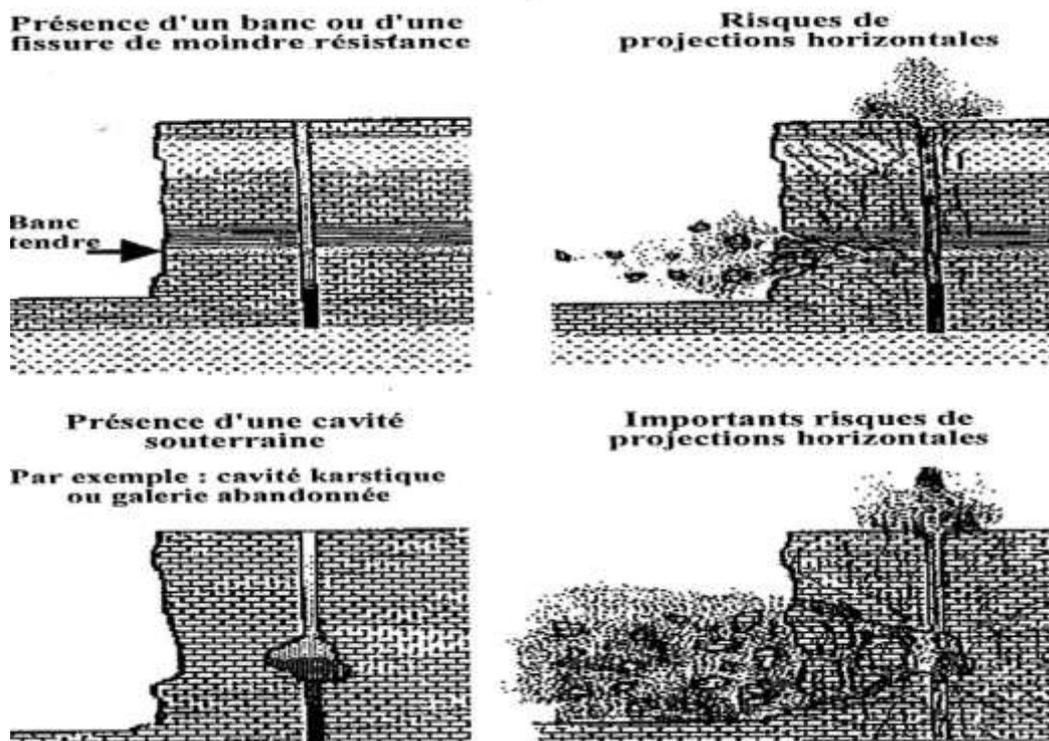


Figure IV.2. Risques de projection liés à la présence de zones de faiblesse [40].

Tableau IV.2: Type d'hétérogénéités rencontrées dans un massif sédimentaire.

<b>Roche sédimentaire</b>
<b>1- Hétérogénéités syngénétique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• variations latérales et verticales des faciès.</li> <li>• présence de blocs.</li> <li>• structures sédimentaires.</li> </ul> (plan et joints de stratification).
<b>2- Hétérogénéités post-génétiques.</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• altération (transformation minéralogique liée à l'action météorique ou hydrothermale).</li> <li>• latérisation (dissolution : vides, Karst).</li> <li>• tectonique (structure)</li> </ul> (fracturation, failles, filon).

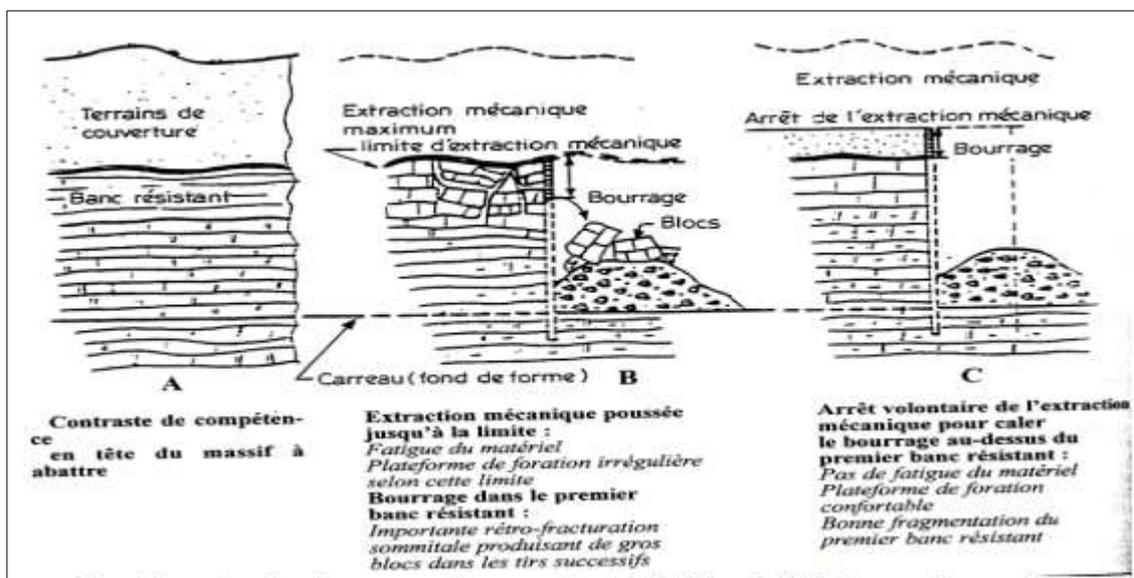
Les hétérogénéités du massif peuvent également être constituées de niveaux, ou zones plus résistantes (induration, recristallisation, cimentation). Lorsque le bourrage des trous de mine (dispositif qui est destiné à diriger l'énergie explosive vers le massif rocheux) est situé dans un niveau sensiblement plus résistant, ce banc fracturé, la poussée vers le haut provoquée par la détonation tend à le soulever, cela mène aux résultats suivants

(figure IV.3) :

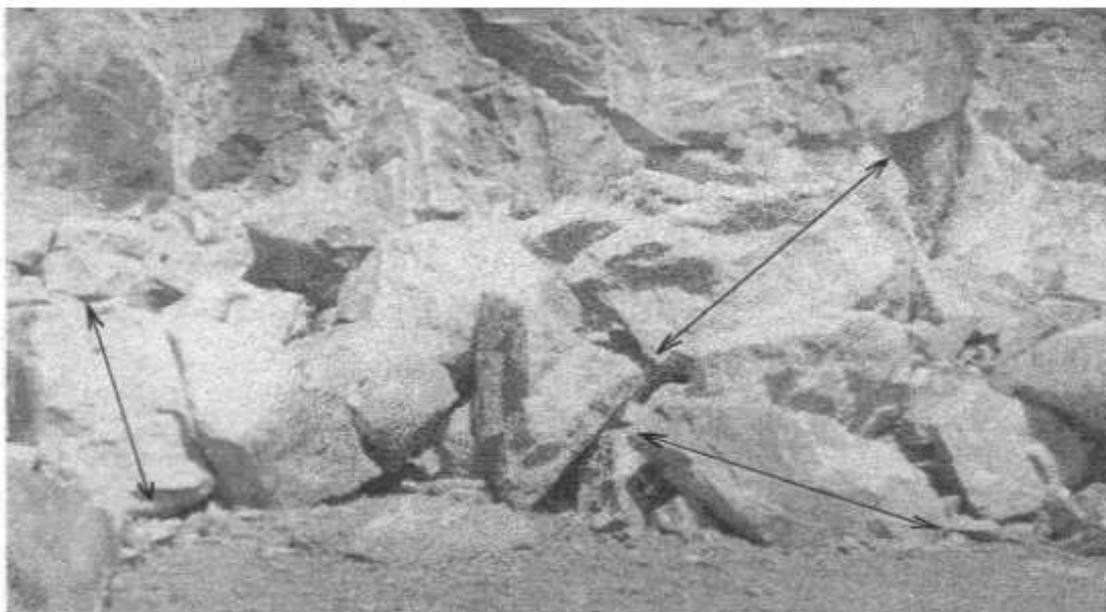
➤ Production des blocs (hors format) gênant le chargement et le réemploi (figure IV.4) ;

➤ développement d'une fracturation (en crête ou sommitale) : fracturation du sommet du front restant en place; celle-ci gêne la foration pour les tirs suivants, diminue leur efficacité et induit des instabilités avec danger de chute de blocs sur l'atelier de chargement. Il suffit alors de conserver en place une certaine épaisseur de ces terrains peu résistants de couverture, au niveau de laquelle sera placé le bourrage des trous de mine pour l'abattage du rocher résistant sous-jacent ; outre, l'avantage de supprimer les problèmes évoqués ci-dessus, cette façon de procéder, évite de pousser le terrassement mécanique au maximum des engins, qui travaillent dans des conditions économiques satisfaisantes, ce niveau de couverture peut également offrir une protection contre les projections, le surcoût entraîné par une longueur de foration supplémentaire dans un terrain peu résistant et très faible comparativement aux avantages.

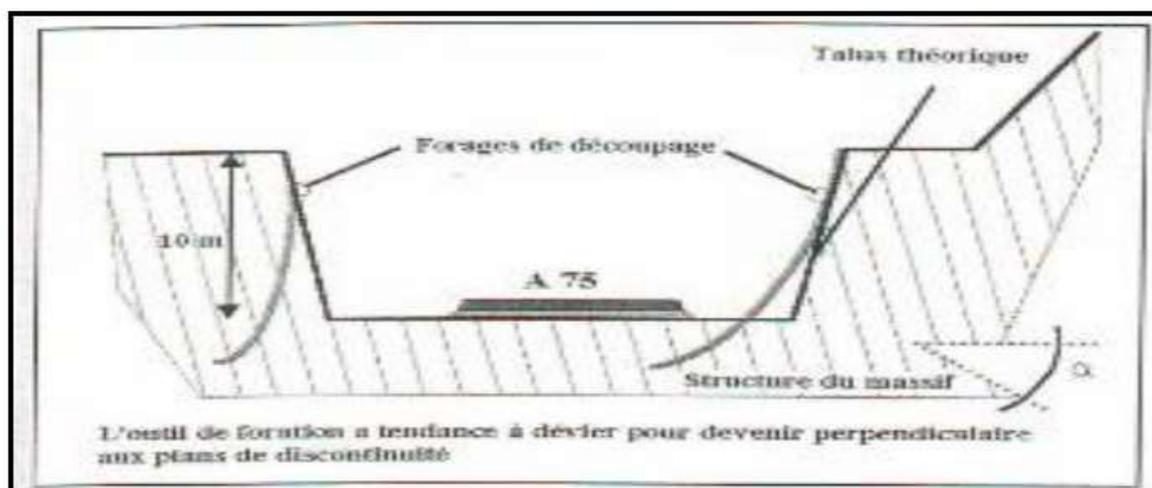
De façon générale, la présence des hétérogénéités, vient compliquer la mise en œuvre du tir et son fonctionnement. Il faut toujours adapter au cas par cas le plan de tir (choix de la maille, type d'explosif et sa répartition, énergie spécifique mettre en œuvre, etc.) pour obtenir un résultat satisfaisant.



**Figure IV.3.** Adaptation du chargement des trous de tir à l'hétérogénéité de compétence du massif rocheux [41].



**Figure IV.4.** Blocs hors format gênant le chargement et le réemploi.



**Figure IV.5.** Déviation de foration dues à la structure Géographique du massif : présence d'une famille de plans de discontinuité majeure [42].

### I.3 L'influence des discontinuités

La structure d'un massif a une influence très importante sur le tir, elle détermine tout d'abord la taille des blocs in situ, elle conditionne la mise en œuvre du tir, le fonctionnement même de l'énergie explosive et sa transmission au massif, et peut occasionner des problèmes de stabilité au niveau des trous de tir ou de gradins, voire de talus entiers ou de galeries dans les mines ou les travaux souterrains, (tableau IV.3).

**Tableau IV.3:** Les discontinuités et leur influence sur le tir [43].

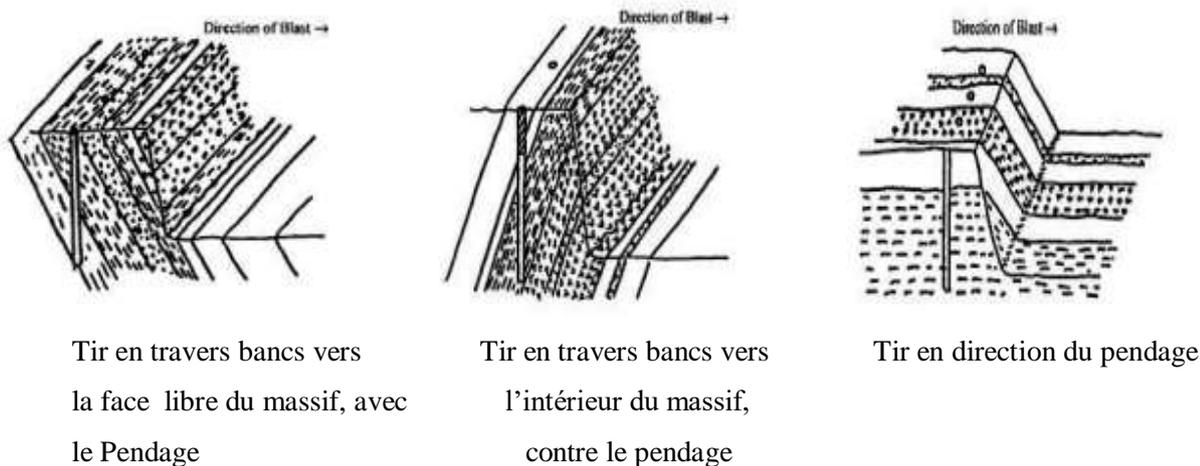
<b>Les discontinuités et leur influence sur le tir</b>		
<b>Elément</b>	<b>Mesure/Analyse</b>	<b>Influence sur le tir</b>
Géométrie (orientation et extension) et intensité (espacement/ fréquence)	Analyse géologique et modélisation (normes ISRM <sup>o</sup> ) RQD Diagraphies radar	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Blocométrie du massif</li> <li>•Direction du tir/orientation du front(ou de la séquence d'amorçage)</li> <li>•Développement et intensité des effets arrières</li> <li>•Facilité et précision de forage : déviation, conséquences sur la maille et le fonctionnement du tir</li> <li>•Stabilité du trou de tir, du front ou de la paroi</li> </ul>
Propriétés mécaniques (cohésion et angle de frottement)	Test au cisaillement au laboratoire ou in situ	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Efficacité du tir en terme résultat: transmission de l'énergie d'explosive, consommation d'explosif</li> </ul>
Configuration structural global	Analyse géologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Efficacité du tir en terme d'opération: possibilité de raté, découpage des charges partiel ou total</li> <li>•Propagation des vibrations</li> <li>•Condition hydrogéologique</li> </ul>
Caractéristique de remplissage (nature et épaisseur)	Analyse géologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Stabilité du front</li> </ul>
<b>ISRM<sup>o</sup>: International Society of Rock Mechanics</b>		

### I.3.1. Influence de la blocométrie du massif

L'intersection des discontinuités va déterminer des blocs dans l'espace, dont la distribution granulométrique, ou blocométrie, sera fonction de leur orientation, de leur extension et de leur densité. Cette blocométrie doit être prise en compte pour la conception du tir, et influera sur la géométrie du tir (choix de la maille, espacement entre trous), et de l'énergie explosive à mettre en jeu en fonction des objectifs du tir (granulats, roches ornementales, travaux souterrains, etc.), pour certains auteurs, elle intervient dans la classification des massifs rocheux pour leur facilité à être fragmentés.

### I.3.2 Influence de l'orientation des discontinuités

La classification des discontinuités en familles et leurs hiérarchisations par ordre d'importance permet de choisir l'orientation des fronts d'abattage et le sens de progression de ces fronts les plus favorables qui minimisent les difficultés. Elle permet de prendre le massif dans le bon sens. La figure (figure IV.6) et le tableau (IV.4) résument les avantages et les inconvénients correspondant des propositions précédentes.



Tir en travers bancs vers  
la face libre du massif, avec  
le Pendage

Tir en travers bancs vers  
l'intérieur du massif,  
contre le pendage

Tir en direction du pendage

**Figure IV.6.** Adaptation du plan de tir à partir de la structure géologique du massif rocheux [40].

Burkle, 1979, repris par Fourmaintraux. Propose l'adaptation des plans de tir à partir de la classification des discontinuités en familles :

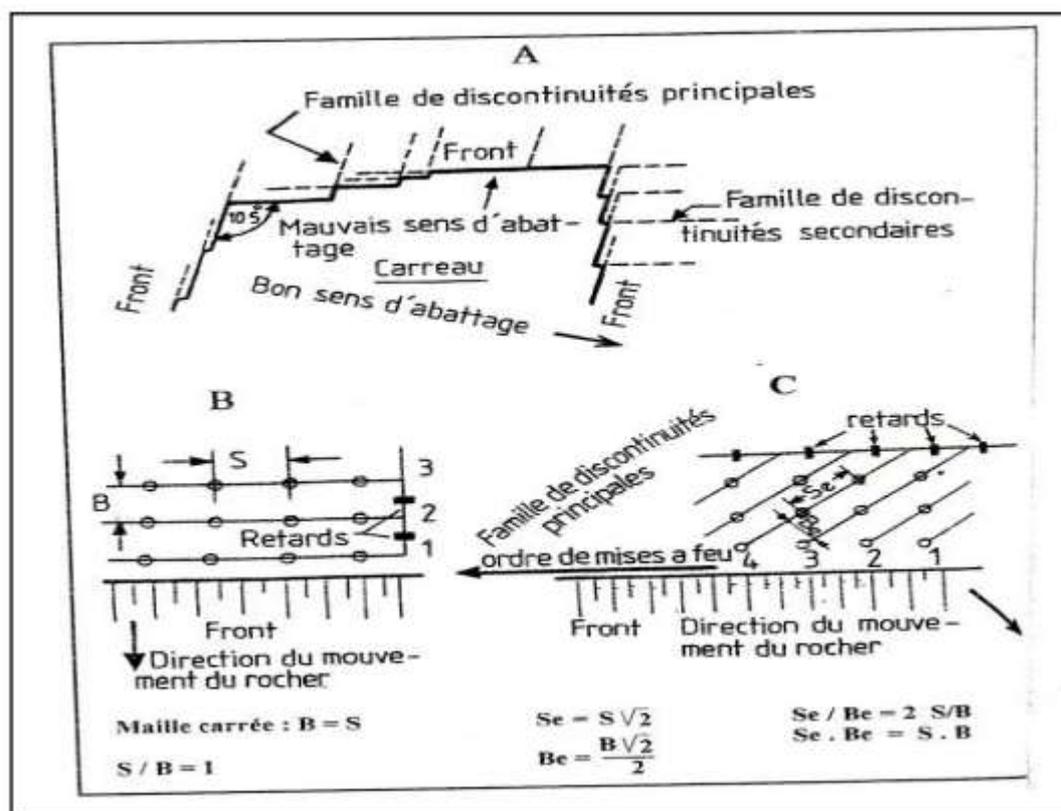
1. Si l'orientation de la famille de discontinuités est inclinée par rapport au front d'abattage, on dit que l'on prend le massif en travers bancs, le tir est alors effectué avec le pendage vers la face libre du massif ;
2. Si l'orientation de la famille de discontinuités est verticale par rapport au front d'abattage, on dit que l'on prend le massif en travers bancs, le tir est alors effectué contre le pendage vers l'intérieur du massif ;
3. Si l'orientation de la famille de discontinuités est horizontale par rapport au front d'abattage, on dit que l'on prend le massif en direction, le tir est alors effectué avec la direction du pendage.

**Tableau IV.4:** Avantages et inconvénients des plans de tir à partir de la structure géologique du massif rocheux.

Adaptation du tir	Avantages	Inconvénients
Tir en travers bancs avec le pendage, orientation de discontinuités inclinée	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon travail de l'énergie explosive, bonne orientation des discontinuités pour la réflexion de l'onde et pour le mouvement vers le haut de la masse abattue</li> <li>• Carreau régulier, tas bien étalé, conditions favorables au chargement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soulèvement des bancs supérieurs induisant effets arrière importants, d'où gêne pour la foration et production de blocs dans abattages suivants par perte d'énergie dans les fractures.</li> <li>• risques de glissements de blocs et problèmes de stabilité du front, dépendant de la résistance au cisaillement des plans et des conditions hydrauliques</li> </ul>
Tir en travers bancs, contre le pendage, orientation de discontinuités verticale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon travail de l'énergie explosive (cf. ci-dessus)</li> <li>• réduction des effets arrière dans les parties supérieures</li> <li>• pas d'instabilité par glissement sur les discontinuités.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclinaison des bancs opposés au mouvement de la masse rocheuse, difficulté de faire sauter le pied, irrégularité du carreau,</li> <li>• tas moins étalé et plus haut,</li> <li>• instabilité du type basculement.</li> </ul>
Tir en direction, orientation des discontinuités horizontale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tir recoupant les mêmes formations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilités d'effet arrière important localisés au droit des couches de faible résistance au frottement fracturées</li> <li>• Profil d'excavation en dents de scie en cas fort contraste dans le massif ou de distribution irrégulière des discontinuités, en pied de talus</li> </ul>

L'influence de la présence de discontinuités à son profit ou la bonne solution consiste usuellement de faire progresser le front perpendiculairement à la direction horizontale des discontinuités principales, (travailler en travers banc), et à caler le front lui-même parallèlement à une famille de discontinuités secondaire, ce qui utilise au mieux l'état de fracturation naturelle du massif, (figure IV.7 A) : le mouvement des masses abattues se fait aussi perpendiculairement aux discontinuités principales. Cette orientation efficace du mouvement de la masse rocheuse, lors du tir peut également être obtenue, par la disposition dans l'espace et la programmation dans le temps convenable des mises à feu

des différents paramètres, surtout dans les tirs à rangées multiples (figure IV.7 B et C). Il faut dans ce cas tenir compte du changement des paramètres géométriques induits, si l'on ne modifie pas la maille de foration.



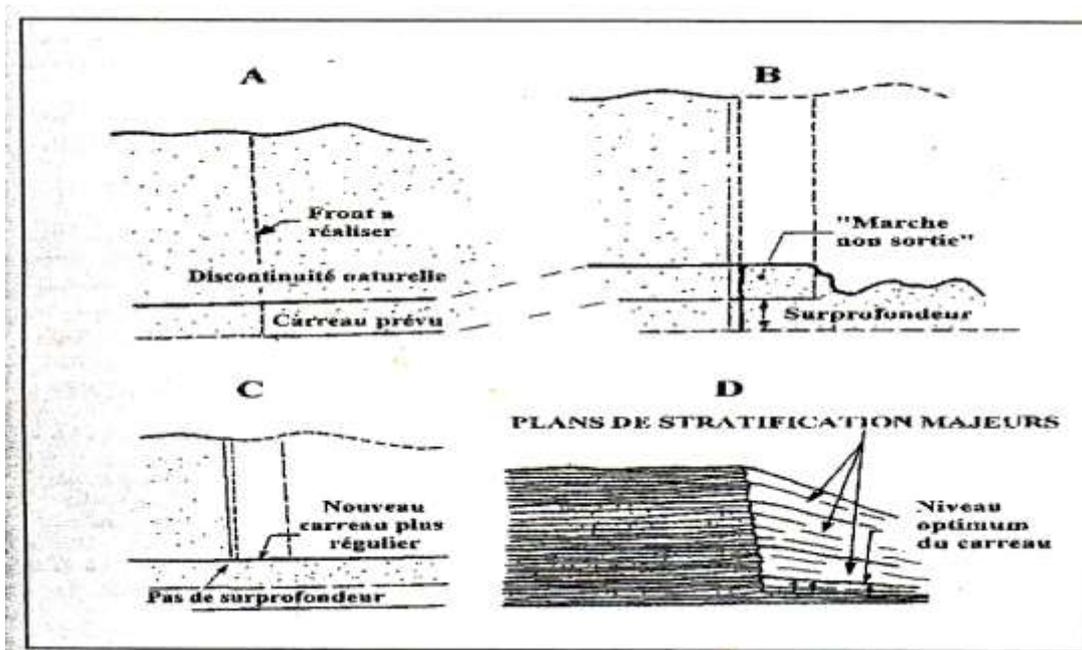
**Figure IV.7.** Orientation des tirs et séquençage en fonction de la structure géologique du massif.

Influence de la densité de discontinuités  $L$ 'intervalle entre les discontinuités (ID), prend une importance déterminante lors de la réalisation de parois d'excavation définitives (talus routier, fouilles de fondations, etc.), en utilisant les techniques de découpage à l'explosif. Les masses rocheuses très résistantes, mais très discontinues sont défavorables à la mise en œuvre de ces techniques, en particulier lorsque les discontinuités sont plus ou moins ouvertes, recoupent la ligne de découpage. Les gaz d'explosion s'engouffrent et diffusent dans ces discontinuités ouvertes, les élargissent et les propagent dans la fissure de découpage. Il n'y a souvent pas d'autre solution, que de modifier l'orientation de la paroi à découper.

Dans le cas d'une discontinuité horizontale, située près du niveau de carreau d'extraction, dans la zone du pied, l'énergie se dissipe dans la discontinuité et travaille

alors insuffisamment : le pied sortira mal et il apparait une sorte de marche à la base du front qui gêne le chargement et transport, (figure IV.8 A et B).

Une solution consiste à relever le niveau du carreau jusqu'à celui du plan de discontinuité : la surprofondeur de foration est supprimée, le carreau se règle parfaitement et les conditions de chargement et de transport sont idéales, (figure IV.8, C). Une telle disposition peut être recherchée et prévue à l'avance dans des massifs rocheux stratifiés subhorizontaux, (figure IV.8, D).



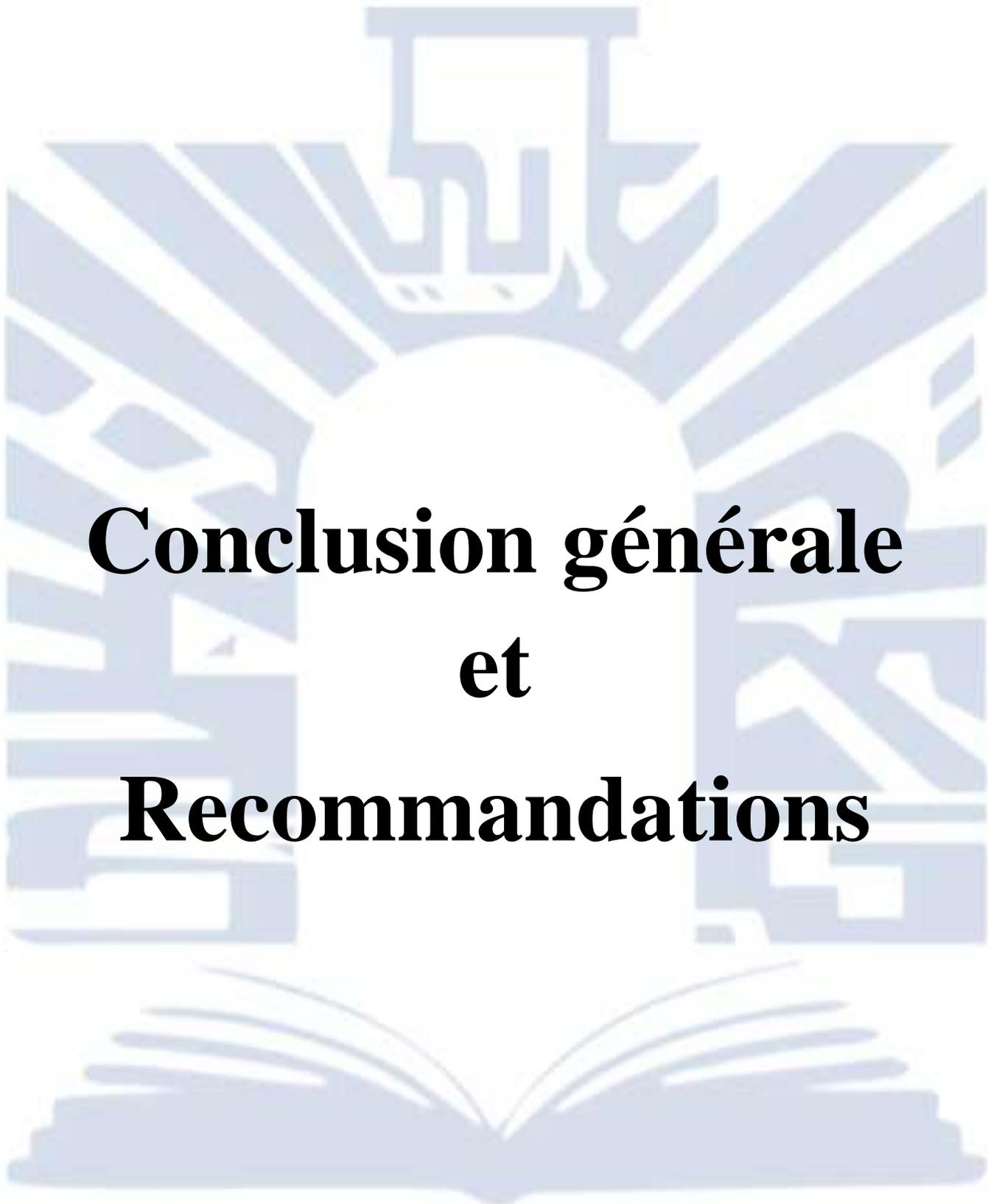
**Figure IV.8.** Influence de la présence d'une discontinuité majeure sur la sortie du pied de tir.

**Tableau IV.5:** Hydrogéologie et influence des conditions hydrologiques sur le tir.

<b>Hydrogéologie et influence des conditions hydrologiques sur le tir</b>		
<b>Élément</b>	<b>Mesure/Analyse</b>	<b>Influence sur le tir</b>
<b>Niveau de l'eau</b>	Mesure in situ	Choix de l'explosif approprié, augmentation du cout explosif + amorçage, et de la mise en œuvre du chargement de l'explosif
<b>Débit</b>	Essais de pompage	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Interaction massif rocheux/ l'explosif</li> <li>•Augmentation de transmission d'énergie, diminution des propriétés mécaniques globales du massif rocheux</li> <li>•Stabilité du trou de tir</li> <li>•Stabilité du front</li> <li>•Augmentation du temps de mise en œuvre du tir</li> </ul>

## II. Conclusion

Ce chapitre nous a renseignés sur les phénomènes associés à l'explosion et les difficultés de contrôler les résultats des tirs à l'explosif qui en résultent. Il est déjà important de pouvoir identifier les paramètres qui peuvent influencer l'opération et indiquer (dans une certaine mesure) la manière dont ces paramètres, pris isolément, affectent la fragmentation.



# **Conclusion générale et Recommandations**

جامعة العربي التبسي - تبسة  
Universite Larbi Tebessi - Tebessa

### Conclusion générale et recommandations

L'analyse des paramètres et facteurs influençant l'abattage des roches à explosif nous a permis de cerner quelque peu le problème posé et de déduire qu'en dehors de la série de facteurs influençant l'opération d'abattage des massifs rocheux, on distingue les discontinuités naturelles qui ont un rôle important dans la réussite de l'opération d'abattage, son rendement en particulier.

Il est constaté et vérifié que les discontinuités génèrent des hors gabarits et des projections de pierres non désirables et qu'il faudrait éviter un tant soit peu, car pouvant représenter un danger et pour les hommes et le matériel.

La caractérisation du massif par les discontinuités naturelles, leurs classification et leur hiérarchisation par ordre d'importance (orientation, extension...) permet de choisir l'orientation des fronts d'abattage et le sens de progression le plus favorable.

Un plan le plus optimal sera donc celui qui saura concilier entre les différents obstacles techniques et géologiques.

Nous recommandons qu'avant la conception et la réalisation d'un plan de tir, il est indispensable de déterminer les propriétés des massifs rocheux dans lesquels l'abattage sera effectué, parce que la fragmentation des roches est influencée par un certain nombre de paramètres géo-mécaniques tels que la traction, compression, cisaillement... facteurs déterminants quant à la qualité des tas abattus.

Le massif étant un ensemble hétérogène, il devient nécessaire donc, lors de l'élaboration de chaque plan de tir, de mener une étude minutieuse de chaque tronçon du massif avec ou sans altération particulière des discontinuités afin d'adapter l'emplacement de la charge explosive qui permettrait de mieux gérer son énergie.

Le développement et la propagation des fissures radiales à partir des trous de mines peuvent être empêchés par des discontinuités, ce qui provoque un faible arrachement autour des charges explosives.

Enfin nous préconisons quelques autres recommandations:

Le choix de l'orientation du front d'abattage par rapport à la famille des fissures qui prédomine dans le but d'assurer une bonne stabilité des talus ;

## Conclusion générale et recommandations

---

La foration des trous doit s'effectuer perpendiculairement au plan de la famille principale des fissures en vue de minimiser les pertes de l'énergie du tir dans le massif;

La détermination de la consommation spécifique d'explosif peut, dans une certaine mesure, compenser les pertes d'énergie en vue d'améliorer la fragmentation des roches.

# Bibliographie

جامعة العربي التبسي - تبسة  
Universite Larbi Tebessi - Tebessa

## Bibliographie

---

### Bibliographie

- [1]. Martin, François, [2012], «Mécanique des roches et travaux souterrains », Cachan, huitième édition.
- [2]. HOANG, Thi Thanh Nhan, [2010], «Etude du comportement d'un milieu rocheux fracturé », Thèse doctorat de l'école des ponts Paris Tech.
- [3]. TAHIRI, Abdelouahed, [1992], «Modélisation des massifs rocheux fissures parla méthode des éléments distincts », Thèse doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [4]. POROKHOVOÏ, Evgueni, [1995], « Stabilité à long terme des talus de mines à ciel ouvert dans les massifs de roches basiques et ultrabasiques », Thèse doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [5]. Françoise Homand et Pierre Duffaut, [2000], « Manuel de mécanique des roches», Les presses de l'école des Mines Paris.
- [6]. DELAGE, P; CUI, Y.J ; « Comportement mécaniques des sols non saturés » C302; Technique de l'ingénieur, traité construction ; 19 pages ; 1999.
- [7]. DEGOUTTE, G ; ROYET, P ; « Aide-mémoire de mécanique des sols » ; Réédition ; 99 pages ; 2005.
- [8]. SOUKATCHOFF, V.M ; « Cours de géotechnique » de l'école nationale supérieure des mines de Nancy ; 100pages ; 2007.
- [9]. PHILIPPONAT, G ; « Fondations et ouvrages en terre » ; EditioEyrolles, Paris ; 402 pages ; 1979.
- [10]. SAROUT, J ; « Propriétés physiques et anisotropie des roches argileuses : Modélisation Micromécanique et Expériences Triaxiales ». Thèse de doctorat de l'université Paris XI ORSAY ; 241 pages ; 2006.
- [11]. DJEBROU, B; « traitement du sol par colonne ballastes dans la région de Blida», mémoire de fin d'étude de l'Université SAAD DEHLAB BLIDA ; 102 pages ; 2007.
- [12]. LAVASSEUR, M ; « Contribution des systèmes d'information géographique à l'analyse quantitative de l'aléa "glissement de terrain" Exemple d'application au secteur de Ville de La Baie, Québec », Mémoire de maîtrise de l'université du Québec INRS.E.T ; 213 pages ; 2003.
- [13]: Blanchier A .thiard B et Wber P, Theorie du Travail une explosif l'. (Théorie de dynamitage). Mines & Carrières. Octobre 1991.

## Bibliographie

---

[14]. Site internet éducatif. @profpress.net.

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

[16]. AZEALDEEN SALIH HASSAN AL-JAWADI «EVALUATION OF THE ROCK MASS AT THE BEKHME DAM SITE NORTH EAST IRAQ». Thèse de doctorat de Mosul University College of Science.

[17]: J.-A. FLEURISSON Centre de Géologie de l'Ingénieur École des mines de Paris École nationale des ponts et chaussées Université de Marne-la-Vallée, Bâtiment IFI 5, bd Descartes Champs-sur-Marne 77454 Marne-la-Vallée Cedex 2 fleurisson@cgi.ensmp.fr "Structures géologiques et stabilité des pentes dans les massifs rocheux : description, analyse et modélisation".

[18] : mémoire magister M. Bouterfif.

[19]: Deere, D. U., [1988], "The Rock Quality Designation (RQD) index in practice», in Rock classification systems for engineering purposes, edition Kirkaldie L., Philadelphia;

[20]: Milne, D. (2007, May). Rock mass classification challenges. In Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands, Two Volume Set: Proceedings of the 1st Canada US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27–31 May 2007;

[21]: Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification of jointed rock masses. Exploration for Rock Engineering. Johannesburg: Balkema;

[22]: Gadri L., [2012], « Etude de la déformation et de la rupture des massifs fissurés par la méthode des éléments finis », Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat, université Badji Mokhetar, Annaba;

[23]: Chalhoub M., [2006], "Apports des méthodes d'homogénéisation numériques a la classification des massifs rocheux fracturés". Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, spécialité géologie de l'ingénieur;

[24]: Bieniawski Z.T., [1989], "Engineering rock mass classifications a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering", New-York, Wiley- Interscience;

## Bibliographie

---

- [25]: Barton N et al., [1974], "Engineering classification of Rock Masses for the Design", support. RockMechanics;
- [26]: Baton N. R. et Choubey V., [1977], "The shear strength of rock joints in theory and practice", édition Rock Mech.
- [27]: Blanchier A. Thiard B et Weber P, Theorie du Travail une explosif l'. (Théorie de dynamitage). Mines & Carrières. Octobre 1991.
- [28]: Harries. G and Mercer. J.K, the science of blasting and its use to minimise costs. Proc. Australian inst. Min. Metal. Annual conf. Adelaide, part B, 1975.
- [29]: Hagan, T.N, 1979, The control of fines through improved blast design. Proceedings of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, September 1979.
- [30]: Fourny et al, Fragmentation by Blasting, the First International symposium on Rock Fragmentation August (1983).
- [31]: Blanchier, A., Thiard, R. et Weber, P., 1988, "Theorie du travail à l'explosif", Ind, Minérale et Carrière – les techniques.
- [32]: Blanchier et al, Théorie du travail a l'explosif, ind, Minérale et carrier-les technique mai –juin, 1988
- [33]: Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W, Fundamental of rock mechanics. Chapman & Hall ltd. , London, 1975.
- [34]: Ash, R.L., 1985 , "Flexural rupture as a rock brekage mechanism in blasting", Fragmentation in Blasting Fourny, for Experimental Mechanics.
- [35]: Duvall, W. I. et Atchison, T.C., 1957, "Rock breakage by explosives", US Bureau of Mines Rep, of Investigation.
- [36]: Hagan, T.N., 1983, "The influence of controllable blast parameters on fragmentation and mining costs", Trans, First International Symposium of Rock Fragmentation by Blasting, Vol 1, Holmberg, R et Rustan, A.
- [37]: Thiard, R. et Sifre, X.G., 1988, "Principes et schémas de tirs à ciel ouvert ", Ind, Minerale et Carrières – les techniques, mai – juin, 1988

## Bibliographie

---

[38]: Langefors, U. et Kihlstrom, B., 1979, "The modern technique of rock blasting", AWE /, Gebers, Stockholms, Suede,

[39]: Muller B., 1997, « Adapting blasting technologies to the characteristics of rock masses in order to improve blasting results and reduce blasting vibrations », Fragblast vol.1, n°3, 1997.

[40]: B. Soltani : Paramètres influent sur les résultats d'abattage a l'explosif, mémoire de magister d'état.

[41]: Hubert Heraud, Alan Blancheier, Yvan Sifre Essai d'optimisation d'une blocométre d'abattage à l'explosif.

[42]: Héraud .H ; « Reconnaissance des massifs rocheux » : prise d'empreintes dans un forage. Ind. Minérale, Mines et Carrière.

[43]: Kimour Mohamed : caractérisation des discontinuées du massif en vue de l'abattage à l'explosif concept Mine to Mill carrière Socar (Guelma).